Universidade de São Paulo
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo

Bruno Henrique
Emmanuel Mendes

Tetos verdes e políticas públicas

uma abordagem multifacetada

São Paulo
2014

BRUNO HENRIQUE EMMANUEL MENDES

Tetos verdes e políticas públicas:
uma abordagem multifacetada

Dissertação apresentada à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade
de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo

Área de Concentração: Paisagem e Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Paulo Renato Mesquita Pellegrino

EXEMPLAR REVISADO E ALTERADO EM RELAÇÃO À VERSÃO ORIGINAL, SOB
RESPONSABILIDADE DO AUTOR E ANUÊNCIA DO ORIENTADOR.

O original se encontra disponível na sede do programa.

São Paulo 25 de julho de 2014

São Paulo

2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

E-MAIL DO AUTOR: brunomendes@gmail.com

Mendes, Bruno Henrique Emmanuel
M538t Tetos verdes e políticas públicas: uma abordagem
multifacetada / Bruno Henrique Emmanuel Mendes. -- São
Paulo, 2014.
347 p. : il.

Dissertação (Mestrado - Área de Concentração: Paisagem e
Ambiente) – FAUUSP.

Orientador: Paulo Renato Mesquita Pellegrino

1.Coberturas – São Paulo (SP) 2.Arquitetura sustentável
3.Arquitetura paisagística 4.Planejamento territorial urbano
4.Tetos verdes I.Título

CDU 69.024

MENDES, B. H. E. Tetos verdes e políticas públicas: uma abordagem multifacetada.
Dissertação apresentada à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade
de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

*A meu pai, Manoel, minha mãe, Carmen e meu irmão, Ricardo,
que me apoiaram durante este trabalho*

Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Renato Mesquita Pellegrino, pela disponibilidade em me orientar em todos os momentos necessários.

À Profª. Drª. Denise Helena Silva Duarte, que acompanhou os primeiros passos dessa pesquisa, ainda na graduação.

Aos professores da Banca de Qualificação: Profª. Drª. Denise e Prof. Dr. Francisco Vecchia.

A Elaine Pereira da Silva, Luciana Schwandner Ferreira, Tarsila Kato e demais colegas do DEPAVE (Departamento de Parques e Áreas Verdes da Secretaria do Verde e Meio Ambiente), que souberam entender minha ausência em determinados momentos para a realização desse trabalho.

À Mariana Falcone Guerra, por dar importantes sugestões ao trabalho.

A Iara Ferraz e José Carlos Guerra Jr., por compartilharem parte da jornada neste assunto fascinante.

A todos os meus amigos, que souberam entender minha ausência durante os últimos meses.

À minha família.

“Mas isto não é planta. Isto é mato!”

Usava a palavra “mato” com entonação profundamente depreciativa.

Eu quis saber então sua definição de “planta” e de “mato”.

Deu-me um olhar ainda mais incrédulo e condescendente e explicou

que “mato” era tudo aquilo que vingava sozinho,

que não prestava, que devia ser exterminado,

e que “planta” era o que se cultivava, o que tinha valor, que dava dinheiro.

Quando me afastei, tive a impressão de que ele me considerava um pobre

louco, por não saber fazer distinções tão evidentes.

José Lutzenberger

Resumo

MENDES, B. H. E. **Tetos verdes e políticas públicas:** uma abordagem multifacetada. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). São Paulo: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, 2013.

“Tetos verdes”, ou a colocação de vegetação sobre coberturas de edifícios, têm se mostrado importantes ferramentas na mitigação de diversos problemas ambientais urbanos. Porém, seus benefícios coletivos apenas se tornam significativos após sua instalação em massa, sendo uma estratégia ambiental altamente dependente do agente privado — os proprietários. Neste trabalho, buscou-se uma abordagem interdisciplinar com a Economia Ambiental e Comportamental, de modo a revelar os mecanismos de tomada de decisão dos indivíduos, tanto motivações econômicas (como sanções e subsídios), quanto motivações ditas “irracionais”, como a imitação de comportamento. Depois, reconhecendo os tetos verdes como soluções polivalentes, faz-se uma abordagem múltipla para seu encaixe em políticas públicas existentes: clima urbano, economia de energia, poluição atmosférica, gerenciamento de águas pluviais e biodiversidade, cada uma envolvendo uma breve descrição da teoria e de políticas públicas existentes, desde o contexto mundial até o município de São Paulo. Como estudo de caso, aplica-se o índice ambiental alemão BFF (*Biotopflächenfaktor*, fator de superfícies ecológicas) a algumas tipologias marcantes de São Paulo, e conclui-se que o índice pode ser importante ferramenta na fomentação não só de tetos verdes, como de outras soluções ambientais de natureza pulverizada, devido à sua flexibilidade e facilidade de aplicação, podendo ser ajustada à realidade do município para melhores resultados.

Palavras-chave: tetos verdes, telhados verdes, São Paulo, arquitetura sustentável, arquitetura paisagística, planejamento territorial urbano

Abstract

MENDES, B. H. E. **Green roofs and public policy**: a multifaceted approach. Dissertation (Masters in Architecture and Urbanism). São Paulo: School of Architecture and Urbanism, University of São Paulo, 2013.

The placement of vegetation on top of buildings, or “green roofs”, has been shown to be an important mitigation tool for several environmental problems in cities. However, their collective benefits become more significant with widespread adoption, thus depending heavily on private agents, the building owners. This research took an interdisciplinary approach, making use of Environmental and Behavioral Economics in order to reveal the mechanisms that guide an individual’s decision making process, including “rational” economic motivations (such as sanctions and subsidies) as well as “irrational” motivations, such as imitation of peers. Recognizing green roofs as versatile solutions, a multifaceted approach is taken to assess their suitability for inclusion into existing public policy; the approaches include urban climate, energy efficiency, air pollution, stormwater management, and biodiversity, each with a brief description of the theory and existing public policy, at several scales, from a global context to the Municipality of São Paulo. As a case study, the German environmental index BAF (biotope area factor) is applied to one block in different development typologies in Sao Paulo. It is concluded that the index could be an important tool for fostering not only green roofs, but many other pulverized environmental solutions, thanks to its flexibility and ease of implementation. For even better results, there is the possibility of carefully adjusting the BAF index to Sao Paulo’s reality.

Keywords: green roofs, São Paulo, sustainable architecture, landscape architecture, urban planning

Lista de Figuras

Fig. 1	Glaumbær, exemplo de arquitetura de turfa da Islândia.	37
Fig. 2	Vista do terraço das casas La Roche e Jeanneret.	40
Fig. 3	Comparação entre solo natural, teto verde e vaso.	47
Fig. 4	Disponibilidade de água no solo.	66
Fig. 5	Orquídea (<i>Cephalanthera damasonium</i>) mutante albina (sem pigmentos) comparada à equivalente normal.	135
Fig. 6	Absorção, refletância e transmissão em diversas camadas foliares.	136
Fig. 7	Comparação de temperaturas de revestimento preto convencional (3,4) e um refletor de NIR (1,2).	137
Fig. 8	“Fluxo de calor por um teto vegetado”	159
Fig. 9	Exemplo de diferentes métodos de se atingir um BFF de 0,3.	242

Lista de Tabelas

Tabela 1:	Componentes para tetos verdes intensivos	68
Tabela 2:	Componentes para tetos verdes extensivos	68
Tabela 3:	Cargas para terraços	72
Tabela 4:	Propriedades radiativas de materiais artificiais e naturais.	140
Tabela 5:	Consumo predial por setor em 2010.	162
Tabela 6:	Descrição e peso de cada tipo de superfície.	240
Tabela 7:	Diagnóstico Bom Retiro	244
Tabela 8:	Diagnóstico Moema	246
Tabela 9:	Diagnóstico Jurubatuba	248
Tabela 10:	Valores de CTC para diversos materiais	288

Lista de Mapas

Mapa 1	Foto aérea Bom Retiro.	245
Mapa 2	Ocupação Bom Retiro.	245
Mapa 4	Coberturas Bom Retiro.	245
Mapa 3	Áreas ecologicamente efetivas Bom Retiro.	245
Mapa 5	Foto aérea Moema.	247
Mapa 7	Ocupação Moema.	247
Mapa 6	Coberturas Moema.	247
Mapa 8	Áreas ecologicamente efetivas Moema.	247
Mapa 9	Foto aérea Jurubatuba.	249
Mapa 11	Ocupação Jurubatuba.	249
Mapa 10	Coberturas Jurubatuba.	249
Mapa 12	Áreas ecologicamente efetivas Jurubatuba.	249
Mapa 13	Unidades climáticas naturais.	297
Mapa 14	Unidade Climática Urbana Central (I)	298
Mapa 15	Unidade Climática Urbana IA - Núcleo	299
Mapa 16	Unidade Climática Urbana IB - Marginais	302
Mapa 17	Unidade Climática Urbana IC - Caminho do Mar	304
Mapa 18	Unidade Climática Urbana ID - Além Pinheiros	305
Mapa 19	Unidade Climática Urbana IE - Santo Amaro	306
Mapa 20	Unidade Climática Urbana IF - Além Tamanduateí	307
Mapa 21	Unidade Climática Urbana IG - Além Tietê	308
Mapa 22	Mapa de temperatura aparente da superfície.	311
Mapa 23	Cobertura vegetal.	313

Mapa 24	Unidades Climáticas Naturais.	314
Mapa 25	Unidades Climáticas Urbanas.	316
Mapa 26	Verticalização.	318
Mapa 27	Espaços livres	319
Mapa 28	Cobertura vegetal (m ²) por habitante por distrito - 1999	320

Lista de Gráficos

Gráfico 1	Custo–benefício dos tetos verdes.	88
Gráfico 2	Diagrama esquemático do percurso energético até sua dissipação.	170

Abreviaturas

°C	graus Celsius
ABCD	Santo André, São Bernardo do Campo, São Caetano do Sul e Diadema
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEE	área ecologicamente efetiva
Al	alumínio
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
APA	Área de Proteção Ambiental
ATP	adenosina tri-fosfato
BFF	<i>Biotopflächenfaktor</i> , “fator de área biotópica”
BMP	<i>best management practices</i> , “melhores práticas de gerenciamento”
C	carbono
CC	capacidade de campo
CDB	Convenção Sobre Diversidade Biológica
CESAD	Seção de Produção de Bases Digitais para Arquitetura e Urbanismo, antigo Centro de Coleta, Sistematização, Armazenamento e Fornecimento de Dados
CETESB	Companhia (Cia) Ambiental do Estado de São Paulo
Cf.	confira
CNUMAD	Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento
CO	monóxido de carbono
CO₂	dióxido de carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONMETRO	Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
CONPET	Programa Nacional da Racionalização do uso dos Derivados de Petróleo
COV	compostos orgânicos voláteis
CTC	capacidade de troca de cátions

DAP	diâmetro à altura do peito
DPAA	Divisão Técnica de Proteção e Avaliação Ambiental (Município de São Paulo)
e.g.	<i>exempli gratia</i> , “por exemplo”
EFVM	<i>electric field vector mapping</i> , “mapeamento vetorial de campo elétrico”
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i> , “Agência de Proteção Ambiental” (EUA)
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
FLL	<i>Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V.</i> , “Sociedade de Pesquisa para Desenvolvimento e Construção Paisagística”
GEFAE	Grupo de Estudos sobre Fontes Alternativas de Energia
GLP	gás liquefeito de petróleo
H	hidrogênio
H₂O	água
HC	hidrocarboneto
HAP	hidrocarbonetos aromáticos policíclicos
i.e.	<i>id est</i> , “ou seja”
IAF	índice de área foliar
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IPTU	Imposto sobre Propriedade Predial e Territorial Urbana (municipal)
IR	Imposto de Renda (federal)
ISO	<i>International Standards Organization</i> , “Organização Internacional de Padronização”
K	potássio
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>
meq/100 g	moles de hidrogênio equivalente por massa
Mg	magnésio

MME	Ministério de Minas e Energia
MP	material particulado
N₂	gás nitrogênio
Na	sódio
NBR	denominação de norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas
NIR	<i>near infra-red</i> , “infra-vermelho próximo”
NO_x	óxidos de nitrogênio
NPDES	<i>National Pollutant Discharge Elimination System</i> , “Sistema Nacional de Eliminação de Descarte de Poluentes”
NURP	<i>Nationwide Urban Runoff Program</i> , “Programa Nacional de Escoamento Urbano”
O₃	ozônio
OMS	Organização Mundial de Saúde
PAR	<i>photosynthetically active radiation</i> , “radiação fotossinteticamente ativa”
PCM	<i>phase change material</i> , “material de mudança de fase”
PDM	Etileno Propileno Dieno tipo M ASTM
PEP	<i>PhosphoEnolPyruvate carboxylase</i> , “fosfoenolpiruvato carboxilase”
pH	potencial de hidrogênio
PMP	ponto de murcha permanente
PNSB	Plano Nacional de Saneamento Básico
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PVC	policloreto de polivinila
R\$	real
REM	Radiação eletromagnética
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
rubisco	ribulose-bisfosfato carboxilase oxigenase
SEHAB	Secretaria de Habitação do Município de São Paulo
SO₂	dióxido de enxofre
sp.	espécie

spp.	<i>species pluralis</i>
SPRI	<i>Single Ply Roofing Industry</i> (EUA)
SRHU	Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano
SUDS	<i>Sustainable Urban Drainage Systems</i> , sistemas de drenagem urbana sustentáveis
SUV	<i>sport utility vehicle</i>
SVMA	Secretaria do Verde e Meio Ambiente do Município de São Paulo
TCA	Termo de Compensação Ambiental
TWh	terawatt-hora
US\$	dólar americano
USGBC	<i>United States Green Building Council</i> , Conselho da Construção Verde dos EUA
USP	Universidade de São Paulo
UV	ultra-violeta
VIS	visível

Sumário

Resumo	11
Abstract	13
Abreviaturas	19
Introdução	27
Materiais e métodos	31
Estrutura dos capítulos	33
Capítulo 1 – Os precedentes históricos: proto-tetos verdes.	36
1.1 Construção vernácula: coberturas de turfa	36
1.2 Imaginário estético: terraços-jardins	39
1.3 A encarnação moderna: tetos verdes	41
1.4 Direções atuais	42
Capítulo 2 – Base técnica	46
2.1 Imitando o solo como um grande vaso	46
2.2 Classificação	47
2.3 Laje ou cobertura.	48
2.4 Impermeabilização	50
2.5 Drenagem	54
2.5.1 <i>Caídas</i>	56
2.5.2 <i>Saídas</i>	56
2.5.3 <i>Outras funções da camada de drenagem</i>	57
2.6 Proteção contra raízes	57
2.7 Armazenagem de água	58
2.8 Camada de filtragem	59
2.9 Meio de cultura	60
2.9.1 <i>Propriedades dos solos</i>	60
2.10 Plantas	71
2.11 Exigências construtivas.	72
2.11.1 <i>Carga</i>	72
2.11.2 <i>Vento</i>	74
2.11.3 <i>Incêndio</i>	75
2.11.4 <i>Construção</i>	75
2.11.5 <i>Acesso</i>	76
2.11.6 <i>Custo</i>	76
2.11.7 <i>Manutenção</i>	77
2.12 Funções adicionais	79
2.12.1 <i>Fotovoltaico</i>	79
2.12.2 <i>Aquecimento solar</i>	79
2.12.3 <i>Aproveitamento de chuva</i>	80
Capítulo 3 – Base socioeconômica	81
3.1 Motivações econômicas	84
3.1.1 <i>Benefícios individuais: custo-benefício</i>	84
3.1.2 <i>O impacto coletivo: externalidades</i>	91
3.1.3 <i>Soluções normativas: command-and-control</i>	95
3.1.4 <i>Fiscaliza-se o dano ou a tecnologia?</i>	97

3.1.5 Regulamentos normativos relacionados a tetos verdes	102
3.1.6 Soluções mercadológicas: taxas e subsídios	103
Subsídio direto: pagamento	103
Subsídio indireto: descontos em impostos	104
3.1.7 Taxa corretiva	108
3.1.8 Valoração e análise custo-benefício em políticas públicas	113
3.1.9 Mercado de permissões	114
3.1.10 Soluções para externalidades das ocupações no contexto urbano	115
3.2 Motivações morais e sociais	119
3.3 Incentivo negativo ou positivo?	122
3.4 Exigências legais sobre edificações no Brasil	125
Capítulo 4 – Economia de Energia	130
4.1 Comportamento térmico de tetos verdes	132
4.1.1 Forçante radiativa	133
4.1.2 Calor latente.	143
4.1.3 A fotossíntese	145
4.1.4 Convecção	147
4.1.5 Condução.	149
4.1.6 Conclusão acerca do comportamento térmico de coberturas verdes	156
4.2 Políticas de Economia de Energia	160
4.2.1 Brasil	160
Capítulo 5 – Clima urbano	168
5.1 Aquecimento urbano	168
5.1.1 Tetos Verdes	174
5.2 Políticas de Clima urbano	176
5.2.1 Mundo.	176
5.2.2 Chicago	176
5.2.3 Brasil	177
5.2.4 São Paulo.	178
Capítulo 6 – Poluição atmosférica	179
6.2.1 Tipos de poluentes	179
6.2.2 Sequestro de carbono	184
6.1 Políticas de Controle da Poluição Atmosférica.	189
6.1.1 EUA	189
6.1.2 Brasil	189
6.1.3 Estado de São Paulo	191
6.1.4 RMSP	191
Capítulo 7 – Manejo de Águas Pluviais	194
7.1 Comportamento hídrico das coberturas verdes	194
7.1.1 Curto prazo	194
7.1.2 Médio Prazo	199
7.1.3 Poluição hídrica	204
7.2 Políticas de Manejo de Águas Pluviais	206
7.2.1 Tarifas independentes de saneamento (split wastewater fees)	207
7.2.2 EUA	209
7.2.3 Brasil	212
São Paulo - Lei Municipal nº 13.276, 04 de janeiro de 2002	217

<i>Mauá – Lei Municipal nº 3528 de 29 de outubro de 2002</i>	<i>218</i>
<i>São Paulo - Lei estadual n.º 12.526, de 2 de janeiro de 2007</i>	<i>218</i>
<i>Curitiba - Decreto Nº. 791</i>	<i>219</i>
<i>Análise das leis de “piscininhas”</i>	<i>219</i>
Capítulo 8 – Biodiversidade e áreas verdes.	220
8.2.1 Tetos verdes na Ecologia da Paisagem	225
8.1 Políticas de biodiversidade	228
8.1.1 Mundo.	228
8.1.2 Alemanha	228
8.1.3 Suíça	229
8.1.4 Brasil	231
8.1.5 São Paulo.	231
Capítulo 9 – Aplicação.	238
9.1 Biotopflächenfaktor.	238
9.1.1 Definição do BFF-alvo	241
9.1.2 Cálculo	241
9.2 Bom Retiro	244
9.3 Moema	246
9.4 Jurubatuba	248
Capítulo 10 – Análise de resultados.	250
10.1 São Paulo: potencialidades e limitações.	252
Capítulo 11 – Conclusão	261
Referências Bibliográficas	265
Apêndice A - Impermeabilizações	282
Apêndice B - Conceito do cálculo da carga de sistemas de tetos verdes	284
Apêndice C - Capacidade de troca de cátions (CTC)	287
Apêndice D - Irracionalidades	289
Apêndice E - O clima da Região Metropolitana de São Paulo	294
<i>Unidades Climáticas Naturais</i>	<i>295</i>
<i>Unidades Climáticas Urbanas</i>	<i>298</i>
Anexo A - Mapas	313
Anexo B - BFF (Biotopflächenfaktor)	321
Anexo C - Leis de incentivo a tetos verdes.	325
<i>Projeto de lei Nº 4887 de 2009 (Federal do Brasil)</i>	<i>325</i>
<i>Lei nº 14.243, de 11 de dezembro de 2007 (Estado de Santa Catarina)</i>	<i>330</i>
<i>Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano Ambiental de Porto Alegre (2011)</i>	<i>332</i>
<i>Projeto de lei 01-0622/2008 do Vereador Natalini (PSDB) (Município de São Paulo)</i>	<i>335</i>
<i>Proposição nº 005.00139.2009 (Município de Curitiba)</i>	<i>339</i>
<i>Projeto de lei 116/09 (Município de São Paulo)</i>	<i>345</i>

Introdução

Em nosso cotidiano, a vegetação não passa de um pano de fundo. Árvores, quintais e gramados são invisíveis na correria do dia a dia.

As plantas, porém, escondem um passado tumultuoso, com um papel que moldou a vida no planeta desde os tempos ancestrais.

Foram as algas que saturaram a atmosfera com o antes ausente oxigênio, causando extinções em massa. A catástrofe teve um lado positivo: o oxigênio gerou um escudo de ozônio, que permitiu a colonização dos antes inóspitos continentes.

Foram as plantas que primeiro ousaram viver no seco, lentamente desgastando as rochas e formando o solo, um dos ecossistemas mais ricos e importantes da Terra hoje em dia, e que passariam a aproveitar para chegar a tamanhos impensáveis.

Foram elas, também, que alteraram os climas ao redor do globo, trazendo chuvas abundantes onde antes havia desertos.

Mais recentemente, a coleta de frutas e raízes pelos primeiros seres humanos podia ser tão arriscada quanto a caça de mamutes — longe de inofensivas, plantas ceifam as vidas de forrageiros incautos. A domesticação de algumas espécies permitiu o surgimento da agricultura, e, com ela, as cidades, com todos seus benefícios e tragédias, riquezas e injustiças. A madeira era usada em fogueiras, construções e máquinas, alimentando a ambição humana — seu esgotamento descuidado anunciou o fim de diversas civilizações.

Hoje em dia, justamente as descendentes destas máquinas permitiram uma menor população rural, antes necessária para a trabalhosa agricultura; em paralelo, a abundância alimentar colocou a população mundial na casa dos bilhões.

Com a população urbana ultrapassando do campo, perdeu-se a percepção de nossa dependência desse reino. O fenômeno é recente o suficiente

para que ainda haja uma vilificação do vegetal como algo do qual se esperava distanciar-se desesperadamente. Porém, percebe-se agora que a aridez urbana traz consequências graves para a vida da população, com inundações, calor e poluição.

São as plantas que agora nos oferecem uma saída. Elas estão prontas para deixar de serem pano de fundo e virarem protagonistas.

Devido à mecanização da agricultura e menor demanda de mão de obra, a população das cidades é maior que a do campo — a cidade tornou-se o *de facto* hábitat humano. Porém, o rápido crescimento dos aglomerados nos países em desenvolvimento trouxe uma série de problemas sociais, econômicos e ambientais.

A maior característica ambiental da cidade do “terceiro mundo” é a falta de vegetação devido ao crescimento desordenado e pressão habitacional, que faz com que se ocupem as áreas potencialmente verdes. Essa desertificação do meio urbano traz consequências desastrosas especialmente às classes mais pobres, que têm que arcar com o calor urbano, as inundações e a poluição.

Busca-se atualmente um modelo urbanístico que consiga conciliar as contradições entre o social e o ambiental, e entre o econômico e o ecológico. Ele passa por soluções que incluem a revitalização de áreas abandonadas, o adensamento consciente, o incentivo ao transporte público, e, finalmente, a inclusão de vegetação no meio urbano.

Convencionalmente, essa vegetação se traduz na arborização viária, além de manchas diversas no formato de parques, praças e rotatórias e canteiros (frequentemente os as únicas “áreas verdes” de algumas regiões).

As árvores têm ainda de enfrentar condições desfavoráveis ao crescimento, sendo o maior empecilho o “solo urbano”, tão esquecido que a expressão significa outra coisa inteiramente. Esse solo, longe de ser o ecossistema rico e ativo encontrado na natureza, é compactado ao extremo pelo peso da pavimen-

tação, que também corta o vital contato com o ar e a água. As raízes atrofiam, e a árvore cresce pouco, ou mesmo tomba com a menor das tempestades, levando consigo seus eternos inimigos: a fiação aérea.

Mesmo a vegetação “privada” — quintais e jardins — sofrem impermeabilização quase tão grave quanto fora dos muros. A aversão ao “mato” e a ênfase dada aos seus inconvenientes, como queda de folhas, têm transformado os tradicionais quintais em pátios pavimentados — em vez de grama, têm-se ralos, que vivem entupindo com as indesejadas folhas.

Mesmo em condomínios fechados, onde o jardim (frontal apenas) é símbolo de *status*, aparado semanalmente, as residências ocupam quase todo o terreno. O pouco gramado que resta, por mais que pareça “verde”, o é apenas em cor, já que depende de adubação química e maquinário altamente poluente para que permaneçam impecáveis. A planta mais cultivada nos EUA não é o milho — é justamente a grama. Apenas o gotejamento de gasolina das máquinas de cortar do país equivalem a um vazamento de petróleo igual ao Exxon Valdez por ano (EPA, [2004?]).

Se verde nem sempre é sustentável, o árido o é menos ainda. Longe dos olhos, existe uma vastidão inerte de lajes e telhas. Mais que apenas abrigos, as edificações também transformam o clima urbano. Que irônico não é que as próprias coberturas causem tempestades? Que os próprios sombreadores causem aquecimento e desconforto? E que aquilo que nos deixa secos justamente gere inundações?

Revela-se, porém, um tímido esverdeamento desses locais. Adaptadas aos mais diversos ambientes, algumas plantas crescem espontaneamente em um mínimo de poeira acumulada. Essa vocação quase natural de qualquer superfície se tornar um ecossistema é aproveitado com os chamados “tetos verdes”, “telhados vivos”, “coberturas verdes” e uma infinidade de outros nomes. A impermeabilização concilia as necessidades construtivas com as biológicas — o que nos abriga de cima, abriga as plantas de baixo.

As cidades brasileiras se beneficiariam enormemente da tecnologia. Porém, a adoção em massa enfrenta inúmeros desafios técnicos, sociais e econômicos.

A pesquisa sobre a tecnologia ainda encontra-se em estado inicial no país. De todos os trabalhos publicados no mundo, menos que 2% são do Brasil,¹ e mesmo estes fogem das práticas internacionais estabelecidas, utilizando terra vegetal e gramíneas em vez dos consagrados substratos preparados e plantas suculentas. Por mais que seja importante o desenvolvimento de tecnologias próprias adequadas à nossa realidade socioeconômica, técnica e ambiental, não se deve esquecer as décadas de experiências de outros países.

Está aí um paradoxo constante no assunto: adaptar ou inventar? Do mesmo modo que as questões técnicas, também as sociais são passíveis das duas opções. Existem práticas da política pública que são bem estabelecidas na Economia Ambiental, mas que são subutilizadas no Brasil. Como exemplo, as soluções mercadológicas, como subsídios e taxas, são esquecidas em favor de soluções normativas, obrigatórias, eco talvez da tradição jurídica brasileira. Esse quadro, porém, parece estar em processo de reversão, dado o uso amplo do “IPTU verde” por diversas municipalidades por todo o país, desconto no imposto em troca da redução do impacto ambiental da edificação, que também segue a tendência internacional é a flexibilização das soluções, favorecendo índices com pesos e liberdade de escolha, em vez de tecnologias específicas.

1 “A distribuição de publicações entre os países é desequilibrada, com os EUA e a Europa conduzindo 66% da pesquisa, e, portanto, a alocação de esforço de pesquisa é focado nesses continentes e predominantemente em ecossistemas temperados. Tem havido, porém, um intenso aumento no número de países que conduzem pesquisa sobre tetos verdes.”

“The distribution of publications between countries has been skewed, with the USA and the EU conducting 66% of the research, and thus allocation of research effort is focused in those continents and predominantly in temperate ecosystems. However, there has been a sharp increase in the number of countries that conduct green roof research.” (BLANK et al. 2013, tradução nossa).

Materiais e métodos

O trabalho tem como objetivo abordar a questão de incentivos a tetos verdes dos pontos de vista social (Economia e legislação) e ambiental (ecologia, clima e hidrologia), com aplicação de ferramenta urbanística alemã mais sofisticada que índices existentes no Brasil como objeto.

Busca-se compreender algumas barreiras e potencialidades dos tetos verdes, com o estudo de caso da cidade de São Paulo. Faz-se um apanhado geral de questões técnicas amplamente estudadas no exterior, aproveitando-se do maior desenvolvimento da tecnologia na Europa e nos EUA. Essa etapa descreve brevemente algumas camadas existentes nos sistemas de cobertura verde por pesquisa bibliográfica.

A seguir, aprofunda-se em questões socioeconômicas relacionadas à motivação individual, vital para a colocação de tetos verdes em propriedade privada. Através de conceitos consagrados da Economia, alcançam-se ideias das mais recentes Economia Ambiental, base da política pública ambiental mundial, e Economia Comportamental (*Behaviorial Economics*), campo que tenta ajustar algumas suposições de modelos econômicos clássicos através de experimentos e conceitos psicossociais. Entra-se inevitavelmente em alguns conceitos do próprio Direito Ambiental, campo-irmão da Economia Ambiental. Essa etapa também se deu por pesquisa bibliográfica.

A segunda parte do trabalho se refere a diferentes abordagens ambientais. Escolheram-se alguns benefícios (individuais e coletivos) como potenciais bases para políticas de incentivo a tetos verdes. São eles: a economia de energia, o clima urbano, o manejo de águas pluviais, a poluição atmosférica e hídrica e a biodiversidade.

Em cada um dos capítulos, é apresentada uma conceituação teórica breve, com base em pesquisa bibliográfica, com o intuito de esclarecer e corrigir algumas informações que o leitor possa ter. A seguir, faz-se a ligação com os

tetos verdes, buscando na literatura especializada a eficácia da tecnologia para o problema em questão. Finalmente, exploram-se algumas políticas públicas mundiais e locais, com seus devidos contextos.

Finalmente, testa-se o índice alemão BFF (*Biotopflächenfaktor*, fator de superfícies ecológicas) em algumas áreas da cidade, reconhecendo a escolha individual e a flexibilidade como importantes aspectos de uma política pública urbana efetiva. O índice foi usado por este trabalho por ter sido bem sucedido em Berlim, e serviu de modelo a diversos outros a redor do mundo, com destaque em Seattle (EUA). Ele foi criado para áreas já ocupadas, e incorpora maior gradação ao tradicional sistema permeável-impermeável (respectivamente 1,0 e 0,0), reconhecendo soluções “intermediárias” como tetos (0,7) e paredes verdes (0,5), pavimentos semipermeáveis (0,5), captação de água (0,2) etc. Estabelece-se um BFF-alvo para diferentes zoneamentos, tipicamente 0,6 para áreas residenciais, e 0,3 para outras, similar à taxa de impermeabilização máxima usada no Brasil.

Foram escolhidos três bairros que exemplificam tipologias da urbanização da cidade de São Paulo:

- mista-consolidada: Bom Retiro;
- residencial: Moema;
- industrial: Jurubatuba.

Primeiramente, houve a identificação visual dos materiais de cobertura. Dada a impossibilidade de se analisar todas as coberturas presentes na cidade ou mesmo em um bairro, foi determinada uma área de amostragem. Inicialmente, escolheu-se um quadrado de 500 m × 500 m (250.000 m²), para que o tamanho da quadra em cada bairro não influenciasse na amostragem. Dada a dificuldades práticas de se analisar todas as coberturas dessa área, por não ser automatizado, descartou-se este método.

Por fim, escolheu-se selecionar uma quadra típica por bairro, verificando sua taxa de ocupação média e seu grau de “eficiência ecológica” (i.e. porcen-

tagem de áreas verdes, áreas drenantes, coberturas verdes etc.) determinado pelo índice BFF, além do reconhecimento visual do tipo de cobertura. Para isso, utilizou-se o software AutoCAD Map 3D 2012, com dados fornecidos pelo CESAD² e fotos aéreas do software Google Earth. Aplica-se um BFF-alvo de 0,3 (Bom Retiro e Jurubatuba) e 0,6 (Moema) para verificação da possibilidade de atingi-lo por meio de três tecnologias escolhidas por serem facilmente incorporáveis: *tetos verdes*, *captação de água* e *pavimentos semipermeáveis*.

Estrutura dos capítulos

Capítulo 1 – Os precedentes históricos: proto-tetos verdes (pág. 36):

breve apanhado histórico, desde soluções vernáculas a criações arquitetônicas.

Parte I - Base técnica e social

Para compreender a possibilidade de incentivos a tetos verdes, é necessário antes entender as potencialidades e limitações técnicas da tecnologia — afinal, a primeira pergunta a ser respondida é: *é mesmo possível a colocação de vegetação sobre coberturas?* A seguir, responde-se à segunda pergunta: *é possível fazer com que coloquem* essa vegetação sobre suas coberturas? Diferente da instalação de um parque, os tetos verdes dependem que inúmeros proprietários os escolham e arquem com seu os custos.

Portanto, a primeira parte do trabalho divide-se em:

Capítulo 2 – Base técnica (pág. 46): aqui são descritas as diversas funções das camadas componentes de coberturas verdes, com o objetivo de dar uma noção de sua viabilidade técnica, e mostrar a existência atual de inúmeros experimentos, aplicações, normas e tecnologias, enfatizando a maturidade técnica do campo.

Capítulo 3 – Base socioeconômica (pág. 81): o envolvimento do agente privado traz consigo inúmeros desafios que envolvem seu convenci-

2 Seção de Produção de Bases Digitais para Arquitetura e Urbanismo, antigo Centro de Coleta, Sistematização, Armazenamento e Fornecimento de Dados

mento. Neste capítulo, busca-se mostrar um pouco do vasto campo de pesquisa no assunto, e como ele se relaciona aos tetos verdes, através tanto de conceitos econômicos consagrados, como também de outros na vanguarda da pesquisa comportamental.

Parte II - Abordagens Ambientais

Os tetos verdes são uma solução polivalente para mitigação de danos ambientais. Apenas o fato de se substituírem superfícies inertes altamente expostas à chuva e sol por superfícies vivas já é capaz de oferecer benefícios enormes às cidades. Afinal, é possível quebrar pavimentos para a colocação de árvores e parques; as edificações, porém, mantêm-se como bastiões inatingíveis para o esverdeamento urbano.

A presença de um meio de cultura que emule o solo (mesmo que uma fina camada), além da vegetação, pode ser comparada aos primeiros efeitos da erosão e do intemperismo que transformam afloramentos rochosos inertes em ambientes minimamente vivos, o primeiro passo para a colonização futura por maciços vegetais e possível alteração do clima.

Assim, os efeitos moderadores dos tetos verdes foram divididos em cinco abordagens ambientais distintas:

Capítulo 4 – Economia de Energia (pág. 130): por evitar ganhos térmicos pela cobertura através de múltiplos mecanismos que envolvem todos os meios de dissipação e transmissão de calor, os tetos verdes podem diminuir o uso de condicionamento artificial, que sobrecarrega a rede de fornecimento elétrico.

Capítulo 5 – Clima urbano (pág. 168): fenômeno relacionado à economia de energia; alguns efeitos térmicos que a vegetação e o meio de cultura oferecem ao ambiente interno são oferecidos ao exterior, o que mitiga o aquecimento urbano anormal.

Capítulo 6 – Poluição atmosférica (pág. 179): a grande superfície oferecida pela vegetação pode reter diversos poluentes; será respondido se os tetos verdes seriam suficientes para uma redução significativa da poluição atmosférica, além de esclarecer a questão do sequestro de carbono, tão valorizada atualmente.

Capítulo 7 – Manejo de Águas Pluviais (pág. 194): o maior motivador da instalação em massa dos tetos verdes nos últimos anos. Mesmo não sendo uma permeabilização em si, a presença principalmente do meio de cultura serve para redução dos picos de vazão, seu retardo, a captura de poluentes hídricos e maior evapotranspiração em áreas antes consideradas “irreparáveis”.

Capítulo 8 – Biodiversidade e áreas verdes (pág. 220): como vegetação pulverizada, assemelha-se a matrizes ecológicas diluídas na malha urbana, em oposição à arborização viária (linear) e aos parques (manchas concentradas). Isso enfatiza a função de conectores, trampolins ou refúgios para diversas espécies, especialmente avifauna. Porém, as diretrizes construtivas para tetos verdes biodiversos se opõem a várias indicações técnicas de carga e drenagem.

Capítulo 9 – Aplicação (pág. 238): apresenta-se o índice BFF e escolhem-se três tipologias de ocupação de São Paulo, analisando uma quadra aleatória representativa através de dados cartográficos, análise de dados cadastrais, e verificação visual através de fotos aéreas.

Capítulo 10 – Análise de resultados (pág. 250): Análise dos resultados obtidos no capítulo anterior, juntamente com reflexão sobre barreiras e potencialidades de São Paulo.

Capítulo 11 – Conclusão (pág. 261): faz uma síntese das questões mais importantes de cada capítulo, refletindo sobre a aplicabilidade e incentivos de tetos verdes em São Paulo.

Capítulo 1 – Os precedentes históricos: proto-tetos verdes

1.1 Construção vernácula: coberturas de turfa

As evidências de vegetação em edificações alcançam tempos primórdios. Na Tanzânia, lama era colocada nas coberturas para manter as edificações frias (WERTHMANN, 2008). Na Islândia, a escassez de madeira obrigava o uso de turfa para a construção das coberturas, sendo as raras toras encontradas à deriva utilizadas apenas para os pilares básicos da construção, ou no ocasional forro. As condições climáticas da ilha facilitavam a sobrevivência dos vegetais, que eram adubados e podados anualmente:

As camadas externas da cobertura geralmente consistem em duas camadas de turfa colocadas uma sobre a outra. As águas são compostas por turfás triangulares ou quadradas com juntas diagonais, ou faixas retangulares com juntas verticais. O lado da vegetação fica para cima; o lado da vegetação da camada inferior dá para baixo. **A ideia é que as camadas de turfa cresçam para dentro uma da outra e criem uma camada impermeável.** Os tetos eram adubados e aparados anualmente. Uma boa cobertura pode durar 20–30 anos.³

3 (cont.) “A grama da cobertura cresce sobre as paredes externas, que as tornam impermeáveis. Entre dois telhados de duas águas fica um regato que permite a drenagem de água. De modo a proteger a camada inferior de madeira contra umidade, uma camada impermeável era colocada. Essa camada consiste de gravetos ou casca de bétula, lajotas de pedra, ou camada de esterco seco, arbustos de charneca, musgo seco de pedra, juncos, estorno, que forma uma cavidade. Como essa camada se encontra quase sempre muito úmida, uma camada de piche ou alcatrão era aplicada sobre a cofragem de madeira. Em tempos antigos, até mesmo couro de gado ou cavalo era usado para selar o teto.”

“The outer layer of the roof generally consists of two layers of sods placed over one another. The roof planes are composed of triangular or square sods with diagonal joints, or of rectangular strips with vertical joints. The vegetation side is facing up. The vegetation side of the lower layer faces indoors. The layers of sods are supposed to grow into each other and form a watertight layer. The roofs were fertilised and mown on an annual basis. A good roof can last for 20–30 years. The grass of the roof grows on top of the outer walls, which makes them watertight. In between two gabled roofs is a rill to allow drainage of water. In order to protect the wooden lower layer of the roof against moisture, a watertight layer is put in place. This layer consists of birch twigs or birch bark, flagstones, or a layer of dried dung, shrub heath, dry rock moss, reed, rush, marram, or sedge, which forms a cavity. Since this layer is often very humid, a layer of tar or pitch was applied onto the wooden form-work. In the old days, even cattle and horse skins were used to seal off the roof.” (VAN HOOFF; VAN DIJKEN, 2008, p. 1027, tradução nossa, grifo nosso).

É difícil afirmar se o crescimento da vegetação sobre as coberturas era proposital ou meramente inevitável, já que “a escolha distinta de materiais construtivos frequentemente tinha origem na pobreza e falta de materiais construtivos adequados, como madeira.”⁴ Mesmo sua contribuição para as condições ambientais internas é um tanto questionável, já que a falta de ventilação e a queima para cozimento tornava os locais insalubres pelos padrões atuais, mesmo com certa absorção de poluentes pelo material.

Tempos modernos significaram uma mudança radical nas condições de moradia e higiene. As pessoas mudaram de suas habitações de turfa para casas unifamiliares, a densidade de ocupantes diminuiu, e a maior parte de fontes “históricas” de poluição atmosférica interna desapareceu.⁵

Fig. 1 Glaumbær, exemplo de arquitetura de turfa da Islândia.
Fonte: Van Hoof, van Dijken (2008)

⁴ “The distinct choice of building materials often had its origin in poverty and the lack of suitable building materials as wood” (VAN HOOFF; VAN DIJKEN, 2008, p. 1028, tradução nossa).

⁵ “Modern times meant a radical change in living conditions and hygiene. People changed their turf dwellings for single-family houses, occupant density decreased, and most sources of ‘historical’ indoor air pollution disappeared” (VAN HOOFF, VAN DIJKEN, 2008, p. 1029, tradução nossa).

O exemplo mostra que a autoconsciência vernácula deve ser encarada com cautela — uma postura romântica em relação às técnicas antigas, moldadas por condições técnicas muitas vezes precárias (e.g. escassez de madeira) ou primitivas e pelo desconhecimento de fatores de salubridade, pode esconder sua falibilidade. Ao mesmo tempo, uma postura demasiado progressista tende a ignorar os acertos conseguidos por séculos de tentativa e erro: “Hoje em dia, a turfa ainda é um material usado em arquitetura sustentável e verde. Suas qualidades térmicas são exploradas com frequência no esverdeamento de coberturas”.⁶

Mesmo assim, vale ter em mente que a cobertura de turfa consistia de camadas de grama entrelaçadas em um solo altamente orgânico, em um clima favorável, de alta precipitação e temperaturas relativamente amenas, que difere dos tetos verdes atuais.

Pode-se afirmar também que (além dos construtores) há mérito das próprias plantas por se adaptarem a condições especiais. Por exemplo, a espécie *Sempervivum tectorum*, batizada pelo biólogo sueco Carl von Lineé,⁷ é uma de muitas que devem seu nome ao fato de habitar espontaneamente os tetos (KÖHLER, 2005). O Coliseu de Roma, construído no século I, foi palco de espetáculos até o século VI; após seu abandono, foi lentamente tomado por plantas exóticas, originárias de sementes trazidas de longe nos pelos e na alimentação dos animais. A colonização dos templos da Malásia por figueiras, ambigualmente destrutiva e conservadora, além dos onipresentes musgos em telhas de barro, ajudam a ilustrar o quadro. A vegetação está adaptada aos mais diversos ambientes, como encostas e afloramentos rochosos que construções

6 “Nowadays, turf is still a material used in sustainable and green architecture. Its thermal qualities are frequently exploited in green roofing.” (VAN HOOFF; VAN DIJKEN, 2008 p. 1029).

7 Pai da taxonomia moderna.

podem emular, mesmo acidentalmente.⁸ A colonização espontânea foi elemento chave do teto verde moderno, como será visto a seguir.

1.2 Imaginário estético: terraços-jardins

A ressonância estética do terraço-jardim pode ser traçada ao mito dos Jardins Suspensos da Babilônia.⁹ Em Roma, alguns mausoléus eram cobertos por morrotes arborizados; o Mausoléu de Adriano, construído entre 130 DC e 139 DC, foi mais tarde transformado em fortificação.¹⁰ Existe a eventual colocação de árvores e jardins sobre torres ou terraços na era medieval e Renascença, mas que podem ser considerados casos pontuais.¹¹

Em tempos mais modernos, o jardim elevado na casa de Samuel Haüsler em 1839 foi um meio de provar a eficácia da tecnologia de impermeabilização (MARTINEZ, 2005); já nos anos 1920, terraços jardins adornavam coberturas de grandes edifícios em Nova York, de função ostensiva e recreativa dado o caro *real estate* (NASCIMENTO et al, 2008). Todos são exemplos de opulência e extravagância, consumindo vastos recursos, mostrando que jardins suspensos eram luxos para poucos (COFFMAN, 2007), em contraste com os usos vernáculos parcimoniosos.

Com o avanço tecnológico, as coberturas planas (inspiradas por aquelas de climas desérticos, onde têm função utilitária de cozimento e secagem, além de recreação) passaram a ser admiradas por estrelas do movimento modernista, como Le Corbusier, que incluiu o *toit-terrasse* como um dos cinco pontos da nova arquitetura, formalizados em 1927, na Revista *L'Esprit Nouveau*: “o espaço

8 “Tetos verdes extensivos são caracterizados por substratos rasos e condições extremas de umidade do solo. Esse conjunto de características, ou ‘molde de habitat’, tem análogos naturais em ecossistemas rochosos estéreis como encostas, depósitos e pavimentos de calcário”.

“*Extensive green roof habitats are characterized by shallow substrates and extreme soil-moisture conditions. This set of characteristics, or ‘habitat template’, has natural analogs in rock barren ecosystems such as cliffs, scree slopes, and limestone pavements.*” (LUNDHOLM, 2004, p. 87, tradução nossa).

9 Não há evidências históricas de terem sido construídos.

10 Atualmente Castelo de Sant’Angelo.

11 Cf. Gatto (2012), que faz um apanhado detalhado do percurso histórico.

na cobertura é o mais distante do ruído da rua, completamente exposto à luz do sol e ao ar mais puro”.¹² O *toit-terrasse* acessível tinha função primordialmente recreativa; porém, o uso de vegetação como arbustos e rasteiras era considerado estratégico para a conservação da laje:

Para manter um nível consistente de umidade no terraço jardim e assim evitar que o concreto armado rachasse, Le Corbusier plantou flores, grama e arbustos nesse espaço.¹³

Ao mesmo tempo, ideias urbanísticas da primeira metade do século XX sugeriam o aproveitamento das coberturas, mas foram limitadas por questões estruturais e de impermeabilização.

Fig. 2 Vista do terraço das casas La Roche e Jeanneret.
Fonte: Fondation Le Corbusier, [200?]

12 “[...] the space on the roof is that the most distant from the noise of the street, fully exposed to the light of the sun and to the air the most pure.” (FONDATION LE CORBUSIER, [200?], p. 7, tradução nossa).

13 “So as to maintain a consistent level of humidity on the roof garden and thereby prevent the reinforced concrete from cracking, Le Corbusier planted flowers, grass and shrubs in this space.” (FONDATION LE CORBUSIER, [200?], p. 7, tradução nossa).

Esses “proto” tetos verdes indicam que o desejo de esverdear as coberturas é antigo, mas fogem da filosofia atual fundamentada em motivações ambientais frutos da concepção moderna de ecologia e sustentabilidade. É importante reconhecê-los como antecedentes históricos sem ligá-los necessariamente a práticas ambientais.

1.3 A encarnação moderna: tetos verdes

Longe da Islândia e Tanzânia, o movimento ao esverdeamento de coberturas como o conhecemos hoje têm como origem na Alemanha, com a descoberta feliz pelo pesquisador Reinhard Bornkamm da vegetação espontânea nascida sobre coberturas comuns aos *Mietkaserne*, cortiços cujas lajes planas foram impermeabilizadas com betume e papel, e então cobertas com areia para prevenção de incêndios. A catalogação de 50 coberturas remanescentes despertou o interesse de desenvolver de tecnologias que fomentassem propositalmente o nascimento das plantas, já que elas se provaram úteis na conservação das impermeabilizações (EARTH PLEDGE, 2005).

A crise do petróleo na década de 1970, aliada à maior confiança dos construtores com as novas tecnologias de impermeabilização, demonstrou que as coberturas verdes não eram apenas viáveis, como necessárias, anunciando o nascimento de uma indústria, com feiras comerciais focalizando suas vantagens ambientais, que serviram de “catalisadores para a sua popularidade”.¹⁴

Seguiu um período de intensa pesquisa tecnológica na aliança entre indústria e universidade, explorando aspectos técnicos relativos a meio de cultura, irrigação, drenagem etc., e desvendando demais serviços ambientais, como os climáticos. As diretrizes construtivas então desenvolvidas foram formalizadas pela Sociedade de Pesquisa para Desenvolvimento e Construção

14 “Ao longo da década de [19]70, feiras comerciais apresentaram detalhes da construção de coberturas verdes (feira comercial Deubau, em Essen, em 1973), focalizando as vantagens ambientais (National Garden Show, em Stuttgart, 1977), atuando como catalisadores para a sua popularidade.” (NASCIMENTO et al., 2008).

Paisagística¹⁵ em 1982, na publicação “Princípios para o esverdeamento de telhados”, estratégica para reforçar a confiança na tecnologia, abalada por empresas barateiras e falta de rigor.

Assim, por mais que houvesse antecedentes vernáculos ao redor do mundo e uma vontade histórica latente por parte de arquitetos e urbanistas, a atual construção civil exige critérios construtivos, de desempenho e econômicos apenas alcançados com enorme esforço de inúmeras partes ao longo de décadas. Aspectos exógenos, como a crise do petróleo, tiveram papel importante para empurrar a tecnologia; porém, sem um contexto já preparado por pesquisas iniciais e articulação entre setores industriais e de pesquisa, e uma vontade cultural, a tecnologia talvez não tivesse vencido o degrau inicial formada por desconfiança, cegueira técnica e falta de experiência, e se viabilizado.

1.4 Direções atuais

Como visto, o esverdeamento moderno surge por uma vontade cultural de retorno da vegetação aos centros urbanos, que permanece o cerne da tecnologia. Porém, o enfoque político e tecnológico de seu incentivo tem mudado constantemente. Inicialmente, despertou interesse pela longevidade da impermeabilização, desenvolvendo depois um apelo à biodiversidade e à estética. Com a crise do petróleo, rapidamente adotou-se um apelo energético — enxergou-se nas coberturas verdes um modo de economizar energia elétrica da matriz alemã altamente poluidora, com o simultâneo investimento em fontes alternativas, como a solar e eólica, ecoando iniciativas mundiais como o Proálcool. Após um amadurecimento prático e conceitual conseguido não menos por esse empurrão inesperado, passou-se a divulgar também os serviços climáticos, como a mitigação do aquecimento urbano. O paradigma atual é o aspecto hidrológico (que, em uma reviravolta, acaba enfatizando o

15 *Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau, FLL*, fundada em 1975.

meio de cultura como principal componente do sistema) — tetos verdes são considerados importantes ferramentas no manejo de águas pluviais. Há ainda tentativas de promovê-los como mitigadores de poluição.

Neste trabalho, serão explorados alguns destes aspectos separadamente.

Parte I - Base técnica e social

Capítulo 2 – Base técnica

Conceitualmente, um teto verde nada mais é que a colocação de vegetação sobre coberturas. Para tanto, o sistema deve cumprir funções tanto construtivas quanto biológicas. Há, porém, um componente delicado: a água. As coberturas têm a função construtiva de estanqueidade; já a vegetação necessita biologicamente de água para sobrevivência.

Neste capítulo será explorado o aspecto técnico dos tetos verdes: sua construção, camadas, e funções na edificação.

A intenção deste capítulo é mostrar que existem normas e diretrizes técnicas extensas na corpo técnico internacional, ilustrando alguns exemplos particularmente importantes; e tentar fazer uma ponte com as normas e técnicas brasileiras, com o objetivo de dispersar o medo do desconhecido que afeta essa nova tecnologia.

2.1 Imitando o solo como um grande vaso

A sobrevivência da vegetação sobre coberturas exige o cumprimento de certas exigências biológicas. Para isso, cabe analisar a estrutura de um solo natural, e como o sistema de teto verde deve emulá-lo.

Um solo é hidrologicamente composto por diversas camadas distintas:

- **zona de raízes**, de onde as plantas extraem a água;
- **camada de drenagem**, logo abaixo;
- **camada de capilaridade**, onde há uma curta ascensão da água;
- **camada saturada**, onde a água fica impedida de drenar por conta de uma camada impermeável, e onde ocorre o fluxo de base.

Um sistema de teto verde deve emular essas funções hidrológicas em uma espessura muito menor, exigindo, portanto, materiais específicos e eficientes.

- o meio de cultura cumpre a função da camada de raízes;
- a camada de drenagem é emulada por um filtro geotêxtil;

- a zona de capilaridade se transforma na camada de armazenamento de água;
- a laje impermeabilizada faz vezes do leito rochoso.

O mesmo sistema já é familiar na forma de vasos de plantas típico: terra (meio de cultura), geotêxtil (filtragen), argila expandida (drenagem) e prato (armazenagem). Um sistema de teto verde pode ser pensado então como um grande vaso no formato da cobertura; os sistemas modulares são ainda mais próximos da analogia, sendo compostos por “vasos” rasos e retangulares encaixados.

Fig. 3 Comparação entre solo natural, teto verde e vaso. Um teto verde (centro) procura emular as funções de um solo natural (esq.), do mesmo modo que um vaso (dir.). a: vegetação; b: zona de raízes/meio de cultura; c: zona de drenagem/geotêxtil; d: zona saturada/de capilaridade/armazenamento; e: leito rochoso/laje/prato

2.2 Classificação

Coberturas verdes são classificadas de modo similar às culturas agrícolas.

Usa-se o termo *intensivo* no caso de culturas com grande densidade produtiva de alta manutenção (irrigação, adubação, podas etc.). Em uma cultura agrícola ou pecuária, é associado a criações de gado confinado ou a grandes

monoculturas, enquanto em uma cobertura verde indica aquelas com profundo meio de cultura passível de ser plantado com arbustos e árvores, mas que exigem irrigação e outros cuidados, sendo muito similares a jardins no nível do solo.

Já as culturas *extensivas* são aquelas com menos controle, que exigem menos trabalho manual, com animais livres. A produtividade é mais baixa, porém são menos agressivas ao meio ambiente, confiando em ciclos naturais como parte de seu funcionamento. Em coberturas verdes, o termo se aplica àquelas coberturas com meio de cultura pouco espesso, com manutenção reduzida, providenciando um ambiente que confia da sobrevivência “independente” da vegetação. Do mesmo modo que as culturas, podem ser aplicadas a grandes extensões com preço reduzido, apesar de seus benefícios serem igualmente limitados.¹⁶

Diferentes autores estabelecem limites variados de carga para a classificação; porém, a extensividade ou intensividade de uma cobertura é relativamente fácil de se identificar, com extensivos lembrando “tapetes”.

A seguir, são descritas brevemente as camadas individuais mais comuns, de baixo para cima.

2.3 Laje ou cobertura

A maior exigência da cobertura é que consiga suportar estruturalmente o restante do sistema. Lajes podem ser feitas de concreto, madeira, plástico, gesso ou composto.

16 Em um ambiente natural, o fato de ele ser intensivamente produtivo indica uma maior exploração do meio, podendo resultar em maiores impactos ao meio ambiente, enquanto nas coberturas, por serem locais intrinsecamente artificiais, a presença de maior vegetação proporciona benefícios exponencialmente maiores. As semelhanças então basicamente em termos de investimentos iniciais e os contínuos, monetários e de trabalho, e a produtividade.

No Brasil, há grande difusão das lajes de concreto a partir da década de 1930.¹⁷ Existem, porém, limitações inerentes à colocação do material de maneira horizontal (SILVA, 2005, p. 18, grifo nosso):

As movimentações estruturais geradas por variações dimensionais e recalques diferenciais introduzem tensões na cobertura, provocando **fissuras e trincas** que comprometem a continuidade da superfície vedante. Além das trincas e fissuras, a laje de concreto é um elemento estrutural permeável devido à própria característica do concreto, não sendo considerada uma cobertura eficaz em relação a infiltrações de água. **Para que ocorra a estanquidade de águas é necessário que sobre a mesma seja executado um telhado ou um sistema de impermeabilização** adequado ao comportamento da estrutura.

Lajes sem telhados são ideais para conversão, sendo horizontais e provavelmente já possuindo impermeabilização.

Porém, ao contrário de países europeus, onde é tradição a colocação de lastros de brita para proteção mecânica da impermeabilização, aqui o hábito mais difundido é a colocação de telhas de fibrocimento com baixa inclinação e escondidas por platibandas, sem impermeabilização por membrana ou manta.

Além disso, as telhas cerâmicas e fibrocimento são extensamente utilizadas sem laje. Porém, seu uso deste modo traz consequências ao desempenho térmico das coberturas (NETO, 2009, p. 3):

Por uma questão financeira, os fechamentos opacos, como o telhado de uma residência, são compostos por elementos construtivos de baixa inércia térmica (devido principalmente à pequena espessura). Essa característica construtiva compromete o bom desempenho térmico por apresentar alta transmitância térmica, baixa capacidade térmica e baixo atraso térmico. Todas essas grandezas estão associadas às principais formas de propagação do calor: a convecção, a radiação e a condução.

17 “Considerando-se que a década de [19]30 é identificada como o tempo da propagação do concreto armado no Brasil, é possível avaliar o quanto é recente o uso das coberturas de concreto.” (SILVA, 2005, p. 8).

Existe a possibilidade de se colocar tetos verdes leves, modulares ou não, sobre a cobertura de telhas cerâmicas, caso não se deseje retirar as telhas cerâmicas. No caso da existência de laje, pode-se optar pela retirada das telhas.

No caso de telhas metálicas, assim como a cobertura cerâmica, deve-se utilizar coberturas verdes extremamente leves.¹⁸ Mesmo assim, seu uso fica impossibilitado em alguns casos.

Quanto a telhas de fibrocimento, as possibilidades de esverdeamento deste tipo de cobertura é alto, já que a laje de concreto está quase sempre presente, existindo inclusive a possibilidade de se colocar a cobertura verde sobre as próprias telhas.

2.4 Impermeabilização

A estanqueidade é umas das funções fundamentais de qualquer cobertura, que tem dois componentes fundamentais: o *revestimento* e a *armação*.¹⁹

Historicamente, a função de proteção da edificação contra a chuva foi quase sempre efetuada por telhados, i.e. coberturas inclinadas compostas por telhas de diversos materiais (e.g. cerâmica, ardósia, ou junco) suportadas por estruturas de madeira, que garantiam a estanqueidade por sobreposição/encaixe dos elementos e inclinação (SILVA, 2005); exceto em regiões áridas com pouca precipitação, que podiam se dar ao luxo de manter coberturas planas, que acabavam adquirindo diversos usos vernáculos (e.g. desidratação de alimentos, cozimento) (MARTINEZ, 2005).

Foi apenas com o advento das primeiras impermeabilizações modernas derivadas de betume, em meados do século XIX, em paralelo com o desen-

18 Cf. Fábrica da Ford, Dearborn, Michigan, EUA.

19 “Revestimento impermeabilizante – podendo ser de diversos materiais, desde que impermeáveis às águas pluviais, resistentes à ação do vento e intempéries. A cobertura pode ser de telhas cerâmicas, chapas onduladas de fibrocimento, metálica, madeira, ardósia, cobre, poliestireno, policarbonato, ou outro tipo de impermeabilizantes a base de asfalto, poliuretano, epóxi, cimento modificado com polímeros, muito utilizados em lajes de concreto planas; e Armação – corresponde ao conjunto de elementos estruturais para sustentação da cobertura. As estruturas que compõem a armação das coberturas podem ser executadas totalmente ou parcialmente em madeira, aço, alumínio ou concreto armado” (SILVA, 2005, p. 7).

volvimento do concreto armado, que se abriu a possibilidade de utilizar a cobertura plana mesmo em climas não-áridos, dispensando as pesadas chapas de chumbo utilizadas até então. Os primeiros experimentos com coberturas transitáveis foram conduzidos pelo alemão Samuel Haüsler em 1839, com rolos de papel impregnados com alcatrão (tecnologia depois utilizada durante décadas). Carl Rabitz apresentou seu protótipo de placa impermeabilizante durante a Exposição Universal de Paris de 1867, e, para demonstrar sua efetividade, instalou um jardim com árvores sobre sua própria residência em Berlim (MARTINEZ, 2005).

Atualmente existem inúmeros tipos de impermeabilização, destinadas às mais diversas situações. O principal fator na escolha é a natureza do contato com a água, que, no caso dos tetos verdes, é com solo, em contraste com lajes normais, que configuram contato de percolação.²⁰

Membranas são moldadas *in loco* por meio de aplicação a líquido (soluções ou emulsões, estas últimas mais ecológicas), vantajosas no caso de coberturas de formato complexo. Já **mantas** são rolos pré-fabricados de largura e espessura fixas, exigindo fusão das bordas para garantir estanqueidade, além de *primer* para garantir aderência ao substrato. Ambas podem ser de natureza *polimérica* (plásticos, borrachas) ou *asfáltica* (derivados do tradicional betume do petróleo); os tipos de aplicação variam entre a frio ou a quente.²¹

A impermeabilização é em si formada por várias camadas, incluindo proteção mecânica e regularização (ABNT, 2010).

A impermeabilização pode entrar em conflito com outros projetos específicos; portanto, exige projeto específico (como de hidráulica ou de elétrica).²²

20 “O tipo adequado da impermeabilização a ser empregado na construção civil deve ser determinado segundo as solicitações impostas pelos fluidos nas partes construtivas. As solicitações podem ocorrer de quatro formas distintas: a) imposta pela água de percolação; b) imposta pelo fluido sob pressão unilateral ou bilateral; c) imposta pela umidade do solo; d) imposta pela condensação de água.” (ABNT, 2010).

21 Cf. Apêndice A - Impermeabilizações, pág. 282.

22 “3.52.1 estudo preliminar: conjunto de informações legais, técnicas e de custos, composto por dados analíticos que tem como objetivo determinar e **quantificar as áreas a serem impermeabilizadas**, de forma a

Além disso, deve haver cuidado durante sua vida útil de não perfurá-la para instalação de antenas ou playgrounds, por exemplo.

Mesmo assim, a impermeabilização se mostra uma barreira para a difusão maior dos tetos verdes no Brasil (ALVES, [s.d.], grifo nosso):

Muitas construtoras de pequeno porte não têm condições ou mesmo desconhecem que existem empresas no mercado especializadas em fazer projetos de impermeabilização. Nesses casos, as construtoras procuram se cercar de especificações mínimas para ter sucesso. Feita muitas vezes de forma indiscriminada e por pessoas não capacitadas, **a impermeabilização se transformou no item que exige maior manutenção pós entrega da obra**. Essa dificuldade na contratação da empresa, o desconhecimento dos materiais que devem ser usados — e como devem ser usados — causam uma série de problemas minimizados pelas especificações.

A impermeabilização residencial tem baixa qualidade, já que é feita normalmente sem ajuda especializada ou projeto.

Porém, Gatto (2012) tem uma visão mais otimista:

A impermeabilização, a qual foi considerada [...] inicialmente outro ponto vulnerável, suscetível de falhas que se deve considerar fundamental e cuidar intensivamente sem medo de exagero, mostrou-se viável sem muitos acréscimos aos cuidados requeridos por quaisquer sistemas de impermeabilização a serem aplicados.

As soluções apresentadas se mostraram eficientes e cuidadosas nos seus processos de projeto, detalhamento e acuidade na execução, que são os pontos cruciais para o bom desempenho e sucesso das coberturas, ora apresentadas (GATTO, 2012, p. 150).

atender às exigências de desempenho em relação estanqueidade dos elementos construtivos e a durabilidade frente à ação de fluidos, vapores e umidade

3.52.2 projeto básico de impermeabilização: conjunto de informações **gráficas** e descritivas que definem as **soluções de impermeabilização a serem adotadas** numa dada construção, de forma a atender às exigências de desempenho em relação à estanqueidade dos elementos construtivos e durabilidade frente à ação de fluidos, vapores e umidade. Pela sua característica, deve ser feito durante a etapa da **coordenação geral das atividades de projeto**

3.52.3 projeto executivo de impermeabilização: conjunto de informações gráficas e descritivas que **detalha e especifica**, integralmente e de forma inequívoca, todos os sistemas de impermeabilização a serem empregados numa dada construção. Pela sua característica, é um projeto especializado e deve ser feito **concomitantemente aos demais projetos executivos**” (ABNT, 2010, grifo nosso).

A manutenção e inspeção visual de impermeabilizações são dificultadas pela cobertura vegetal; além disso, pontos frágeis, como juntas e elevações, podem ser malfeitas e provocar infiltrações (PECK; KUHN, 2003). Algumas empresas recomendam a incorporação de sistemas de detecção elétrica de infiltrações (*electric field vector mapping*, EFVM), que localiza com precisão o problema (PECK; KUHN, 2003).²³ O sistema é especialmente útil em coberturas inclinadas, onde um teste de inundação não pode ser feito (GRUZEN SAMTON ARCHITECTS, 2007). O uso de impermeabilizações completamente aderidas (e.g. a líquido) garante que uma eventual falha será localizada facilmente pelo ponto de infiltração; por outro lado, sistemas não aderidos podem manifestar a falha em qualquer ponto da laje.

Mesmo assim, segundo Gruzen Samton Architects (2007), não há evidências que tetos verdes sejam mais propensos a infiltrações, sendo que sua maior durabilidade sugere exatamente o contrário:

- o revestimento vegetal protege contra punção e dano solar (UV), dobrando a vida útil da impermeabilização (PECK; KUHN, 2003);
- o amortecimento térmico poupa o trabalho da membrana, o que aumenta sua durabilidade (GETTER; ROWE, 2006);
- a existência de um sistema vegetal, com barreira de raízes e competição de outros espécimes, inibe o desenvolvimento de plantas intrusas (GREATER LONDON AUTHORITY, 2008), que podem danificar coberturas convencionais.

Nos tetos verdes, portanto, a impermeabilização é elemento chave, resolvendo a contradição entre necessidade biológica de água pelas plantas, e o perigo construtivo de seu contato prolongado com a laje ou telha.²⁴

23 Exigem impermeabilizações eletricamente resistentes.

24 Cf. ABNT NBR 9574:2008 Execução de impermeabilização, ABNT NBR 9575:2010 Impermeabilização - Seleção e projeto

2.5 Drenagem

Em solos naturais, a drenagem ocorre:

- por meio da *percolação* para camadas mais profundas, atingindo o lençol freático;
- *drenagem lateral subsuperficial* (na camada não saturada sendo feita nos percursos preferenciais, e.g. macroporos laterais; e na camada saturada constituindo o fluxo de base);
- *drenagem superficial*.²⁵

Em coberturas verdes, devido à limitação da quantidade de solo, a água excessiva deve ser drenada logo abaixo do meio de cultura (movimento vertical), evitando a drenagem superficial (e especialmente o acúmulo superficial de depressão²⁶), e permitindo o movimento lateral apenas sobre a impermeabilização até as saídas (emulando o fluxo de base). A camada de drenagem deve ser projetada de acordo com as condições hidrológicas locais.

É a camada que tem relação mais forte com funções de ambas as naturezas:

- biológicas:
 - evitar alagamento (e consequentes condições anaeróbicas prejudiciais às plantas);
 - fornecimento de água (retenção ou reservatório);
 - aumento da profundidade acessível às raízes;
 - adequação ao tipo de vegetação;
- construtivas:
 - drenagem propriamente dita; deve ser suficiente para evitar a drenagem superficial, especialmente em coberturas pouco espessas;²⁷

25 *Horton overland flow* e fluxo de saturação

26 Algum acúmulo pode ser desejável no caso de coberturas verdes biodiversas que imitem brejos. Cf. Capítulo 8 – Biodiversidade e áreas verdes, pág. 220.

27 Cf. FLL, 2002, item 7.2.5, “*Water permeability*”, que inclui fórmulas

- carga: recalque do material deve ser mínimo; além de evitar acúmulos que sobrecarregariam a estrutura;
- função protetora.

Ela pode ser feita de (WINGFIELD, 2005)²⁸:

- *agregados*: incluem argila expandida (cinasita), vidro expandido, pedrisco, pedra-pomes, material de demolição (e.g. tijolos ou telhas cerâmicas moídas; a exceção é o concreto, que pode aumentar a concentração de carbonatos a níveis prejudiciais para as plantas; FLL, 2002). Camadas com menos que 10 cm devem ser livremente drenantes, enquanto camadas mais espessas podem escolher restringir parcialmente a drenagem como estratégia de armazenamento de água (WINGFIELD, 2005). Uso de materiais pontiagudos pode exigir camada protetora para não danificar a impermeabilização ou camada de raízes (FLL, 2002);
- *geossintéticos*: incluem geocompostos separadores (geoespaçador) utilizados normalmente em muros de arrimo, que criam uma camada de livre drenagem entre o muro e a terra, sendo recolhida a água em um tubo inferior. Estão incluídos também outros materiais sintéticos rígidos, flexíveis, texturados, com reservatórios, entre muitos outros²⁹. Têm a vantagem de serem menos espessos e mais leves.
- *híbridas*.

Kelly (2008), em uma pesquisa sobre qualidade da água de tetos verdes para cisternas na Flórida, comparou os dois tipos de drenagem (agregados e geossintéticos) e concluiu não haver diferenças significativas em relação a

28 “Drainage divides into two basic classes, aggregate drains and geocomposite drains, which may be combined or used separately in conjunction with the drain outlets.” (WINGFIELD, 2005).

29 Cf. FLL, 2002, item 7.1, “Materials groups and types”

evapotranspiração, hidrógrafo, ou qualidade química da água,³⁰ sendo que parâmetros financeiros, estruturais, construtivos e de disponibilidade devem ter maior peso na escolha.³¹

2.5.1 Caídas

As caídas devem ser projetadas de modo a evitar acúmulos de água. A camada, seja de agregados ou geossintéticos, deve ser posta sobre a cobertura já com inclinação de drenagem corrigida (tolerância de ± 1 cm a cada 4 m; FLL, 2002). Devem ser de no mínimo 1,3% (1:80), sendo que alguns projetistas somam um ajuste de 25 mm para lajes de concreto e 15 mm para coberturas metálicas (NOPHADRAIN, [20??]a). Mesmo assim, há risco de empoçamento no caso de irregularidades na impermeabilização (e.g. sobreposição nas emendas), sendo necessária nesses casos uma camada de ajuste.³²

2.5.2 Saídas

A água deve ser levada para fora da cobertura por meio de saídas, que incluem calhas, ralos e condutores.

Todos devem ser acessíveis mesmo quando a vegetação tiver atingido seu tamanho máximo. Uma faixa de 50 cm de largura feita de pedras pode ser necessária em torno das saídas. Caixas de inspeção com tampas removíveis facilitam a manutenção. A capacidade de drenagem deve aumentar conforme se aproxima das saídas, sendo comum a colocação de seixos rolados (GREENROOFS.COM, [s.d.]).

Um ladrão deve ser incluído no caso de entupimento do sistema primário (FLL, 2002).

30 “the drainage layer material has no significant effect on the water quality or hydrology of the green roof discharge.” (KELLY, 2008, p. iii).

31 “Because of the negligible difference between the hydrology and water quality from gravel and geo-synthetic drainage material, when designing a green roof the choice of geo-synthetic drainage material should be used over gravel when structural support and ease of installation is a concern.” (KELLY, 2008, p. 95).

32 Cf. ABNT NBR 10844:1989 Instalações prediais de águas pluviais - Procedimento

2.5.3 Outras funções da camada de drenagem

Além da drenagem propriamente dita e do armazenamento de água, a camada de drenagem pode ter funções adicionais:

- proteção mecânica da impermeabilização;
- estabilidade de coberturas inclinadas;
- isolamento térmico adicional.

2.6 Proteção contra raízes

Outro ponto de conflito entre a laje e a vegetação são as raízes. Pode ser necessária uma camada anti-raízes para evitar danos aos elementos construtivos ou impermeabilização, especialmente se feita de materiais orgânicos, como betume. Algumas plantas especialmente agressivas incluem xeflera (*Schefflera* spp.), fícus (*Ficus* spp.), primavera (*Bougainvillea* spp.) e bambu (LIU, 2006).³³

Elas podem ter dois princípios de funcionamento:

- **físico** (construção): malha fina demais para que as raízes passem; e.g. geotêxteis de náilon.
- **químico** (inibição): composto químico que repele ou mata as raízes. Um dos mais usados é lâmina de cobre³⁴. Outra opção são herbicidas ou mistura com alcatrão.³⁵

A função pode ser incluída na própria impermeabilização, no caso de impermeabilizações de PVC (policloreto de polivinila), borracha EPDM (Etileno Propileno Dieno tipo M ASTM) ou betume-cobre (*bitumen-copper*)

33 “The roots of certain plants, such as bamboo and many Chinese reeds, can be extremely aggressive and may require multiple barriers, which in many cases, are made up of overlapped polymeric sheets” (LIU, 2006).

34 O uso de cobre vem sendo questionado na indústria de horticultura por ser facilmente mobilizado, contaminando a água (KOSUTA; HAMEL. 2000).

35 “Há no mercado mantas com inibidores de raízes incorporadas no próprio asfalto da manta, entretanto uma forma mais barata e talvez mais eficiente, uma vez que a manta é inibida ao contato da proteção enquanto os inibidores incorporados na manta agem quando a raiz já está em contato com a manta, é utilizar sobre a proteção mecânica uma pintura anti-raiz, que é a mistura de 20% de óleo de alcatrão de hulha [carvão mineral] e 80% de solução asfáltica para imprimação.” (SOMA, 2009, p. 27).

(NOPHADRAIN, [20??]b), sendo que a FLL (2002) disponibiliza um teste específico de resistência contra raízes.³⁶

No caso de tetos “invertidos” (i.e. isolamento sobre a laje), a membrana anti-raízes deve ser colocada abaixo do isolamento e acima da impermeabilização (NOPHADRAIN, [20??]b).

O contato da camada de drenagem e filtragem com as raízes é desejável, e não prejudica a drenagem.³⁷

2.7 Armazenagem de água

Um sistema de cobertura verde deve idealmente ter vários meios de armazenagem de água redundantes em diversas camadas separadas (meio de cultura, filtragem, drenagem), podendo opcionalmente até mesmo ter uma camada própria (e.g. reservatório).

Para Wingfield (2005), a camada de drenagem retém água:

- nos agregados com poros livres e absorventes (intra e interparticulares); poros não acessíveis (bolhas no material) não contam;
- nos reservatórios de drenos geocompostos (e.g. cavidades, texturas);
- no uso de mantas espessas;
- no bloqueio parcial da drenagem, armazenando água no fundo.

A capacidade de retenção de água é medida comparando-se pesos molhados e secos, não havendo um teste padrão específico (WINGFIELD, 2005).

36 Cf. FLL, 2002, item 12, “Testing”

37 “Um estudo de dez anos das raízes e seus efeitos nas camadas de drenagem conduzido pela Universidade de Hanôver (Alemanha) mostrou que a quantidade de raízes penetrando o filtro diminui ao longo do tempo conforme as plantas se estabelecem, portanto não havendo problema quanto às raízes diminuírem a capacidade de drenagem de modo significativo”. “

A ten year study of roots and their affect on drainage layers done by the University of Hanover (Germany) has shown that the amount of roots penetrating the filter diminishes over time as plants become established so there is not a problem with roots significantly reducing drainage capacity.” (WINGFIELD, 2005, tradução nossa).

Deve-se enfatizar que o excesso de água causa degradação mais rápida da vegetação que sua falta; de modo similar aos animais, o afogamento mata mais rápido que a sede.

2.8 Camada de filtragem

A função da camada de filtragem é impedir o carreamento de partículas do meio de cultura para a drenagem, o que ocasionaria (WINGFIELD, 2005):

- degradação do meio de cultura
- colmatagem da drenagem.

Assim, seus poros devem ser menores que o tamanho mínimo das partículas do meio de cultura (em geral, $<200\text{ }\mu\text{m}$, ou $0,2\text{ mm}$), mas com boa condutividade hídrica e permitindo o micro-enraizamento (NOPHADRAIN, [20??]b).

- *Material:* As mantas de filtragem são constituídas normalmente por mantas tecidas ou não-tecidas (geotêxteis), de poliéster ou polipropileno-polietileno; podem ser parte de um geocomposto de drenagem ou colocadas independentemente.
- *Peso:* Seu peso varia entre 100 e 200 g/m^2 , dependendo da carga acima (podendo ser maior no caso de meios de cultura com espessura maior que 25 cm ou telhados inclinados) (NOPHADRAIN, [20??]b).
- *Resistência:* Deve ter resistência a punção de $0,5\text{ kN}$ para sobreviver à própria construção da cobertura, mas *deve permitir a passagem de raízes finas que buscam água acumulada na drenagem* (NOPHADRAIN, [20??]b).
- *Instalação:* As mantas devem ter sobreposição de 10 cm entre si (FLL, 2002, p. 45). Durante a colocação, deve-se ancorar o material para que não seja danificado pelo vento. Deve ser coberto em menos de uma semana para evitar danos por exposição solar.

2.9 Meio de cultura

O meio de cultura é a camada biológica mais importante, procura emular a zona de raízes de solos naturais. A rigor, vegetais não necessitam de solo para crescer; técnicas hidropônicas e aeropônicas permitem que uma planta se desenvolva normalmente sem solo, contanto que haja suporte mecânico e nutrientes. Epífitas, como bromélias ou orquídeas, são naturalmente adaptadas a essas condições, retirando água e nutrientes da chuva ou da umidade do ar.

Mesmo assim, o meio de cultura cumpre funções ambientais que vão além de suportar a vegetação (e.g. armazenamento hídrico, evaporação, inércia térmica, isolamento térmico), e, portanto é desejável sua presença maciça. O meio de cultura é assim fundamental para (STUDIO SPROUT, 2008):

- a) sobrevivência vegetal em longo prazo;
- b) retenção de água pluvial;
- c) transferência de calor.

2.9.1 Propriedades dos solos

De modo a melhor compreender as funções fundamentais do meio de cultura, é importante descrever as propriedades de solos naturais, e onde existem contrastes ou similaridades.

Solos são formados por partículas de minerais (da rocha-mãe), além de matéria orgânica, permeados por interstícios chamados “poros”. A proporção de vazios por volume constitui o *índice de vazios* (v), também conhecido como *porosidade*. Em um solo típico ($v = 50\%$) temos que:

- a fase *sólida* (50%) é composta por matéria mineral (45%) e matéria orgânica (5%);
- a fase *líquida* (25%) é constituída por solução aquosa;
- a fase *gasosa* (25%) é ar atmosférico alterado.

Os interstícios entre partículas podem ser classificados em:

- **macroporos:** Têm dimensões maiores que 0,01 mm. São os primeiros a serem preenchidos ou esvaziados; contribuem para maior condutividade hidráulica e drenagem, além da difusão de gases e vapor d'água entre atmosfera e solo; os macroporos são criados por fissuras, fauna (e.g. minhocas), raízes e agregamento.
- **microporos:** Têm dimensões menores que 0,01 mm. A água nestes poros tem alta adesão com as partículas do solo, sendo os últimos a serem esvaziados no caso de secagem. Retêm água por capilaridade e servem de abrigo a microorganismos.

A distribuição de macro e microporos em um substrato é de extrema importância e determina a permeabilidade a gases, a drenagem, e a capacidade de retenção de água disponível. Um substrato equilibrado retém iguais quantidades de ar e água em volume (BONAN, 2002). Porém, não só a proporção dos fluidos ar e água é importante, como também sua movimentação, troca e permeabilidade, todos determinados pelos macroporos.

2.9.1.1 Parcela sólida: granulometria e matéria orgânica

A parcela mineral de solos naturais é classificada de acordo com o tamanho das partículas:

- **areia** (partículas maiores que 0,05 mm): grãos grandes, com pouca capacidade de retenção de água, alta condutividade hidráulica; ao contrário do que se acredita comumente, areia possui baixa porosidade, sendo sua alta condutividade hidráulica devido à grande dimensão dos poros;
- **silte** (entre 0,002–0,05 mm): grãos de tamanho e propriedades intermediários, ou seja, baixa condutividade hidráulica e média retenção de água;
- **argila** (menor que 0,002 mm): grãos minúsculos, chatos, e com uma área de superfície total muito maior que silte e areia (por vo-

lume), e assim muito mais susceptíveis à força de atração da água, havendo portanto alta coesão entre suas partículas e baixa condutividade hidráulica (mesmo possuindo maior porosidade).

Em coberturas verdes internacionais, não se recomenda o uso de solo como meio de cultura, devido à alta carga que proporcionam por sua alta densidade de partículas. Argila, por possuir baixa condutividade hidráulica, favorece o acúmulo de água durante precipitações, além de sofrerem carreamento devido ao pequeno tamanho de suas partículas.

A granulometria não é o único fator que determina a adequação do solo a culturas. Outro fator importante é a *estrutura do solo*, ou seja, o modo que as partículas estão agregadas, sendo material orgânico vital nesse processo.

A matéria orgânica em geral não ultrapassa 5% do volume de solos típicos, sendo maior apenas em regiões mais frias, como climas temperados e polares (e.g. tundra), ou áreas alagadas. Em áreas tropicais, as altas temperaturas decompõem a matéria orgânica com rapidez.

Do total de matéria orgânica (MORAVEC, 2011):

- apenas 5% é vivo, composto por fauna e raízes;
- matéria morta (e.g. folhas) corresponde a 10%;
- material ativamente sendo decomposto representa 20–45%;
- húmus compõe 50–80%, tendo importantes funções como agregação do solo, correção de pH, quelação de poluentes como metais pesados, retenção de água, liberação de nitrogênio e outros elementos etc.³⁸

Solos possuem grande atividade biológica, entre bactérias, protozoários, fungos, nematóides e artrópodes, que podem ser classificados em benéficos,

38 “Soil organic matter is composed of a wide variety of organic substances. Derived from plants, animals, and soil organisms, the soil organic matter “pool” can be divided into four categories. First are the living organisms and roots, making up less than 5% of the total pool. Second are the residues from dead plants, animals and soil organisms that have not yet begun to decompose (<10%). Third is the portion undergoing rapid decomposition (20-45%). Fourth is the stabilized organic matter (humus) remaining after further decomposition by soil microorganisms (50-80%).” (MORAVEC, 2011).

neutros ou prejudiciais (patógenos). Em especial, alguns organismos benéficos têm relação simbiótica com as plantas:

- *rizóbia* são bactérias presentes nas raízes de leguminosas, família *Fabaceae*, e.g. amendoim (*Arachis* sp.), soja (*Glycine max*), feijão (*Phaseolus vulgaris*), pau-brasil (*Caesalpinia echinata*), e fixam o nitrogênio atmosférico (N_2);
- *micorrizo* são fungos em forma de filamentos finíssimos que aumentam em 100 ou 1000 vezes a área de absorção de raízes, em troca de nutrientes orgânicos (açúcares)³⁹. Sua presença gera *glomalina*, agente que agrega partículas de argila, criando importantes macroporos, e é importante sumidouro de carbono no solo (COMIS, 2002).

2.9.1.2 Parcela líquida: retenção de água no solo

Devido à carga elétrica levemente negativa das partículas minerais do solo, ele tende a atrair as moléculas de água (*adesão*) que, por sua vez, atraem outras do mesmo tipo (*coesão*). A ação dessas duas forças no solo é chamada de *força matricial*. Ela depende da área de contato entre o meio sólido e o líquido, que, por sua vez, é relacionada ao tamanho e formato das partículas — argilas têm superfície de contato várias ordens de magnitude maior que das areias por volume de material, sendo, portanto, sua força matricial correspondentemente maior (BONAN, 2002).

Além dela, a *força gravitacional* faz com que a água penetre nos vazios do solo (especialmente macroporos) até chegar a uma camada impermeável, como leito rochoso ou uma laje.

A influência e a interação entre essas duas forças dependem da quantidade de água no solo e suas características texturais. A presença de grandes quantidades de água esgota a força matricial, permitindo que a gravidade traga

39 Plantas da família das Crassuláceas (incluindo o gênero *Sedum*) não fazem associações com esses organismos (TORRES, 2010).

parte da água para camadas inferiores. De modo geral, quanto menos água presente no solo, maior é a força matricial; ou seja, quanto mais seco o solo, mais difícil é extrair água dele (BONAN, 2002).

Quando os vazios estão totalmente preenchidos por água, o solo é considerado *saturado*. Nele, há grande atuação da força gravitacional. O ponto de saturação apenas ocorre caso a água estiver impedida de drenar (alagamento).

Se for então drenada toda a água “em excesso”⁴⁰, ou seja, deixando a força gravitacional agir até haver apenas a água que a força matricial é capaz de reter, haverá uma proporção entre água e ar nos vazios denominada *capacidade de campo* (CC) — a retenção máxima de água em um solo drenado (ou o ponto onde a força gravitacional equilibra-se com a matricial).

Não havendo mais drenagem, a quantidade de água no solo só será reduzida abaixo da capacidade de campo caso houver:

- evaporação: pela difusão de vapor através dos poros interconectados até a atmosfera;
- e/ou absorção pelas raízes, por osmose.

O ponto em que a quantidade de água no solo é tão pequena que a raiz não é capaz de absorvê-la é chamado de *ponto de murcha permanente*⁴¹. Ele *não* corresponde à total secagem do solo, já que nem toda água no solo está disponível para absorção da planta.

A umidade ideal para vegetação está situada entre a capacidade de campo e o ponto de murcha, faixa chamada de *água disponível*, que varia conforme a composição do solo ou substrato (BONAN, 2002).⁴² O solo ideal para a maior

40 “água gravitacional”

41 padronizado como -15 atm .

42 Em um extremo, a argila possui altíssima superfície de contato por volume de solo, a superfície de adesão é enorme, o que acarreta em grande força matricial. Assim, apesar de reter grande quantidade de água (alta capacidade de campo), há também uma grande força a ser vencida pelas raízes, sendo a água disponível menor do que se esperaria. No outro extremo, um solo arenoso é muito drenante (baixa capacidade de campo), já que suas partículas são grandes. Neste caso há também uma pequena faixa de água disponível.

parte da vegetação é o solo *franco*, ou médio⁴³, onde há uma combinação equilibrada entre areia, silte, argila e matéria orgânica; no caso de tetos verdes, outros componentes mais leves, como agregados leves, cumprem as mesmas funções.

É importante que o substrato da cobertura verde, ou de qualquer cultura, seja preparado para chegar ao ponto de murcha o mínimo possível, evitando assim estresse e mortandade. Deve haver também drenagem eficiente para que não haja o apodrecimento de raízes, infiltrações e excesso de carga.

43 *loam*, em inglês

Fig. 4 Disponibilidade de água no solo.
A parcela de água disponível (em azul claro) varia com a textura do solo, sendo maior no solo franco.

2.9.1.3 Parcela gasosa: aeração

A presença de oxigênio é importante para a respiração das raízes⁴⁴. Três parâmetros determinam a aeração de um solo: *capacidade* (volume); *intensidade* (concentração de gases); *taxa de transporte* (velocidade de difusão e convecção). A composição do ar no solo é diferente do ar atmosférico (78% nitrogênio, 21% oxigênio, 0,03% gás carbônico), tendo menor quantidade de oxigênio e maior quantidade de gás carbônico (que pode chegar a 10% ou 20% em casos extremos). A disponibilidade de oxigênio é vital para garantir a saúde da vegetação, e uma quantidade de menos de 10% de oxigênio por volume impede seu crescimento (SOJKA; SCOTT, 2002).

Uma baixa disponibilidade de oxigênio se deve a diversos fatores:

⁴⁴ Plantas “se alimentam” pelas as folhas (pela fotossíntese) e respiram pelas as raízes (devido à grande importância da aeração e respiração radicular).

- saturação do solo⁴⁵ (e.g. alagamento);
- compactação;
- poros descontínuos (impedindo difusão e convecção);
- profundidade (distância até a superfície);
- alta respiração em solo úmido (devido à alta temperatura do solo ou incorporação de matéria orgânica fresca; a decomposição gera calor);
- decomposição de matéria orgânica;
- impermeabilização da superfície.

Areias têm poros maiores e mais bem conectados que argilas, apesar da menor porosidade (SOJKA; SCOTT, 2002).

Em coberturas verdes, se não houver drenagem adequada, poderá haver acúmulo de água⁴⁶ e consequente mortandade das plantas devido à falta de oxigênio nas raízes e outros motivos. A profundidade não costuma ser um fator determinante devido à pequena espessura dos meios de cultura. É importante também evitar excesso de matéria orgânica, que pode causar decomposição excessiva e consequente anaerobização.

2.9.1.4 Meios de cultura para tetos verdes

O meio de cultura deve ser (TORRES, 2010):

- leve (especialmente em extensivos);
- bem drenado;
- ter capacidade retentora de água e nutrientes adequada;
- capaz de filtrar poluentes;
- sustentável;
- durável e estável.

⁴⁵ A velocidade de difusão do oxigênio na água é dez mil vezes mais lenta que no ar (GOSS, [s.d.]).

⁴⁶ Às vezes desejável para emular ambientes alagados; Cf. Capítulo 8 – Biodiversidade e áreas verdes, pág. 220.

Dependendo dos objetivos do teto verde, pode haver variação na composição. Por exemplo, a retenção de água é desejável para manejo sustentável de águas pluviais, porém indesejável estruturalmente; ou a argila é evitada devido ao seu peso e potencial de colmatção, mas necessária para a reprodução de ambientes biodiversos. Como em quase todos os aspectos dos tetos verdes, é necessário que se estabeleçam objetivos claros de modo a guiar as conciliações entre exigências contraditórias. Qual a finalidade do teto verde em questão?

Fatores que influenciam a escolha do meio de cultura são clima, peso, fertilidade, profundidade, local, microclima e presença de irrigação (STUDIO SPROUT, 2008). As propriedades químicas e físicas dos meios de cultura são conseguidas combinando partículas de tamanhos e composição químicas diferentes (TORRES, 2010). A composição, por outro lado, determinará o peso saturado, a taxa de evaporação, a capacidade de drenagem e a compactabilidade (STUDIO SPROUT, 2008).

Intensivos

Agregado leve	35–75%
Areia	10–50%
Matéria orgânica	5–20%
Areia e silte	0–2%

Tabela 1: Componentes para tetos verdes intensivos

Fonte: Friedrich, 2004, tradução nossa

Extensivos

Agregado leve	50–100%
Areia	0–30%
Matéria orgânica	0–40%
Argila e silte	0%

Tabela 2: Componentes para tetos verdes extensivos

Fonte: Friedrich, 2004, tradução nossa

Para tetos verdes extensivos:

o clima local e seleção de plantas irão ditar o meio a ser usado, mas é possível ser constituído por 80% de agregado leve e 20% de composto orgânico (FRIEDRICH, 2004, tradução nossa).⁴⁷

Para FLL (2002), o conteúdo de argila e silte é de 7% em massa para tetos verdes extensivos únicos. A fração orgânica não deve ultrapassar 8% em massa. Mais que 20% de matéria orgânica representa risco de incêndio (FLL, 2002).

O pH do solo influencia déficit de nutrientes, toxicidades e atividade microbológica, devendo ser mantido idealmente entre seis e sete (TORRES, 2010).

Em manuais e referências internacionais, em geral, rejeita-se a utilização de solo superficial (*topsoil*) na construção de tetos verdes, pelos seguintes motivos:

- alta carga (16–20 kg/m² de peso saturado por centímetro de espessura; JOHNSTON; NEWTON, 2004); (EARTH PLEDGE, 2005).
- alto conteúdo orgânico causa entupimento da camada filtrante em médio prazo (NOPHADRAIN, [20??]b, p. 17);
- não permitem a drenagem, aeração e reposição de matéria orgânica necessários (EARTH PLEDGE, 2005);
- falta de controle, podendo introduzir propriedades indesejadas, como ervas daninhas, doenças e insetos prejudiciais (GREEN-ROOFS.COM, [s.d.]).

Isso contrasta com os tetos verdes construídos em estudos brasileiros, onde o uso de “terra vegetal” é dominante (VECCHIA, 1997⁴⁸; MORAIS, 2003⁴⁹; GATTO, 2012; FERRAZ, 2012), apesar de já existem soluções de mer-

47 “For extensive green roofs, the local climate and plant selection will dictate the media to be used but it is possible to consist of 80% lightweight aggregate and 20% compost.” (FRIEDRICH, 2004).

48 “O conjunto que compõe a cobertura verde leve (CVL) é formado pelo substrato (grama com terra vegetal); pela geomanta e por uma camada impermeabilizante (VECCHIA, 1997).

49 “A cobertura verde [...], que compõe a entrada de uma empresa de segurança, tem planta triangular, com 4,44 m² de área e 20cm de espessura total, com laje maciça de concreto (e = 10cm), camada impermeabilizante, camada drenante de cacos de telha cerâmica (e = 5cm), manta geotêxtil, terra vegetal e as seguintes espécies de plantas: *Duranta repens* e *Asparagus densiflorus* (MORAIS, 2003, p. 362).

cado com meios de cultura preparados. Ferraz (2012), ao perceber que a terra vegetal utilizada provocou compactação e solapamento da drenagem, corrigiu o solo com húmus de minhoca.⁵⁰

No lugar, são utilizadas misturas sem solo (*soil-less mixes*) de modo a reduzir o peso e eliminar materiais que não contribuem para o desempenho das plantas. Entre os materiais mais comuns estão os *agregados leves*, que concedem alta retenção de água e nutrientes. Em sistemas extensivos, há maior presença de material inorgânico. Materiais granulares podem ser classificados como (DUNNET; KINGSBURY, 2004):

- minerais naturais;
- minerais artificiais;
- material reciclado ou de descarte.

Agregados leves são importantes por sua baixa carga, e incluem:

- *argila expandida (cinasita)*⁵¹: muito comum no mercado brasileiro. É muito utilizado em culturas aquapônicas. Argilas expandidas aumentam a capacidade de troca de cátions⁵² (CTC) dos solos, regulam pH e seguram fortemente água, o que pode ser problemático para plantas não-desérticas.
- *ardósia expandida (expanded slate)*: ardósia é resultado da metamorfose do xisto, e sua forma expandida também é utilizada em tetos verdes, com menor capacidade de retenção de poluentes (TORRES, 2010).
- *xisto expandido (expanded shale)*: xisto é uma rocha sedimentar advinda de argilas finas, com alta CTC e alto poder de remoção de poluentes (fósforo, amônia e metais).

50 “Sobre a camada filtro foi aplicada a camada de substrato, composta de terra vegetal, e por fim foi feito o plantio da espécie vegetal selecionada [...]. Após o segundo mês ocorreu um replantio das mudas, visto que o solapamento da terra vegetal estava impedindo o desenvolvimento da espécie. Nesta ocasião a terra vegetal foi misturada com húmus de minhoca”. (FERRAZ, 2012, p. 30).

51 em inglês *light expanded clay aggregate (LECA)*

52 Cf. Apêndice C - Capacidade de troca de cátions (CTC), pág. 287.

- *vermiculita esfoliada*: mica expandida. A rocha é encontrada naturalmente em minas; a fabricação consiste em forno, onde a rocha expande. Possui alta CTC.
- *perlita*
- *pedra-pomes*

Como muitos desses materiais são produzidos em fornos, eles são criticados por possuírem grande energia incorporada,⁵³ sendo substituídos por produtos reciclados para reduzir o impacto ambiental e custos (TORRES, 2010).

Outro material com grande potencial é o *carbone vegetal* (*biochar*), altamente poroso, com potencial agrícola, utilizado como armazenamento de carbono, e com propriedades reguladoras do solo, além de muito leve e barato. O seu uso em tetos verdes deve ser estudado mais profundamente.⁵⁴

Matéria orgânica também é adicionada para retenção de água e disponibilidade de nutrientes, e incluem fibra de coco e casca de árvore.

Materiais locais também são aceitáveis, especialmente em projetos de pequena escala, como cerâmicas sanitárias trituradas, pedrisco, areia e seixos (DUNNETT et al., 2011, p. 45 e 46), especialmente para se criar tetos verdes biodiversos ou *brown roofs*.⁵⁵

2.10 Plantas

Para tetos verdes extensivos, normalmente são utilizadas plantas resistentes às duras condições da cobertura, que não exijam poda ou irrigação. As mais utilizadas são do gênero *Sedum*. Há ainda a possibilidade de se utilizar gramas normais ou grama-amendoim (*Arachis repens*).

53 Cf. 6.2.2 Sequestro de carbono, pág. 184.

54 Cf. BECK; JOHNSON; SPOLEK, 2011.

55 Cf. Capítulo 8 – Biodiversidade e áreas verdes, pág. 220.

Para coberturas intensivas, por terem condições mais favoráveis, a gama de opções é altíssima, apenas se evitando árvores de grande porte.

2.11 Exigências construtivas

2.11.1 Carga

A NBR 6120 (ABNT, 1980) divide os tipos de cargas em *permanente*, “constituído pelo peso próprio da estrutura e pelo peso de todos os elementos construtivos fixos e instalações permanentes”, e *acidental*, ou seja, “que pode atuar sobre a estrutura de edificações em função do seu uso (pessoas, móveis, materiais diversos, veículos etc.)”.

A norma classifica as cargas de terraços em:

Tipo de terraço	carga (kN/m ²)	carga aprox. (kg/m ²)
Sem acesso ao público	2	200
Com acesso ao público	3	300
Inacessível a pessoas	0,5	50
Destinados a heliportos elevados	as cargas deverão ser fornecidas pelo órgão competente do Ministério da Aeronáutica	

Tabela 3: Cargas para terraços
Fonte: ABNT, 1980

No caso de edifício em fase de projeto, prever uma cobertura mais resistente é relativamente simples e barato, inclusive tetos verdes semi-intensivos e intensivos.

Já em uma construção existente, deve ser feita uma análise das condições da estrutura para receber carga extra. O edifício como um todo deve suportar a carga de um sistema de coberturas verdes: fundação, pilares, vigas e laje. As seguintes perguntas devem ser respondidas (MUNBY, 2005):

- quanto a **estrutura** do edifício (pilares e vigas) suporta;
- quanto a **laje** da cobertura suporta, em média. Caso a laje da cobertura seja uma laje de piso, ela está mais apta a receber carga extra;

- **pontos** em que há maior capacidade de carga: vigas, pilares e caixas de elevador. O projeto deve levar em consideração os locais onde cargas pontuais (pilares), lineares (vigas) estão localizados, usando-os para colocação estratégica de elementos paisagísticos, como árvores, no caso de tetos verdes intensivos.

No caso de reforçar a estrutura:

- se é possível reforçar a laje de cobertura, caso a estrutura embaixo suporte;
- caso a estrutura não suporte, se é possível reforçá-la por inteiro.

Para isso, deve-se verificar (MUNBY, 2005):

- se havia no projeto algum **andar que não foi construído**. A carga prevista para esse andar pode ser suficiente até mesmo para instalação de tetos verdes intensivos (como na sede da Prefeitura de Chicago);
- o **peso da cobertura atual** a ser retirada. Lajes com telhas de cerâmica (100 kg/m^2), cobertura de cascalho (200 kg/m^2) ou piso de concreto (50 mm pesam 120 kg/m^2) já têm o peso desses revestimentos previsto;
- se algum **outro tipo de sobrecarga** havia sido previsto, mas que não é utilizado ou pode ser mudado. Por exemplo, uma caixa-d'água ou piscina não construídas, ou o peso de sobrecarga de neve; ou a transformação de uma cobertura acessível em uma verde inacessível;
- uma carga extra de 150 kg/m^2 deve ser considerada no caso de um teto verde acessível ao público (MUNBY, 2005).

Um teto verde extensivo é relativamente leve (podendo pesar apenas 60 kg/m^2), e está apto a ser colocado em muitos edifícios, inclusive sobre estruturas suspensas. Isopor pode ser utilizado como enchimento para colocação de morrotes ornamentais ou árvores.

Já os intensivos geralmente são apenas possíveis no caso de projetos novos. No caso de retrofit, deve haver uma avaliação técnica no caso de *retrofit* para verificar a capacidade de carga da estrutura.

No caso de substituição de coberturas, há possibilidade de colocação de tetos verdes de acordo com a carga removida; o mesmo pode ser dito da transformação de uma cobertura acessível em uma verde inacessível.

Em um primeiro momento, as lajes de concreto parece ser as mais passíveis de adaptação, já que 60 kg/m² equivalem a apenas 22 mm de concreto. No entanto, é sempre necessária uma avaliação técnica, e lajes de concreto são mais difíceis de avaliar, se comparadas às estruturas de madeira ou metal, já que parte da estrutura de suporte, a armação, está oculta, e pode não ter sido construída de acordo com o projeto (MUNBY, 2005).

2.11.2 Vento

Sendo áreas tão expostas, é natural que haja cuidado especial com ventos, especialmente no caso de coberturas leves. A influência do vento depende do clima local, altura da edificação, tipo de construção, inclinação, área (borda ou meio). Mesmo assim, não é necessário vincular todos os elementos de uma cobertura, já que as plantas se encarregam de agregar as camadas e suavizam a turbulência superficial (MILLER, [s.d.]). Entre as medidas mais utilizadas então o lastro das bordas por meio de pedrisco, seixos ou lajotas de concreto, normalmente com 30 cm de largura. No caso de impermeabilizações soltas, o próprio teto verde pode agir como lastro, utilizando seu peso seco para cálculos (NOPHADRAIN, [20??]b).

Mesmo assim, o vento traz consequências biológicas à cobertura, como erosão, secagem, danos às plantas ou seu desenraizamento. Uma solução é colocar o teto verde em local relativamente abrigado.⁵⁶

56 Cf. RP14 Wind Design Standard for Vegetative Roofing Systems as an American National Standard. NBR 6123/1988 Forças devidas ao vento em edificações

2.11.3 Incêndio

Os primeiros tetos verdes modernos foram instalados com função de prevenir incêndios. Na Alemanha, tetos verdes dão desconto de 10% a 20% no seguro de incêndio (GREATER LONDON AUTHORITY, 2008).

Porém, de acordo com a FLL (2002, p. 29), tetos verdes extensivos são apenas considerados resistentes a incêndios se:

- meio de cultura tiver mais de 30 mm de profundidade;
- meio de cultura tiver menos de 20% de matéria orgânica;
- houver faixa corta-fogo de lajota ou pedrisco de 1 m de largura a cada 40 m;
- faixas de 300 mm–500 mm de largura em torno de quaisquer estruturas que penetrem a cobertura do teto.

EPA ([2008?]) recomenda evitar o uso de gramas que secam durante períodos do ano, dando preferência a *Sedum*. Também sugere a instalação de faixas corta-fogo de 0,6 m a cada 40 m e a ligação do sistema de irrigação ao alarme de incêndio. As faixas devem ser mantidas limpas. Em alguns casos, podem ser substituídas por muretas de 914 mm de altura.⁵⁷

2.11.4 Construção

A logística da construção em si deve ser considerada. No caso de um edifício baixo, custos com guindastes e acesso são reduzidos. Também se deve evitar concentração de materiais em certos pontos da laje (MUNBY, 2005).

O formato da cobertura também é um fator: edifícios quadrados ou de formatos simples requerem poucas bordas e recorte de materiais (principalmente a impermeabilização), enquanto formatos complexos encarecem a obra (MUNBY, 2005).

Normalmente, aproveita-se uma reforma inevitável da cobertura para a instalação do teto verde.

⁵⁷ Cf. ANSI/SPRI VF-1, Fire Design Standard for Vegetative Roofs

2.11.5 Acesso

O acesso à cobertura é crucial, e pode ser dividido em:

- construção;
- mão de obra;
- materiais, inclusive solo e meio de cultura;
- manutenção: podas, inspeções;
- recreativo (opcional): tem normas específicas de acesso público, e envolve parapeitos etc.

Se for pensado na fase de projeto, não é difícil prever uma parada a mais do elevador. Caso não for possível, o material terá que ser levado por guindastes ou escada, que incorre em custos. Acesso interno é preferível, assim como portinhola em vez de alçapão (PECK; KUHN, 2003).

Deve haver uso de equipamento de segurança na construção e manutenção de tetos verdes sem acesso público. Deve-se evitar pisoteio excessivo, e tomar cuidado com as ferramentas utilizadas para não haver perfuração das camadas.

2.11.6 Custo

Os custos podem ser divididos em:

- projeto;
 - arquiteto, engenheiro, paisagista; pode estar incluído no caso de empresas especializadas;
- construção;
 - impermeabilização;
 - mão de obra, materiais (plantas, meio de cultura);
- manutenção.

Segundo Munby (2005), um teto verde extensivo⁵⁸ custa tipicamente o dobro de uma cobertura convencional, devido à impermeabilização, drenagem

⁵⁸ Coberturas intensivas e semi-intensivas custam consideravelmente mais.

e outros custos técnicos associados a essa tecnologia. Vecchia (1997), porém, aponta que:

[...] o metro quadrado estimado do telhado composto por telhas cerâmicas ficou em torno de R\$ 46,00/m², enquanto que o telhado verde (CVL) ficou em aproximadamente R\$ 38,00/m², o que significa uma economia de R\$ 8,50 por m² ⁽⁵⁹⁾ (VECCHIA, 1997).

Deve-se, porém, levar em consideração a durabilidade da cobertura (tetos verdes duram de 2 a 3 vezes mais que uma laje convencional) e custos operacionais do edifício (consumo de energia pode baixar devido ao menor uso de ar-condicionado).

O custo de instalação e manutenção de uma cobertura verde deve ser comparado ao seu benefício financeiro privado, em curto ou longo prazo, e deve ser julgado relativo ao de outras coberturas.⁶⁰

2.11.7 Manutenção

Apesar de necessária a toda cobertura, a manutenção de coberturas verdes é percebida como um grande empecilho. O custo deve ser incluído no orçamento de manutenção do edifício. É recomendado um contrato de longo prazo entre o instalador e o proprietário (NOPHADRAIN, [20??]a, [20??]b)⁶¹.

Entre as atividades, estão:

- limpeza de sistema de drenagem (calhas, saídas);
- poda e retirada de plantas daninhas (mudas de árvores, doenças);
- manutenção das faixas limpas livres de plantas;
- replantio no caso de áreas nuas;
- avaliação da impermeabilização.

59 Corrigidos pelo IGP-M (índice geral de preços de mercado) de 01/1997 a 01/2014, o metro quadrado do telhado de telhas cerâmicas é de R\$ 184,00, do telhado verde, R\$ 152,00, com uma economia de R\$ 32,00.

60 Cf. 3.1.1 Benefícios individuais: custo-benefício, pág. 84.

61 *"It is recommended that a maintenance contract and a long-term care plan is drawn up between the property owner and the landscape contractor."* (NOPHADRAIN, [s.d.]).

A manutenção depende mais da intenção do teto verde que de sua tipologia; um teto verde ornamental, mesmo extensivo, exigirá maior manutenção, enquanto um intensivo naturalista pode exigir menos. Mesmo assim, em geral: (GREEN ROOF GUIDE, [s.d.]):

Extensivo: quatro ou mesmo duas vezes por ano.

- inspeção e limpeza de saídas de água;
- poda de faixas limpas;
- poda e retirada de plantas daninhas (opcional) Kolb (1986⁶² apud. JOHNSTON; NEWTON, 2004) cita um tempo de 8 minutos por m² por ano para a atividade.

Intensivo: dependendo do tipo, pode ser até semanal, como qualquer outro jardim.

- inspeção e limpeza de saídas de água;
- poda de faixas limpas;
- poda e retirada de plantas daninhas;
- reposição de áreas mortas;
- reposição de meio de cultura onde houve solapamento.

Muitas empresas acompanham os primeiros 12–18 meses de estabelecimento do teto verde; existem, no Reino Unido, empresas especializadas em manutenção (GREEN ROOF GUIDE, [s.d.]).

Adubação: a composição inicial deve ser fértil o suficiente para manter as plantas por um ano (FLL, 2002). Para Hoover (2010), fertilizantes não são recomendados para tetos verdes extensivos, pois contaminam a água pluvial. O excesso pode também prejudicar *Sedum* e ajudar plantas daninhas. Não devem ser usados no caso de aproveitamento de água pluvial (HOOVER, 2010).⁶³

62 Kölb, W. 1986. New Habitats on the Roof – Possibilities for the Provision of Extensive Verdure. Anthos 1, pp. 4-10

63 Se necessário para manutenção de uma espécie específica, a quantidade deve ser mínima (5 gN/m² extensivos, 8 gN/m² intensivos, FLL, 2002). 14-14-14 de liberação lenta é recomendado (SNODGRASS, 2006).

Irrigação: pode ser necessária durante a fase de estabelecimento de tetos verdes extensivos, ou em alguns intensivos, especialmente gramados (GREEN ROOF GUIDE, [s.d.]). Objetivos secundários incluem redução do risco de incêndio ou resfriamento evaporativo. Irrigação por gotejamento pode ser adequado para grandes tetos extensivos por serem baratos e economizarem água (EPA, [2008?]).

2.12 Funções adicionais

2.12.1 Fotovoltaico

Tetos verdes potencializam a eficiência de painéis fotovoltaicos (6%) (KÖHLER et al. 2002) por manterem uma temperatura mais adequada para seu funcionamento. O painel também pode funcionar de abrigo/sombreamento, criando condições ambientais variáveis, que favorece o enriquecimento ecológico. Painéis elevados são ideais, por não terem o risco de sofrerem sombreamento, que, por menor que seja, reduz drasticamente a produção de energia. Atualmente, prefere-se montá-los sobre painéis plásticos enterrados, evitando cargas pontuais e favorecendo o crescimento vegetal.

2.12.2 Aquecimento solar

No Brasil, porém, a instalação de painéis de aquecimento solar é mais difundida, e, dado o uso em massa de chuveiros elétricos, indica ser mais eficiente que os fotovoltaicos. Necessitam, porém, de uma caixa d'água extra isolada termicamente, além de tubulação de água quente, além de um sistema de aquecimento complementar (gás, elétrico), enquanto o PV exige apenas baterias. Não parece haver benefício de instalar o sistema sobre tetos verdes, podendo até mesmo baixar sua eficiência, já que depende de energia térmica solar.⁶⁴

64 Cf. ABNT NBR 15569:2008 Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto - Projeto e instalação

2.12.3 Aproveitamento de chuva

Um aproveitamento de água de chuva exige que não haja aplicação de fertilizantes sobre os tetos verdes.⁶⁵

⁶⁵ Cf. ABNT NBR 15527:2007 - Água de chuva - Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis - Requisitos.

Capítulo 3 – Base socioeconômica

As coberturas verdes dependem da propriedade privada para uma adoção significativa; ou seja, sua instalação deve ser desejada e contratada por agentes individuais, com vontades e prioridades próprias. O ponto fundamental para sua adoção em massa é, portanto: *por que um proprietário colocaria uma cobertura verde em seu edifício?*

Aliás, por que ele faria qualquer coisa que beneficie o coletivo, quando isso envolve custos privados? Tal questão é fundamental à Economia Ambiental e ao Direito Ambiental, assuntos pesquisados para o elaboração deste item, onde serão respondidas as questões relativas a incentivos, motivações e custos da tecnologia dos tetos verdes, e qualquer tecnologia ambiental em geral.

“Incentivos” podem ser interpretados de modo geral como motivações que guiam atitudes. Levitt (2005) divide essas motivações em três classes: econômica, social e moral. Por exemplo, a campanha americana contra cigarro inclui um imposto especial sobre produto⁶⁶ (a motivação econômica), restrição do fumo em locais públicos (motivação social) e a afirmação (dúbia) pelo governo americano que a venda de cigarros no mercado negro alimenta o terrorismo (motivação moral) (LEVITT, 2005). Do mesmo modo, uma pessoa evita cometer o crime de roubo por ter motivação moral (roubar é errado), motivação social (a opinião dos amigos e familiares caso descubram o roubo; reputação) e motivação econômica (encarceramento, perda de emprego) para não fazê-lo.

No caso dos tetos verdes, motivações econômicas seriam uma relação de custo–benefício vantajosa, um desconto no IPTU, um subsídio direto, o direito a uma construção mais alta, evitar uma multa ou taxa etc. Já motivações sociais incluem sua reputação como ecologicamente correto, ou o fato de todos os

⁶⁶ “sin tax”

vizinhos estarem instalando a tecnologia (comportamento de manada). Por fim, motivações morais incluem a satisfação pessoal de estar ajudando na prevenção de inundações, do aquecimento urbano, no abrigo da avifauna local etc.

O que normalmente se pensa como “incentivos” são os econômicos, seu significado confundindo-se com “subsídio” (“Recebi um incentivo econômico de R\$ 100 para instalar esse painel fotovoltaico”). É a categoria mais explorada historicamente em políticas públicas, com um rico acervo de soluções testadas, e formará o grosso deste item. As motivações sociais são subestimadas, ou mesmo compreendidas erroneamente, assim como as morais. Atualmente, estudam-se as duas últimas classes na Economia Comportamental (*Behavioral Economics*); elas serão expostos de modo breve.

motivações econômicas	individuais	racionais (custo–benefício)			pág. 85
		irracionais	informação	aversão à ambi- guidade	pág. 289
				relatos informais	
			tendências	tendência para o status quo	pág. 290
				efeitos da prede- finição	
				heurística da disponibilidade	
				efeito da valida- ção	
			escolha inter- temporal	autocontrole	pág. 291
				procrastinação	
			contexto decisório	escalonamento de escolhas	pág. 292
				aversão à perda	
				escolha de pala- vras	
				arquitetura da escolha	
	coletivas (externali- dades)	normativas (command and control)	padrão de qualidade		pág. 97
			limite de emissão		
			tecnologia		
		mercadológicas	subsídio	direto	pág. 103
				indireto	
			taxa corretiva (pigouviana)		
			mercado de permissões		
		privadas	teorema de Coase		pág. 115
	caridades/ONGs				
motivações morais	ética				
motivações sociais	descritiva				pág. 119
	injuntiva				

3.1 Motivações econômicas

Qualquer fator que afete uma decisão por um motivo econômico, curto ou longo prazo, financeiro ou não, positivo ou negativo, é uma motivação econômica. O mercado (oferta e procura) é a maior janela para essas motivações, e existem modelos com diversos graus de complexidade que procuram explicar e prever suas tendências.

Primeiramente, se analisam os benefícios privados, ou seja, se uma tecnologia tem uma relação custo–benefício vantajosa. Nem sempre ela é clara, devendo ser exposta para fins de divulgação.

Caso os benefícios coletivos sejam importantes, mas os custos privados não valham a pena (ou a percepção de custo–benefício seja baixa), pode-se lançar mão de políticas públicas para seu incentivo, que variam de soluções normativas a soluções mercadológicas ou privadas.

3.1.1 Benefícios individuais: custo–benefício

A suposição inicial é que um agente individual fará o que lhe é mais vantajoso economicamente, não importando o prazo de retorno, e sempre com plena consciência de todos os fatores envolvidos. Ou seja, é um *agente racional*, com *informação “perfeita”* (adequada). Assim, por exemplo, se uma cobertura verde retornar seu investimento em 20 anos, dando lucro a partir de então, o modelo suporia que o agente escolhesse essa opção.

Nem sempre essas suposições são verdadeiras. O agente pode não ter consciência das vantagens econômicas de um teto verde, ou pode crer erroneamente que outra solução seja melhor; há *informação “imperfeita”* (insuficiente ou equivocada). Do mesmo modo, mesmo sabendo desses fatos, ele pode escolher não instalar as coberturas, por motivos “irracionais” (receio, preconceito etc.). Ambos os casos constituem em *falhas de mercado*.

3.1.1.1 *Análise Custo–Benefício*

Custos e benefícios são de diversas naturezas; alguns são iniciais, outros são constantes. Uma boa análise de custo–benefício leva em consideração todos eles, e em que ponto os benefícios superam os custos (caso isso ocorra). A seguir, serão descritos diversos fatores de forma qualitativa:

- **custo fixo inicial:** o custo de instalação da tecnologia, incluindo:
 - **projeto** (engenheiro, arquiteto, paisagista, biólogo etc. no caso de um original; ou, no caso da adaptação, inclui também sondagens);
 - **materiais** (impermeabilização, substrato, plantas, outros sistemas como irrigação etc.);
 - **mão de obra** (demolições, construção, transporte, plantio).
- **custo operacional:** custo da eletricidade no caso de um ar-condicionado, por exemplo. Valor mensal.
- **custo de manutenção:**
 - eventuais reparos (laje, drenagem, goteiras);
 - poda e retirada de ervas daninhas (no caso de teto verde);
 - limpeza (no caso de cobertura cinza ou ar-condicionado)
 - checagem periódica.
- **custos de ajustes:** tributos corretivos ou pigouvianos, que visam mudança de comportamento; podem ser vistas como a internalização dos danos causados a terceiros.⁶⁷
- **custo de troca:** após a longevidade do sistema se expirar. Pode ser considerada um novo custo inicial de instalação.
- **custo irrecuperável** (*sunken cost*): custo do que já foi realizado no passado, e que não se pode mais recuperar; um valor perdido. Um exemplo seria a retirada de um telhado cerâmico para instalação de um teto verde; aquele valor que havia sido gasto com a instala-

67 Cf. 3.1.7 Taxa corretiva, pág. 108.

ção do telhado cerâmico é um custo irrecuperável. *Esse custo não deve ser levado em consideração.*

- **custo de oportunidade:** custo invisível que compara duas situações possíveis — o que se deixa de ganhar é tido como um prejuízo. No caso da vegetação urbana, por exemplo, um parque tem um alto custo de oportunidade, por ser uma área que poderia ter outros usos lucrativos ou valiosos; já uma cobertura é um espaço subutilizado, sendo que seu esverdeamento tem baixo custo de oportunidade.

Benefícios financeiros incluem:

- **economia de energia:** valor economizado na operação de sistemas de condicionamento ativo.
- **subsídio inicial:** fornecido diretamente pela instalação do teto verde, ou descontado nos tributos dos materiais/instalação.
- **subsídios constantes:** desconto em tributos, como o IPTU.⁶⁸

O custo total em longo prazo deve ser analisado incluindo custos operacionais e de manutenção, sempre analisando-se dois cenários: com e sem a intervenção.

Para Ferraz (2011), em uma comparação com coberturas cerâmicas, uma cobertura verde economiza por reduzir custos com condicionamento ativo. Porém, a maioria da população brasileira não tem gastos com ar-condicionado em residências. Assim, uma climatização passiva não implica necessariamente em uma economia de eletricidade, já que não há a climatização ativa (e seus custos financeiros) sendo substituída. Como é possível, portanto afirmar que haveria economia financeira com a instalação de tetos verdes, se não há sequer gastos financeiros com condicionamento artificial? Como o teto verde vai recuperar seu custo se colocá-lo não reduz a conta de energia (caso não substitua algum ar-condicionado)?

68 Cf. 3.1.6 Soluções mercadológicas: taxas e subsídios, pág. 103.

Podem-se considerar os valores de oportunidade: se um teto verde puder substituir um aparelho de ar-condicionado, então ele já valeria o valor daquele aparelho, já que não haveria mais desejo pelo morador de instalá-lo, portanto diminuindo a possibilidade futura de sua compra e uso.⁶⁹ Ao mesmo tempo, mesmo que o agente instale o condicionamento ativo após um teto verde, *seu custo operacional será mais baixo*, podendo mesmo compensá-lo em longo prazo.

⁶⁹ Supondo-se que tenham os desempenhos idênticos, e que fossem percebidos pelo agente como substitutos equivalentes; por outro lado, um aparelho pode ser considerado um objeto de desejo; aí o agente estaria pensando “irracionalmente”.

Gráfico 1 Custo–benefício dos tetos verdes.

(a) custo inicial (construção, projeto etc.)

(b) benefício inicial (subsídio)

(c) custo constante (manutenção)

(d) benefício constante (economia de energia, descontos nos impostos)

(e) valores somados. O ponto de compensação é quando o investimento começa a se pagar.

3.1.1.2 Fatores irracionais na tomada de decisão

Mesmo valendo a pena financeiramente, pode ser que o agente não queira colocar um teto verde por motivos “irracionais”. Existem inúmeros fatores estudados pela Economia Comportamental que afetam as tomadas de decisões, mas que não são levados em consideração nos modelos econômicos clássicos, que supõem que “as pessoas tomam decisões maximizando a função de utilidade na qual todas as restrições e preferências são devidamente incluídas e ponderadas”:

A teoria tradicional supõe que indivíduos possuem informação completa e são capazes de processar essa informação, que indivíduos são tomadores de decisão racionais, e que suas preferências são bem definidas e constantes ao longo do tempo (KNOLL, 2010, tradução nossa).⁷⁰

Esse pensamento racional, ponderado e controlado pode ser chamado de *Processamento de Sistema 2*; por outro lado, as pessoas tendem a tomar decisões intuitivamente através do *Processamento de Sistema 1*, “automático, intuitivo, rápido e emocional”, especialmente quando não há tempo ou capacidade cognitiva de processar toda a informação — o processo decisório acaba sendo influenciado por aspectos emotivos.

Inúmeros estudos mostram como diversos preconceitos e tendências fogem do modelo do indivíduo economicamente racional (“*Homo economicus*”). Esses fatores devem ser levados em consideração na elaboração de quaisquer políticas públicas, de modo a evitar consequências inesperadas, ou mesmo explorá-las.

Knoll (2010), em uma revisão em relação ao comportamento frequentemente autodestrutivo que indivíduos possuem para a aposentadoria, separa as “irrationalidades” em algumas categorias:

⁷⁰ “[...] people make decisions by maximizing a utility function in which all of the relevant constraints and preferences are included and weighed appropriately [...]. Traditional theory assumes that individuals have full information and are able to process this information, that individuals are rational decision makers, and that individuals’ preferences are well-defined and constant over time.” (KNOLL, 2010).

A **primeira categoria** lida com questões da informação, como *aversão à ambiguidade*, (a tendência a evitar tomar decisões quando algumas das informações relevantes é desconhecida ou pouco clara) e dependência excessiva em *relatos informais*. Mesmo se os tomadores de decisão tivessem informação completa e precisa, porém, descobertas empíricas sugerem que eles ainda tomariam decisões imperfeitas como resultado de questões relativas à **segunda categoria**, heurística e tendências. A tendência para que indivíduos desproporcionalmente apoiem a alternativa do status quo (*tendência ao status quo*), e a influência sistemática da opção predefinida na escolha (*efeitos da predefinição*) são anomalias ou tendências que não são levadas em consideração por modelos econômicos tradicionais. Além disso, indivíduos lançam mão de heurística, ou *regras práticas*, que são geralmente benéficas mas pode desviar os tomadores de decisão. A **terceira categoria**, *escolha intertemporal*, envolve questões de *autocontrole*, *procrastinação*, *desconto hiperbólico* (ou seja, alterações nas preferências conforme o evento futuro se aproxima), e *emoções* que afetam o comportamento de poupar. **Finalmente**, julgamento e tomada de decisão e pesquisa em Economia Comportamental demonstram o impacto do contexto decisório na escolha; essa pesquisa destaca como *dependência da referência* e alterações simples no modo em que as opções são apresentadas, consideradas ou arranjadas (*escalonamento de escolhas*, *efeitos de emolduramento*, e *arquitetura da escolha*) podem ter efeitos profundos nas escolhas que os indivíduos acabam fazendo (KNOLL, 2010, tradução nossa, itálico do autor, grifo nosso).⁷¹

No caso de tetos verdes, tanto a falta quanto o excesso de informação podem paralisar o agente, que evitará a ambiguidade colocando uma cober-

71 “The first category deals with informational issues, such as ambiguity aversion (the tendency to avoid making decisions when some of the relevant information is unknown or unclear) and an overreliance on anecdotal evidence. Even if decision makers had complete and accurate information, however, empirical findings suggest that they would still make suboptimal savings decisions as a result of issues related to the second category, heuristics and biases. The tendency for individuals to disproportionately endorse the status quo alternative (status quo bias) and the systematic influence of the default option on choice (default effects) are anomalies or biases unaccounted for by traditional economic models. Additionally, individuals make use of heuristics, or rules of thumb, which are generally beneficial but can lead decision makers astray. The third category, intertemporal choice, involves issues of self-control, procrastination, hyperbolic discounting (that is, a change in preference as a future event draws closer), and emotions that can affect savings behavior. Finally, JDM and behavioral-economics research demonstrates the impact of the decision context on choice; this research highlights how reference dependence and simple changes in the way options are presented, considered, or arranged (choice bracketing, framing effects, and choice architecture) can have profound effects on the choices individuals ultimately make” (KNOLL, 2010).

tura tradicional, que também pertence ao *status quo* (“para que mudar?”) e é normalmente a opção predefinida (“você deseja colocar um teto verde?”, em vez de “você deseja colocar uma cobertura tradicional?”). Além disso, seus benefícios são subestimados por serem a longo prazo.⁷²

Assim, os benefícios ao agente individual não devem ser suficientes *apenas* para compensar os custos, como também vencer inúmeras barreiras psicológicas⁷³ relacionados à qualidade da informação, a tendências e preconceitos, à mudanças nas preferências ao longo do tempo e ao contexto em que a decisão será feita.

3.1.2 O impacto coletivo: externalidades

Além dos benefícios individuais e apesar das dificuldades do convencimento mesmo diante de sua garantia, a instalação de tetos verdes, sendo uma tecnologia ambiental, é de interesse público (redução de enchentes, aquecimento urbano, biodiversidade etc., que serão detalhados nos capítulos seguintes). Porém, como já colocado, um agente individual pode não ter motivação econômica para perseguir a solução, já que, ao contrário dos benefícios, que também são coletivos, os custos são exclusivamente *privados*.

A colocação de teto verde envolve uma *externalidade*, ou seja, uma decisão individual que afeta terceiros. Em particular, trata-se de uma externalidade *positiva*, insuficientemente perseguida pelo benefício que traz à coletividade.

Outro exemplo de externalidade positiva é a vacinação — o benefício público é grande (prevenção da difusão de doenças, maior produtividade em geral, menor gasto em saúde), mas há insuficiente incentivo privado para a atividade (i.e. sem intervenção, a vacina é cara demais para o benefício que o indivíduo terá). Em outras palavras, há beneficiários que não pagam pelos benefícios que recebem. Isso leva a uma falta de incentivo satisfatório para a

72 Cf. Apêndice D - Irracionalidades, pág. 289., para descrições individuais de cada irracionalidade.

73 Os efeitos psicológicos afetam a todos, até mesmo *experts* na respectiva área.

compra de vacinas por indivíduos, pois não se abatem do custo privado os benefícios a terceiros.

Mais exemplos de atividades com externalidades positivas incluem educação (aumento de produtividade, diminuição da violência), parques e jardins (aumento da área permeável, redução do aquecimento urbano), criação de abelhas (polinização de frutíferas que beneficia agricultores), transporte público (menor poluição do ar, menor uso do espaço viário), pesquisa e desenvolvimento (novas tecnologias que beneficiam a sociedade) etc.

Por outro lado, quando uma atividade individual *prejudica* terceiros, configura-se então uma *externalidade negativa*. Por exemplo, uma grande edificação (e.g. shopping) que descarta enormes quantidades de águas pluviais sem controle contribuirá indiretamente para causar enchentes que causam prejuízo a terceiros, como a destruição de propriedade e/ou problemas de saúde. É assim uma atividade perseguida em excesso, mais do que o que seria ideal (MANKIW, 2011).

Exemplos de atividades com externalidades negativas incluem qualquer degradação ambiental em geral, assim como transporte particular (maior poluição ambiental, ineficiência no uso do espaço viário), cigarro (danos de saúde a fumantes passivos, custos ao sistema de saúde público), combustível (novamente poluição do ar), bebidas alcoólicas (maior custo com policiamento, acidentes de automóvel), embalagens e sacos plásticos (resíduos sólidos) etc.

No caso de uma fábrica que polui o rio, essa poluição tem o efeito de prejudicar a pesca e agricultura locais, obrigando o uso de soluções caras aos pescadores e agricultores, ou mesmo encerrando suas atividades, trazendo danos econômicos à região. Pode-se dizer que o produto da fábrica é *mais caro* à sociedade do que seu preço comercial diz. Seu custo *social* deveria levar em consideração não só o custo *privado*, como também o custo *externo*.

Um agente racional leva em consideração apenas os *custos privados* em sua tomada de decisão. Em uma externalidade negativa, o custo privado é

menor que custo social. Assim, o agente privado *sobreproduz*. Em uma externalidade positiva, o custo privado é maior que custo social. Assim, o agente privado *subproduz* (MANKIW, 2011).

Ambos configuram em “falhas do mercado”, ou seja, quando a lei de equilíbrio do mercado (oferta e procura) sozinha não consegue levar a uma máxima eficiência social. Em outras palavras, o transporte particular é utilizado em excesso e a um preço baixo demais para o dano que causa, e a vacina é vendida em quantidade baixa demais e a um preço excessivamente alto para os benefícios que traz.

$$\text{custo privado} + \text{custo externo} = \text{custo social} \quad (1)$$

O papel do poder público é corrigir essas falhas. Basicamente, ele deve buscar incentivar atividades com externalidades positivas, e coibir as com externalidades negativas. Para esses fins, o poder lança mão de diversos instrumentos: soluções normativas (*command-and-control*), mercadológicas e privadas. Antes, porém, é interessante avaliar a questão dos danos ambientais à luz das externalidades negativas.

3.1.2.1 A inevitabilidade dos danos ambientais

Toda atividade econômica (incluindo ocupação urbana) causa poluição ou danos ambientais; é impossível eliminá-los completamente, já que são efeitos colaterais de atividades socialmente *úteis e desejáveis* (BUGGE, 2004). Afinal, produtos devem ser fabricados, e pessoas precisam morar em algum lugar. A sociedade assim determina um limite aceitável para os danos, e pune os excessos. Esse limite deve ser estabelecido de modo socialmente consciente, para evitar distorções distributivas (i.e. que os mais pobres carreguem o fardo) e econômicas (i.e. que empresas entrem em falência).

Por exemplo, uma fábrica que não esteja sob a jurisprudência de nenhuma lei ambiental poderia poluir livremente, barateando seus produtos, mas cau-

sando prejuízo a outros, como atividade de pesca próxima ou danos à saúde da população. Configura-se um mercado desregulado. Assim, por mais que haja, sim, benefício econômico advindo da fábrica, a economia como um todo é prejudicada.

Em outro extremo, poderia haver uma legislação tão rigorosa que puniria qualquer poluição, por menor que fosse — por exemplo, poderia exigir a contenção hermética de todo o ar interno à fábrica, mesmo que o único agente poluidor fosse mera poeira. Longe de ser o ideal, essa solução inibiria por completo a atividade econômica da fábrica; aliás, mesmo a pesca seria proibida (já que também provoca alguma poluição inevitável, como o motor do barco) — a economia como um todo é inviabilizada, sendo que o benefício é mínimo. Em outras palavras, o dano da poeira era baixo demais para o enorme *custo de abatimento*. Assim, deve-se buscar uma solução intermediária, em que os custos de abatimento sejam condizentes com o dano da poluição — seria perfeitamente razoável a contenção hermética caso se tratasse de uma poluição radioativa, por exemplo.

De modo similar, toda ocupação urbana é poluidora e prejudicial ao ambiente, pelo menos comparada a uma área não ocupada — há desmatamento, consumo de energia, geração de lixo etc. Se por um lado uma atitude completamente permissiva⁷⁴ provocaria externalidades negativas em excesso (por exemplo, uma edificação que impermeabilizasse todo o terreno contribui para cheias urbanas, causando prejuízo aos moradores das áreas alagáveis), por outro lado, exigir um critério impecável de supressão de danos ambientais poderia tornar qualquer ocupação inviável (alguma vegetação precisa ser suprimida; alguma área tem que ser impermeabilizada etc.), o que entra em conflito com as necessidades econômicas e sociais da cidade.

Assim, a legislação ambiental busca o método mais eficiente de redução de danos ambientais, procurando primeiro eliminar aqueles facilmente contro-

74 Essa situação, longe de ser hipotética, ocorre em muitos locais informais onde não há poder do Estado.

láveis (i.e. com menor custo marginal de abatimento) e com maior benefício, progressivamente encarecendo as medidas.

3.1.3 Soluções normativas: command-and-control

A solução mais simples e tradicional é a mera obrigação. No caso dos tetos verdes, obrigar-se-ia, por exemplo, sua instalação por força de lei, sob risco de sanções legais. Esse tipo de solução é chamado de *command-and-control*⁷⁵, sendo preferida por legisladores por seu impacto psicológico e percebida força. O indivíduo se responsabiliza por todos os custos decorrentes: a instalação do teto verde, o preço da vacina, a construção de piscinão no caso do shopping etc. A falta de flexibilidade, porém, pode levar à obrigação de uma solução que não é a mais barata.

EPA (2013) divide os tipos de soluções normativas em:

- **Padrões ambientais:** estabelece-se um nível de poluição máximo com margem de segurança que assegure a minimização dos danos ao ambiente e à população. Nesse caso, não são levados em consideração custos, o que pode levar a uma ineficiência:

Por focarem apenas em melhorias ambientais, padrões ambientais provavelmente serão estabelecidos em um nível demasiado ambicioso; altos custos podem surgir para atingir melhorias incrementais na qualidade ambiental que valem bem menos do que custam (EPA, 1997, tradução nossa).⁷⁶

Um exemplo é estabelecer um limite de concentração de poluente atmosférico, como de ozônio ou material particulado, como faz a OMS.

- **Controle de emissões ou efluentes:** aplicado às fontes individuais, i.e. cada fábrica/ocupação pode lançar uma quantidade específica

75 comando e controle

76 “By focusing only on environmental improvement, ambient standards are likely to be set at too ambitious a level; large costs may be incurred to achieve incremental improvements in environmental quality that are worth far less than they cost.” (EPA, 1997).

de poluentes/águas pluviais; qualquer quantia acima do limite deverá ser retida por uma tecnologia qualquer.⁷⁷

- **Exigências tecnológicas:** estabelecimento de técnica ou equipamento obrigatório para o controle da poluição/descarte. Os exemplos são inúmeros: catalisadores em automóveis, “piscininhas”, ou os próprios tetos verdes. Tendem a ser menos eficientes que o controle de emissões/efluentes, já que o último mantém liberdade de escolha. Exigências tecnológicas podem encurralar empresas/proprietários e desencorajam mudança e inovação. As vantagens são quando as emissões são difíceis de serem medidas ou há dificuldade de aplicação de uma taxa corretiva ou outras soluções mercadológicas. Por esse motivo, elas se mantêm populares apesar de sua ineficiência. Mesmo assim, há a possibilidade de se permitirem diversas tecnologias “equivalentes”, ou a sua combinação.

As soluções proibição ou obrigação tem a vantagem de ser um forte controle centralizado do comportamento individual. A desvantagem é a privação do direito de escolher por parte do indivíduo. Para se justificar uma imposição *command-and-control* (em vez de alguma solução de mercado) algumas condições devem estar presentes:

- **Irreparabilidade:** A ação é intolerável por ser virtualmente impossível de ser reparada. Por exemplo, a emissão de metais pesados pode ser considerada de difícil reversão. Assim, as externalidades teriam valores altíssimos a ponto de não poderem ser compensadas com soluções mercadológicas.

⁷⁷ O limite em si pode ser estabelecido de diversas maneiras: define-se uma quantidade total a ser emitida, e então se distribui o direito de emissão aos poluidores individuais (neste caso, a criação de novas fontes é prejudicada, a não ser que se redistribuam os direitos); outra opção é o estabelecimento de uma quantidade de poluição por quantidade produzida/área ocupada — inicia-se pelas fontes com menor custo incremental de controle (quando possível), e segue-se sucessivamente para as mais caras e menos eficientes (o que é difícil na prática).

- **Custo-benefício:** a sociedade entende que a ação é injustificável dados seus enormes danos e pouco esforço de correção. Não vale a pena tolerá-la. Um exemplo é jogar lixo na rua.

3.1.4 Fiscaliza-se o dano ou a tecnologia?

A exigência tecnológica leva à questão se o teto verde deveria ser priorizado como um fim em si (incentivar os tetos verdes diretamente), ou apenas uma ferramenta para outros fins (fiscalizar o dano diretamente, independente de o teto verde ser uma das soluções).

A princípio, um teto “cinza” não deveria ser punido diretamente apenas pelo fato de ser cinza, e sim por causar certos danos ambientais ou sociais comprováveis (aquecimento urbano, escoamento superficial, ausência de vegetação etc.). Teoricamente, policiando-se esses danos, automaticamente se chegaria aos tetos cinza. Ou seja, fiscalizando-se descarte de águas pluviais, por exemplo, se chegaria aos tetos cinza por estes descartarem maior quantidade dela. Caso resolvesse esses danos de alguma outra maneira (piscininha, cisterna etc.), uma construção com teto cinza poderia ser até mais sustentável que uma construção com teto verde.

Assim, temos uma primeira estratégia para responsabilização individual que constitui em avaliar um dano diretamente — não seria necessário fiscalizar uma construção pela presença ou não de uma tecnologia específica, e.g. uma casa que joga sua água pluvial na rua seria responsabilizada diretamente por sobrecarregar o sistema de drenagem público (por taxa, multa etc.). Reciprocamente, não importa a tecnologia que essa casa adotaria para deixar de descartar, contanto que resolva o problema.

Essa estratégia tem a vantagem de ser intrinsecamente justa, já que a punição é ligada diretamente ao dano, além de permitir uma gama de tecnologias; i.e. o proprietário pode escolher instalar piso permeável, construir um reservatório de água, colocar um teto verde etc. Nesta abordagem, o estado se

retira da escolha da tecnologia, enxergando apenas a mitigação ou eliminação do dano.

Mesmo assim, pode-se entender que a presença de teto cinza seja injustificável se não houver dúvida de sua desvantagem. A segunda estratégia é então avaliar as *tecnologias* adotadas — indiretamente se examinando o dano.

Um exemplo é o descarte de esgoto nos rios. Não é necessário provar que o descarte causou doenças a alguém; mesmo que o descarte tivesse, em última análise, sido totalmente inofensivo, ainda se entende que as chances de prejuízo a outros e ao meio ambiente é grande demais para aceitar o risco, além dos danos serem virtualmente impossíveis de serem rastreados ao causador.

Assim, o uso da estratégia tecnológica é válido nas seguintes condições:

- **Relação forte de causa e efeito:** se a tecnologia for inegavelmente efetiva na resolução do problema. Pode-se entender, com um alto grau de certeza, que a permeabilização de um terreno ajude na diminuição do descarte de águas pluviais. O estado então fiscaliza a permeabilidade, implicitamente verificando o descarte. Essa relação de causalidade, porém, nem sempre é fácil de ser estabelecida — banir armas de fogo reduz crimes violentos? A redução na emissão de gás carbônico mitiga o aquecimento global? etc.
- **Facilidade de fiscalização:** quando a tecnologia tem maior facilidade de fiscalização comparada ao dano — medir a quantidade de água pluvial que um terreno descarta pode ser impraticável (e.g. necessitaria de vistorias durante chuvas). Nesse caso, escolhe-se fiscalizar sua permeabilidade (e.g. com fotos de satélite, visita ao local), que garante a redução do descarte (sempre com um grau de certeza aceitável). Outros exemplos são os regulamentos tecnológicos de emissões industriais — obriga-se o uso de um filtro específico na chaminé por ser mais fácil de fiscalizar que a emissão em si. A facilidade depende também do contexto e da escala.

Fiscalizar o descarte de esgoto é mais fácil que fiscalizar o descarte de águas pluviais, porém mais difícil de fiscalizar que descarte de dejetos industriais em um rio.

- **Facilidade de implantação:** de modo similar, nem sempre o agente individual consegue saber como eliminar seu dano. O estado então guia a escolha da tecnologia — permeabilizando-se uma parcela do terreno, o estado considera o problema resolvido, sem o agente necessitar de pesquisa, cálculos, projetos etc. para chegar a uma solução alternativa; não há necessidade de se provar o desempenho individual.
- **Versatilidade:** Quando uma tecnologia resolve múltiplos problemas. Um ajardinamento, além de favorecer a permeabilidade, pode promover a fauna, reduzir o aquecimento urbano, restaurar lençol freático etc. Assim, entende-se que, dados seus inúmeros benefícios, a solução é inegavelmente eficaz, mesmo que, individualmente, esses benefícios talvez não o sejam. Novamente, dá-se prioridade à praticidade.

A sociedade decide então quais exceções e alternativas são justificadas e aceitáveis — um terreno 100% impermeável pode conseguir uma autorização especial caso evite o descarte das águas lançando mão, por exemplo, de tetos verdes e reservatórios, em vez da permeabilização. Tal escolha dependerá:

- **da fé no poder de inovação dos agentes**, que, por sua vez, depende do estado da arte da tecnologia, das condições mercadológicas etc. Deve-se permitir o filtro de raízes como solução alternativa à coleta de esgoto? A tecnologia é difundida o suficiente para permitir exceção?
- **das condições de fiscalização do estado**, como já exposto.

Existem ainda soluções intermediárias — várias tecnologias equivalentes ou sua combinação, ou o uso de índices práticos, como o BFF.

No extremo de precisão encontram-se os critérios de desempenho (*performance based criteria*), utilizados quando há sofisticação suficiente, tanto por parte do avaliado, como do avaliador.

Gonçalves e Duarte (2006) comentam em relação a certificações de sustentabilidade de edificações:

A relação dos indicadores de sustentabilidade com uma série de critérios de desempenho e a complexidade das avaliações pressupõe um processo de projeto apoiado por ferramentas de simulação computacional. Em termos de método, a tendência mundial para execução dessas análises é o **sistema de pontuação e peso** (GONÇALVES; DUARTE, 2006, p. 58, grifo nosso).

Assim, existe um dilema entre *praticidade* e a *precisão*. De um lado, um critério preciso demais pode ser impossível de ser avaliado, sendo que o trabalho extra traz poucos benefícios; por outro lado, uma excessiva praticidade pode ser simplista ou até injusta aos olhos do avaliado, sem permitir inovações. Podem-se assim estabelecer três níveis de exigências, da mais “prática” à mais “precisa”:

Nível 1 – Tecnologia

Exige uma solução específica:

- simples;
- restrita (baixa flexibilidade);
- única solução: “*Faça isso e o problema estará resolvido*”;
- facilidade de fiscalização;
- vantagem de ser pouco ambígua e exigir pouco desgaste na hora de projetar.
- *Exemplo: leis das “piscininhas”*⁷⁸

⁷⁸ Cf. 7.2.3.2 Leis das “piscininhas”, pág. 217.

Nível 2 – Índice

Baseado em pontuação e pesos:

- mais complexa;
- flexibilidade média;
- combinação de várias soluções, de acordo com conta simplificada, pontuação ou peso, com fórmula fornecida pelo governo: “*Chegue nesse coeficiente e estará resolvido*”;
- dificuldade média de fiscalização e aprovação.
- *Exemplos: BFF, LEED*

Nível 3 – Simulação

- muito complexa;
- alta flexibilidade;
- qualquer solução satisfatória: o agente faz as contas e prova que resolve o problema;
- dificuldade alta de fiscalização e aprovação; pode exigir pagamento de especialistas terceiros que comprovem a solução;
- incentivo à criatividade e inovação.

Gonçalves e Duarte (2006) comentam:

Em muitos casos, o projeto e a operação de edifícios aclamados como ícones de uma arquitetura sustentável são marcados por um alto grau de experimentação e complexidade. Por essa razão, uma investigação criteriosa, a fim de testar a veracidade dessas propostas, aclamadas como inovadoras e de baixo impacto ambiental, representa uma importante contribuição para a elaboração de modelos futuros. No entanto, a abrangência e a complexidade do tema têm se refletido na dificuldade e no desafio de estabelecer parâmetros de análise apropriados para cada caso (GONÇALVES; DUARTE, 2006, p. 58).

Mesmo assim, “como toda inovação, nem tudo o que é apresentado em tais projetos tem o desempenho esperado inicialmente”, e “enquanto o

experimento continua sendo incentivado, uma constante revisão crítica é fundamental para a evolução e o sucesso de novas propostas dentro do tema” (GONÇALVES; DUARTE, 2006, p. 60).

3.1.5 Regulamentos normativos relacionados a tetos verdes

Em geral, regulamentos normativos funcionam melhor com construções novas que passam por um processo de aprovação.

Funcionam de modo menos eficaz em áreas já ocupadas; a obrigatoriedade de tetos verdes em edificações existentes não é impossível, devendo, porém, ter critérios menos rígidos, já que nem sempre é possível garantir sua aplicabilidade. Portanto, normalmente se combinam *regulamento* para novas áreas e *incentivos* para áreas consolidadas.

Regulamentos são importantes também se incentivos forem financeiramente inviáveis.

Algumas cidades alemãs obrigam que coberturas planas em edifícios públicos tenham vegetação para encorajar o setor privado (NGAN, 2004). Stuttgart reserva anualmente verba para esverdeamento desse tipo de edifício, que ocorre quando são reformados (LAWLOR et al., 2006, p. 71).⁷⁹

Tóquio obriga que ao menos 20% de uma cobertura seja verde em construções novas ou anexos maiores que 1000 m², ou 250 m² para edifícios públicos, com previsão de multa de 200 000 yens, ou \$2.000 dólares (LAWLOR et al., 2006, p. 77).

Exemplo de regulamentação de um município alemão:

Todo edifício com coberturas planas e com inclinação de até 15 graus [25 %] devem ser permanentemente vegetados com plantas rasteiras. Áreas com deterioração na vegetação igual a 5 m² ou mais devem ser replantadas. Coberturas com área total de menos de 10 m² estão livres dessa exigência, porém devem ser mantidas em bom estado de conservação.

79 “To demonstrate its commitment to green roof development and environmental improvements, Stuttgart has been greening the roofs of public buildings since 1986. It sets aside 90,000 [euro] annually, with most green roofs being installed when the roof is due to be replaced.”

Substratos devem ter no mínimo 8 a 10 cm de espessura, e as plantas, sementes e brotos devem ser nativas da região (LAWLOR et al., 2006, p. 13, tradução nossa).⁸⁰

3.1.6 Soluções mercadológicas: taxas e subsídios

Outra classe de solução às externalidades são as *mercadológicas*, ou seja, manipula-se o preço para que uma atividade seja mais perseguida, essencialmente alterando a relação custo-benefício. Para os tetos verdes, poder-se-ia conceder um desconto no IPTU, ou subsidiar a fabricação de materiais ou instalação, ou mesmo aplicar uma taxa corretiva sobre tetos “cinza” (não vegetados). De qualquer modo, torna-se a opção mais vantajosa financeiramente em relação às outras; em outras palavras, internalizam-se as externalidades.

São adequadas para áreas já consolidadas (i.e. *retrofit*), onde regulamentos normativos são difíceis de impor (NGAN, 2004).

Subsídio direto: pagamento

O estado arca com determinados custos da construção da cobertura ou fachada verde, chegando a 50% do custo por metro quadrado em alguns municípios alemães. É vital que haja critérios claros para as coberturas verdes, e que esses sejam verificados em alguma fase do planejamento, construção e manutenção (LAWLOR et al., 2006).

Porém, verbas podem se esgotar, encerrando programas, como o Programa de Esverdeamento de Pátios (*Hofbegrünungsprogramm*) (NGAN, 2004), em Berlim. Ou pode não haver verba logo de início, com prioridades mais urgentes, como infraestrutura básica no caso da ex-Alemanha oriental (NGAN, 2004).

80 “All buildings with flat and sloping roofs up to an incline of 15 degrees are to be permanently greened with ground-covering plants. Areas of vegetative decline greater than and equal to five m² are to be replanted. Roofs with a total area less than 10 m² are exempt from this rule, however, must be kept in good state. Growing medium depths must be at least eight to 10 cm in depth and plants, seeds, or sprouts must be indigenous to the area.” (LAWLOR et al., 2006, p. 13).

As verbas podem ser conseguidas através de tributos corretivos, configurando então um *subsídio cruzado*.

Subsídio indireto: descontos em impostos

O Imposto sobre Propriedade Predial e Urbana (IPTU) é um tributo municipal com duas funções principais:

- *fonte de arrecadação direta do município*: função primordial, incidente sobre propriedade, que deve seguir princípios de progressividade;
- *instrumento urbano de incentivo*: que reflete uma atual mudança de paradigma em relação à tributação.

O IPTU é calculado de acordo com diversos fatores, sendo o principal o valor do imóvel.⁸¹ O uso do valor, em si, não configura um tributo socialmente progressivo, já que, a princípio, o imposto seria cobrado de modo proporcional a pobres e ricos; a progressividade é atingida principalmente por meio de isenções e reajustes, seguindo a Constituição Federal, que manda que a cobrança de tributos deva ser condizente com a condição financeira do contribuinte.⁸²

Em São Paulo, o IPTU é dividido entre:

- **Imposto Territorial**, mais caro, incidente sobre terrenos vazios e subutilizados, incentivando o aproveitamento do solo urbano;
- **Imposto Predial**.

81 *Valor venal*, ou seja, o valor do imóvel caso ele tivesse que ser vendido em curto prazo; ele assim difere do valor de mercado, que se utiliza de diversos artifícios como negociação e financiamento. O valor venal acaba na prática sendo quase sempre mais baixo, porém pode-se entender que ele continua relativamente proporcional a ele, de acordo com o Código Tributário Nacional.

82 Também chamado de *capacidade contributiva*. Artigo 145 da Constituição Federal:
“§ 1º – Sempre que possível, os impostos terão caráter pessoal e serão graduados segundo a capacidade econômica do contribuinte, facultado à administração tributária, especialmente para conferir efetividade a esses objetivos, identificar, respeitados os direitos individuais e nos termos da lei, o patrimônio, os rendimentos e as atividades econômicas do contribuinte.”

O IPTU não atinge a população toda — de três milhões de contribuintes no município de São Paulo, um milhão são isentos. A isenção pode ter basicamente duas naturezas:

- Convencional (seja justiça distributiva (“social”), compensatória, ética ou política): Uma isenção distributiva ocorre em propriedades que não atingem um valor mínimo, e para aposentados e pensionistas com renda limitada, além de moradias populares. O aspecto compensatório se manifesta no caso da isenção para vítimas de enchente e ex-combatentes ou suas viúvas; o aspecto ético se dá em isenções a instituições culturais e educacionais. Por fim, chama-se de “imunidade” a isenção completa (garantida pela Constituição Federal) de edifícios onde a cobrança poderia ser abusada politicamente, como edifícios públicos federais, estaduais e municipais, sindicatos, sedes de partidos, templos, além de instituições educacionais.
- Incentivo: O uso do IPTU como instrumento urbanístico está alinhado a Constituição Federal e ao Estatuto da Cidade, que reconhecem a *função social da propriedade*, deve estar embasado no Plano Diretor, e representa novo paradigma da função da tributação como incentivo⁸³. Por exemplo, além do valor diferenciado para terrenos vazios (Imposto Territorial), há ainda a figura do *IPTU progressivo no tempo*, que procura punir (incentivo negativo) grandes terrenos não-ocupados,⁸⁴ tendo o proprietário duas

83 O aspecto distributivo do imposto de propriedade urbana já estava presente na Inglaterra no séc. 19, onde o número de janelas de uma residência determinava parcialmente o montante a ser pago (mais janelas = mais rico). O efeito foi que alguns contribuintes fechavam com tijolos suas janelas, o que mostra claramente o poder de influência dos tributos, hoje aproveitado de modo mais intencional.

84 Nesse caso, pode-se em um primeiro momento entender que esse instrumento em particular dá pouca importância ao ambiente, já que um terreno vazio, se entendido como permeável e vegetado, traz menos ônus real ao ambiente que uma edificação; deve-se lembrar, porém, que há aí um alto custo de oportunidade pelo não-aproveitamento da infraestrutura existente; além disso, se for especialmente valioso ambientalmente, ele se encaixará em isenções ambientais (e.g. para APPs).

opções: ocupá-lo e não pagar a progressividade; ou pagá-la e esse dinheiro ser idealmente investido no acesso à moradia.⁸⁵ Além disso, são emitidos *certificados de desconto* sobre pagamento do IPTU (incentivo positivo) no caso de intervenções em áreas estratégicas (área central, região leste e Estação da Luz), cinemas de rua, projetos culturais, recuperação de imóveis tombados, entre outros.

Como a isenção já ocorre por fatores de justiça (distributiva, compensatória e outros) e de incentivo social (positivo e negativo), não há motivo para que não ocorra também para motivar ocupações mais ambientalmente desejáveis (ou até punir as indesejáveis); faz, inclusive, sentido financeiro, já que, teoricamente, haveria uma *economia* por parte do poder público pela dispensa de gastos em outras soluções (e.g. piscinões). Esse tipo de isenção é comumente chamado de “IPTU verde” e deve ser considerada como um “investimento”, por parte do município, em soluções privadas descentralizadas.⁸⁶

Inúmeras cidades brasileiras já utilizam desse instrumento. Destacam-se:

- Guarulhos (SP), que já contava com 43 mil contribuintes isentos antes da implantação da Lei 6.793/2011, que passou a incluir, entre outros, arborização (2%), captação de água pluvial (3%), além dos próprios tetos verdes (3%) como critérios de isenção, que deve ser requerida e pode chegar a 20%. “A implementação do IPTU verde também foi realizada em conjunto com atualização da Planta Genérica de Valores Imobiliários do município (Lei nº 6.793/2010).”

85 A progressividade tem limite de 15% (Seção III, Artigo 7 do Estatuto da Cidade). Passando o prazo de 5 anos, poderá haver desapropriação do imóvel.

86 Mesmo assim, o município deve atentar a Lei de Responsabilidade Fiscal (Lei Complementar nº 101/2000): “Como os descontos e isenções afetam diretamente a arrecadação pública do município, é necessário destacar no Projeto de Lei, e em toda discussão, de onde vai sair o dinheiro para a implementação da política ou apresentar a previsão orçamentária considerando a redução da arrecadação, no caso de incentivos”. Nesse sentido, como todo investimento, deve ser previsto em orçamento (MIELKI, 2011).

- João Pessoa oferece desconto de 10% no caso da manutenção de 30% de área permeável, permitindo para isso o uso de tetos verdes, além de descontos relativos a coleta e reaproveitamento de água de chuva (10%), entre outras medidas, chegando a 50% de isenção.
- Campinas, Valinhos, São Carlos (interior de SP), Curitiba, Maringá (PR), entre muitas outras, apresentam formas de IPTU verde. Nenhuma delas, porém, oferece o teto verde como opção reconhecida para desconto.

Em São Carlos, localizada a 231 km da capital paulista, o incentivo já entra em seu quinto ano consecutivo. As medidas adotadas no município são bem simples, como garantir o **desconto de até 2% aos imóveis que possuam árvores plantadas na calçada em frente e 2% para os imóveis que possuam, no perímetro do seu terreno, áreas efetivamente permeáveis com cobertura vegetal.**

O desconto em São Carlos pode chegar a 24%, caso seja somado a outros descontos tais como adimplência do contribuinte e pagamento em parcela única. As ações foram estabelecidas na Lei no 13.692/2005 e regulamentadas pelo Decreto no 264/2008 (MIELKI, 2011, grifo nosso).

- No município de São Paulo, o uso do IPTU verde está limitado à isenção de até 50% caso o terreno tenha cobertura arbórea ou APP.

Assim, além de ser reconhecido pelo Estatuto da Cidade como importante instrumento urbanístico, ele já é aproveitado em inúmeras municipalidades, em maior ou menor grau, para incentivo de práticas ambientais, podendo ser facilmente adaptado para estimular tetos verdes.

Em relação ao orçamento, novamente pode ser criado um sistema de subsídio cruzado, onde o pagamento de taxas corretivas financia os descontos no IPTU. Além disso, como já visto, a atualização da Planta Genérica de Valores, que tenta estabelecer os valores venais das propriedades urbanas, pode reverter a valorização dos imóveis em verbas, como ocorreu em São Carlos:

O ganho na receita com a atualização dos valores dos imóveis possibilitou a criação do chamado IPTU verde, bem

como de outros incentivos, como o que dá desconto de até 100% para imóveis de interesse histórico (MIELKI, 2011).

No caso, se trataria efetivamente de uma “punição” financeira àquelas ocupações mais danosas, que também pode se dar na forma de taxas corretivas, descritas a seguir.

3.1.7 Taxa corretiva

Como exposto acima, a finalidade primordial da maioria dos impostos é a arrecadação de fundos pelo estado. Mesmo assim, qualquer taxa ou tributo constitui automaticamente em um desincentivo para alguma atividade, por aumentar seu custo sem afetar seu benefício. Assim, as taxas estão sendo utilizadas cada vez mais para mudança de comportamento da população.

Como visto, as externalidades negativas fazem com que o custo privado de uma atividade ou ocupação seja diferente de seu custo social, mais alto por conta dos custos externos à atividade. Um modo direto de se corrigir a discrepância é o estabelecimento de uma *taxa corretiva*, ou pigouviana (de Arthur Cecil Pigou, economista que a propôs primeiro), que teoricamente se igualaria a esse custo externo, corrigindo a discrepância (MANKIW, 2011). Na prática, o custo externo é difícil de ser valorado quando se tratam de bens não mercadológicos, como os bens ambientais.⁸⁷

De qualquer modo, envolveria cobrar uma taxa corretiva sobre a impermeabilização, cujo valor deve ser tal a rivalizar o custo de se manter uma permeabilização (jardins, pavimentos permeáveis, tetos verdes). Assim, o “mercado” se regularia naturalmente (i.e., o agente individual escolheria permeabilizar seu lote por ser mais vantajoso financeiramente), e os *dividendos* pagos por aqueles que (voluntariamente ou não) mantiverem a impermeabilização seriam utilizados para melhorias no sistema de drenagem ou outras medidas de mitigação.

⁸⁷ Lançando mão de diversas técnicas de avaliação de custo-benefício para tal.

3.1.7.1 Aspectos distributivos de taxas corretivas

Classifica-se uma tarifa ou tributo como *progressivo*, quando leva em consideração as condições de pagamento dos usuários, cobrando mais pesadamente de ricos; o imposto de renda (IR) é um exemplo. Considera-se *regressivo* quando cobra por igual, ou quando cobra mais caro de pobres. Se na superfície parece simples, na prática tributos aparentemente inofensivos podem se revelar altamente regressivos.

Um exemplo são os onipresentes tributos sobre consumíveis (produtos), que podem parecer justos superficialmente. Porém, uma análise mais profunda revela outra história. Explica-se:

A renda (R) pode ser descrita como a soma do consumo (C) com a poupança (P):

$$R = C + P \quad (2)$$

Em outras palavras, o que não é consumido é poupado. Os mais pobres, porém, tem gastos relativamente maiores com consumíveis, já que *gastam quase tudo que ganham*. Ou seja, tributos sobre consumíveis acabam sendo um tributo sobre toda a renda dos mais pobres. Os mais ricos, por outro lado, tem uma parcela maior de suas rendas passível de ser poupada; havendo poupança de 50% de sua renda, os tributos sobre consumíveis caem apenas nos outros 50%. Ou seja, uma tributação voltada a consumíveis é mais *regressiva* em relação a uma tributação voltada à renda, já que a primeira atinge com mais intensidade os mais pobres, por não levar em conta as condições financeiras do pagante.

Bugge (2009) afirma que taxas corretivas (“taxas ambientais”) podem não ser justas socialmente — taxas que tenham a intenção de reduzir o consumo elétrico, por exemplo, podem acabar prejudicando mais aos mais pobres, que dependem mais desses recursos, que aos mais ricos.

O *valor marginal* da energia tende a diminuir com o consumo – para o morador, o valor dos primeiros kWh é sempre maior (pois alimenta geladeira, iluminação básica etc.) que o dos kWh seguintes (relativamente mais supérfluos: bomba de piscina, ar-condicionado etc.). Nesse caso, uma pessoa mais rica tem a possibilidade de reduzir facilmente seu consumo e escapar da taxa, enquanto uma pessoa mais pobre dificilmente conseguiria reduzi-lo sem um grande sacrifício. Uma penalização que não leve em consideração o valor marginal relativo é, portanto distributivamente injusta e *regressiva*.⁸⁸

No caso da ocupação urbana, uma cobrança de taxa de impermeabilização puramente “por área construída” seria regressiva. Um modo de torná-la mais progressiva seria estabelecer um máximo de, por exemplo, 50 m² como impermeabilização residencial “aceitável”. Assim, uma residência que impermeabilizasse apenas 30 m² estaria abaixo do limite e não seria atingida pelo incentivo negativo; enquanto uma com 300 m² seria compelida por impostos e/ou normas para mitigar sua impermeabilização. Entende-se que a área de 30 m² seja mais vital (i.e. valioso) para o primeiro proprietário que (a média dos) 300 m² para o segundo proprietário (que incluem sala de jogos, quarto de hóspede etc.) por mais que o efeito de 10 das casas pequenas equivalha a uma da grande.

Isso não implica numa isenção aos pequenos proprietários das políticas ambientais; apenas que estas devem ter caráter mais positivo que negativo para eles. Uma ferramenta mais adequada aos mais pobres seria então incentivos positivos, ou seja, subsídios diretos e indiretos. Esses incentivos financeiros positivos necessitam, porém, de insumos governamentais disponíveis; em uma governança distributiva, tais insumos podem advir dos próprios impos-

88 Mestre (2013) comenta: “O discurso sobre a eficiência energética projeta-se para a sociedade como um todo, ao injetar que o empenho em poupar energia do sistema deve ser compartilhado. O perverso, que se perdeu ou se ignora é que grande parcela da população brasileira conheceu o acesso a rede elétrica nessa década, justamente depois de alterada a lógica do serviço público.”

tos corretivos e/ou multas aplicadas sobre aqueles que ultrapassam o limite (subsídio cruzado).

As medidas mais incisivas deveriam ser reservadas aos grandes poluidores. Neles, há grande benefício social em reduzir sua poluição, por possuírem menos tomadores de decisão por quantidade de poluição, aceitando soluções mais centralizadas (e mais baratas, se considerada a economia de escala). Seguindo o exemplo anterior, pode-se definir um terreno com mais de 10.000 m² impermeabilizados como “grande poluidor”, e exigir do proprietário uma miríade de soluções mitigadoras: estacionamentos permeáveis e arborizados, cisternas, piscininhas, tetos verdes etc., com resultados difíceis de serem replicados (tanto por parte do principal quanto dos agentes) em 100 terrenos de 100 m².

Mesmo assim, deve haver um cuidado para que a relativa tolerância aos pequenos poluidores não gere um incentivo para a prática danosa.

3.1.7.2 Incidência tributária e ônus

O uso de soluções mercadológicas tem algumas limitações no caso de haver escassez de opções. Toma-se o caso do transporte particular. O uso de carro é difundido, descentralizado e composto de inúmeras escolhas individuais. A situação atual é que a sociedade como um todo (pobres, ricos, usuários e não-usuários) assume os altos custos da infraestrutura demandada pelo carro: conserto de buracos, aumento de vias, poluição etc. O efeito é que há um incentivo de seu uso, já que (como agentes “racionalistas”) os motoristas apenas vêem seu próprio benefício, e não as externalidades negativas. De acordo com a teoria exposta, é de se esperar que uma taxa corretiva sobre o uso de automóvel (pedágio, aumento do preço do combustível etc.) os convença a usar alternativas.

Mas aí se depara com um dilema — a principal alternativa, o transporte público, é considerado (por muitos) inadequado: desconfortável, pouco prático,

impontual, não leva ao destino desejado etc.; estes indivíduos usam o carro mesmo sendo a alternativa mais cara.

Supondo que todos pensem desta maneira:

- Seria eficaz uma taxa para inibir o uso do carro?
- Seria justo fazê-lo?

A eficácia depende da facilidade de escolher alternativas, denominada *elasticidade*. Em uma **demanda elástica**, há grande liberdade de escolha entre diversas alternativas. Ou seja, aumentando um pouco o preço de um produto específico, a demanda por ele cai muito, já que há alternativas. Exemplos incluem itens supérfluos: e.g iogurte, doces. Ficando mais caro, facilmente se substitui por outro, ou se deixa de comprar.

Na situação oposta, há uma baixa elasticidade — mesmo uma grande variação de preço causa pouca alteração em sua demanda, já que o item é considerado vital, insubstituível etc. É mais parecida com a situação dos automóveis descrita acima. Uma demanda totalmente inelástica é representada pela insulina: não importa o quanto seu preço aumente, a demanda continuará a mesma.

Segue que quaisquer tributos aplicados a produtos com demandas mais elásticas recaem mais sobre os fornecedores; e tributos aplicados a produtos com demanda pouco elástica (ou inelástica) recaem mais sobre os consumidores (que não têm muita escolha a não ser pagar mais caro). Isso é chamado de *incidência tributária*, e sempre recai sobre o lado menos elástico do mercado (no caso do automóvel ou da insulina, a demanda; no caso do doce, o fornecedor). *Ele que efetivamente paga o imposto, não importando a intenção inicial* (MANKIW, 2011).

Assim, é pouco eficaz tributar um produto com demanda pouco elástica, se o objetivo for a diminuição de seu consumo. Mesmo a incidência caindo principalmente no consumidor, a mudança de atitude não acontece, e perde-se o papel de formador de comportamento.

Voltando às coberturas, não adianta cobrar uma “taxa de teto cinza” caso instalar um teto verde seja (por algum motivo) impraticável, pois não haverá aumento significativo na instalação destes.

Mas seria justo? Seguindo o cenário anterior, onde tetos verdes são impraticáveis, a taxação *ainda serviria como arrecadação de fundos reparadores*, mesmo não funcionando como instrumento de modificação de comportamento. Do ponto de vista da sociedade como um todo, apesar de não eficaz, pode-se dizer que isso é justo sim, já que estará havendo uma internalização dos danos ambientais; o dinheiro será usado para despoluição, e o agente individual está sendo responsabilizado por sua escolha.

3.1.8 Valoração e análise custo–benefício em políticas públicas

Dentre as inúmeras obrigações do Estado está a alocação de recursos finitos para diversas políticas públicas. Assim, devem-se comparar os benefícios que serão trazidos por uma política em relação ao seu custo. Em alguns casos, porém, valorar o benefício não é fácil, como bens não mercadológicos. Afinal, como estabelecer o valor monetário de uma espécie endêmica?

Assim, foram desenvolvidas algumas técnicas de valoração de bens ambientais de modo que se possam comparar políticas públicas diferentes, e esses dados possam informar (mas não determinar) uma escolha. Entre elas, encontram-se métodos de **preferência revelada**, ou seja, o que as escolhas dos agentes dizem sobre o valor de alguma atividade; por exemplo, o *método de custo de viagem* (*travel cost method*) usa dados sobre escolhas de trajetos—mais longos ou mais curtos (i.e. se dar ao trabalho de se percorrer uma maior distância indica uma alta valorização do destino); e métodos de **preferência afirmada**, onde os agentes são indagados diretamente sobre os valores.

O uso da análise custo–benefício em políticas ambientais é polêmica:

- dados podem ser manipulados para favorecer ou prejudicar algum recurso ambiental, já que por natureza é um método pouco preciso e com alto grau de arbitrariedade;
- a ética de se estabelecer valores monetários a recursos ambientais;
- a desconsideração de aspectos distributivos na análise:

A teoria dita que, se existirem benefícios líquidos para a sociedade como um todo, então os vencedores compensariam os perdedores. A distribuição é considerada uma questão separada. Com frequência, os vencedores optam por ficarem com seus ganhos e não compartilhá-los com os perdedores, então a compensação permanece puramente hipotética (ACKERMAN, [s.d.], tradução nossa).⁸⁹

Deste modo, a Análise Custo–Benefício deve ser encarada com cautela e, de preferência, ser usada para escolher entre diferentes meios de se atingir um objetivo (“qual o modo mais barato de se salvar esta floresta?”), e não na escolha destes objetivos (“vale a pena salvar essa floresta?”).

3.1.9 Mercado de permissões

A última solução mercadológica é o mercado de permissões, onde estabelece-se um máximo total que pode ser poluído (um limite de emissões), mas, em vez de obrigar todos os agentes a seguirem o mesmo limite (que pode causar injustiças de cunho distributivo, caso um agente tenha mais dificuldade de cumprir a meta), permite-se a compra e venda desses limites. Ou seja, uma fábrica teria a opção de continuar poluindo de modo igual, usando o limite de emissão que lhe foi fornecido, ou tornar o modo de fabricação mais ecológico e *vender* sua permissão a outra fábrica que precise, compensando os custos com as alterações na produção.

89 “The theory holds that if there are net benefits for society as a whole, then the winners could compensate the losers. Distribution is considered a separate issue. All too often, the winners chose to keep the winnings and not share them with the losers, so the compensation remains purely hypothetical.” (ACKERMAN, [s.d.]).

3.1.9.1 Soluções privadas: uso da justiça e direitos individuais

Finalmente, outra classe de soluções às externalidades são as chamadas soluções privadas. A mais consagrada é o *teorema de Coase*, que diz que, havendo conflito entre duas partes, por exemplo, entre o shopping e o proprietário de uma residência em área alagável da mesma bacia, o shopping poderia compensar os prejuízos. O método necessita idealmente de duas partes bem definidas e justiça rápida e sem custos (MANKIW, 2011), o que raramente ocorre em problemas ambientais; portanto, não é um método considerado prático no Direito Ambiental.

3.1.10 Soluções para externalidades das ocupações no contexto urbano

O contexto dos princípios econômicos são mais ligados à indústria e ao comércio, levando em consideração conceitos como curvas de demanda e oferta, lucro, margem etc. É um assunto demasiado complexo para ser transferido em sua integridade para a discussão de coberturas verdes. Porém, serão emprestados alguns princípios mais úteis para a discussão em questão.

No contexto urbano, pode-se considerar uma impermeabilização excessiva do lote uma das externalidades negativas do tipo de ocupação escolhida. Ou seja, um terceiro (a sociedade, o meio ambiente etc.) paga os custos das enchentes decorrentes (destruição de propriedade, transmissão de doenças etc.). Sem uma iniciativa reguladora advinda do estado, não haveria incentivo para a desimpermeabilização do lote pelo indivíduo, o que é análogo a uma falha de mercado. Toma-se o exemplo da impermeabilização por ser a externalidade mais óbvia das ocupações.

Como visto, a solução mais centralizada seria a regulamentação direta pelo Estado. No caso, o governo proibiria a impermeabilização excessiva ou obrigaria uma permeabilidade mínima por meio de alguma estratégia específica: multas, código de obras etc.

Além dessa, existem as mencionadas soluções de mercado:

- cobrar uma **taxa corretiva sobre a impermeabilização**, cujo valor deve ser tal a rivalizar o custo de se manter uma permeabilização (jardins, pavimentos permeáveis, tetos verdes). Assim, o “mercado” se regularia naturalmente (i.e., o agente individual escolheria permeabilizar seu lote por ser mais vantajoso financeiramente), e os dividendos pagos por aqueles que (voluntariamente ou não) mantiverem a impermeabilização seriam utilizados para melhorias no sistema de drenagem ou outras medidas de mitigação.
- Pode-se também estabelecer **cotas de impermeabilização** para uma região. Ou seja, um proprietário que precise muito impermeabilizar o lote compraria o direito de impermeabilização de outro proprietário. Um shopping efetivamente “sustentaria” uma área de mata, por exemplo, se quisesse evitar soluções internas ao seu lote. Isso cria um mercado paralelo que teoricamente regula o primeiro. Tal estratégia já é utilizada como instrumento urbanístico na forma da outorga onerosa do direito de construir⁹⁰ — tem-se um estoque de coeficiente de aproveitamento em uma região, e quem necessitar de mais pavimentos compra o direito de construí-los (nesse caso, porém, quem vende é o estado, não havendo o estabelecimento de um verdadeiro mercado de cotas). Garante-se assim o limite total de verticalização/impermeabilização de uma área sem prejudicar aqueles que realmente desejam ou necessitam de edifícios altos/terrenos impermeáveis.

Soluções privadas são de múltiplas naturezas:

90 O instrumento tem função de levantar recursos: “[...] para efetivar a responsabilidade socioambiental, os recursos extraorçamentários captados com a outorga onerosa para fins de regularização edilícia deveriam ser atrelados ao Plano Diretor e aos Planos Regionais Estratégicos, priorizando as ações reparadoras, mitigatórias e compensações urbanístico-ambientais. Especial atenção teriam a drenagem, a recuperação do sistema de áreas verdes e a recomposição do estoque fundiário público necessário à política urbana e à reorientação da cidade aos princípios da sustentabilidade.” (KEPPKE, 2013, p. 169).

- soluções morais e sociais;⁹¹
- a solução contratual surgiria se um proprietário prejudicado por enchentes ameaçasse processar outro que mantém grandes áreas impermeáveis. Tal solução funciona melhor quando há poucas partes envolvidas e forte estabelecimento de propriedade e culpabilidade, que força um acordo mútuo na forma de contrato.

Através dessa conceitualização, podem-se finalmente definir as estratégias de incentivo à tecnologia dos tetos verdes:

- **regulamentação direta** envolve obrigação da presença de tetos verdes em certas (ou todas) as edificações. É o viés mais utilizado quando se fala de legislação, especialmente no Brasil.⁹² Tem a vantagem de ser absoluta e facilmente fiscalizável. As desvantagens incluem menor escolha do agente individual e pouca flexibilidade na escolha de soluções, além de forçar uma tecnologia mesmo a sociedade ou o mercado estando despreparados.
- **taxa corretiva** seria uma “taxa de teto cinza”, ou seja, um valor pago por proprietários que escolhem não colocar cobertura verde, de modo a compensar seu dano ambiental.
- **subsídio** seria um investimento (parcial ou total, direto ou indireto) do estado para instalação das coberturas, tendo em vista que seu uso dispensa o gasto em soluções alternativas (e.g. o estado deixa de construir um piscinão). Apesar de ter mecanismo parecido com a taxa corretiva, tem a vantagem de ser visto como benéfico (positivo) e não punitivo (negativo) pelo agente individual. É muito utilizado no início da adoção, quando uma economia de escala ainda não se estabeleceu e os custos ainda são proibitivos.

91 Cf. 3.2 Motivações morais e sociais, pág. 119.

92 Cf. Anexo C - Leis de incentivo a tetos verdes, pág. 325.

Exige verbas disponíveis, que podem ser conseguidas por subsídio cruzado, neste caso devendo-se lançar mão das taxas corretivas.

- no caso de **cotas**, não foi encontrado exemplo que trata tetos verdes de modo equivalente à outorga onerosa ou créditos de carbono, mas é uma possibilidade. O que existe sim é a permissão de maior verticalização caso o construtor se proponha a colocar coberturas verdes, mas não envolve (a princípio) a troca entre agentes.
- no caso de **soluções privadas**, as mais difundidas são a educação ambiental e conscientização, seguidos de reciprocidade, no caso de empresas que visam associar sua imagem a atividades “ecológicas”.

Caso o teto verde seja naturalmente mais econômico, a manutenção de um teto cinza já seria uma “taxa”, por incorrer em maiores gastos. Uma medida de ajuste de mercado, como incentivo financeiro, é necessária quando a busca pelo maior ganho financeiro não coincide com o que é socialmente mais benéfico. Teoricamente é desnecessária uma taxa de teto cinza caso este seja mesmo mais caro em longo prazo (supondo que os agentes tenham informação perfeita).

O ideal é que, quaisquer as estratégias econômicas de internalização de danos ambientais escolhidas, se considerem os tetos verdes como apenas uma das múltiplas ferramentas disponíveis, mas que tem a possibilidade de oferecer soluções para diversas problemáticas: drenagem urbana, biodiversidade, vegetação, aquecimento urbano etc. A escolha individual deve ser preservada quando possível, fomentando o mercado de materiais, projetos e mão de obra, ao mesmo tempo em que se diminuem as vantagens de escolhas pouco ambientais (“egoístas”).

O “custo de oportunidade” da colocação de coberturas verdes é baixo em relação a manter áreas verdes em nível do solo, que poderiam ser aproveitadas para muitos outros usos, alguns bem lucrativos, outros socialmente

importantes. No caso do teto verde, não se desiste de nenhuma opção melhor ao instalá-lo em um espaço que é quase sempre subutilizado.

3.2 Motivações morais e sociais

Motivação moral é aquela que molda as ações de acordo com o que a pessoa acha certo ou errado, podendo ser do ponto de vista social, ambiental, ético etc. Por exemplo, o que evita que (mais) pessoas cometam furtos é porque acham essa ação errada, e não apenas as sanções sociais dessa ação, ou seu prejuízo econômico (perda de emprego, encarceramento).

Motivação social é aquela que faz as pessoas agirem de certo modo por uma pressão (percebida) de um grupo ao qual acreditam pertencerem. Cialdini (2003) chama essas influências de *normativas*, já que se referem a normas sociais, e enfatiza sua importância em campanhas de persuasão, mas que chamaremos de “sociais” para evitar confusão com soluções *command-and-control*.⁹³

De modo a ilustrar o poder das normas sociais, Cialdini (2003) testou quatro tipos de mensagens quanto à eficácia de diminuir o consumo de energia elétrica de residências unifamiliares na cidade de San Diego, oeste dos EUA.

- A primeira mensagem era um apelo moral: “economize energia porque é bom para o meio ambiente”.
- A segunda também era moral, mas apelava para outro aspecto: “economize energia porque será bom para as gerações futuras”.
- A terceira era um incentivo econômico: “economize energia para gastar menos no fim do mês”.
- Por fim, a quarta dizia: “economize porque seus vizinhos estão economizando”.

A mais eficaz foi de fato a última (a única mensagem social) mesmo os moradores não o admitindo quando indagados de suas motivações.

As influências sociais podem ter duas origens, sendo divididas em:

93 Ambas podem ser consideradas “irracionais”, complementando as já apresentadas.

- *injuntivas*⁹⁴, quando se referem ao que é percebido como aprovado, ou seja, o que o indivíduo sente que o grupo acharia “certo” de se fazer naquela situação; ela vem de um receio de sanções informais, como ser taxado de algo pejorativo, i.e. “o que os vizinhos vão pensar?” (“se eu jogar lixo na rua, vão me achar sujismundo.”);
- *descritivas*, ou seja, o que o indivíduo sente que o grupo está de fato fazendo, ou seja, a ação percebida como prevalente naquela situação; análogo a um comportamento de rebanho, i.e. “o que os vizinhos estão fazendo?” (“*Todos estão jogando lixo na rua, então também jogarei.*”)

Como demonstrado no exemplo de San Diego, a utilização de mensagens sociais têm grande potencial de persuasão, especialmente as *descritivas*, que incentivam a *imitação* deste comportamento.

A influência é tamanha que pode ter efeitos contrários ao planejado — anúncios de utilidade pública que enfatizam a prevalência de um problema (como a gravidez na adolescência ou uso de drogas) de fato normalizam o comportamento não-desejável, efetivamente (e inadvertidamente) dizendo: “já que todos estão fazendo, você também pode”, ou seja, reforçando um aspecto social-descritivo negativo.

Isso foi demonstrado por Cialdini (2003) em uma área turística no Arizona (EUA) da qual os visitantes levavam amostras de floresta petrificada como lembrança, depredando o parque. As autoridades haviam colocado um aviso social-descritivo que apelava para a prevalência do problema.

“Sua herança está sendo vandalizada diariamente devido a perdas por roubo de 14 toneladas por ano, a maior parte um pequeno fragmento de cada vez.” (CIALDINI, 2003, tradução nossa).⁹⁵

94 Ing. *injunctive*

95 “Your heritage is being vandalized every day by theft losses of petrified wood of 14 tons a year, mostly a small piece at a time.”

Ele hipotetizou que um aviso social-injuntivo (ou o que “deveria ser feito”) teria mais efeito de inibição neste caso.

“Por favor, não remova madeira petrificada do parque, de modo a preservar o estado natural da Floresta Petrificada.” (CIALDINI, 2003, tradução nossa).⁹⁶

De fato, o experimento demonstrou que quando o aviso social-injuntivo era usado, havia *três vezes menos* ocorrências que um aviso social-descritivo colocado pelos pesquisadores.⁹⁷ Ou seja, *dizer que um problema é prevalente só serve para agravá-lo*.

Outra descoberta é que o uso de mensagens negativas é mais forte que positivas, tanto para efeitos desejáveis quanto para aqueles inadvertidos. Ou seja, “não saia da trilha” é mais forte que “fique na trilha”, no caso de mensagens sociais-injuntivas; e “turistas levam amostras” é mais forte que “turistas conservam o parque”, no caso de avisos social-descritivos (o que no caso piorou ainda mais o comportamento de quem lê a mensagem).

Assim, um apelo às normas descritivas, ou seja, ao que “a maioria está fazendo”, tem efeito benéfico quando a situação prevalente em si é positiva (“Todos conservam o parque? Vou conservá-lo então.”); caso contrário, deve-se lançar mão de normas injuntivas, informando o público sobre o que é errado, e conscientemente evitando mencionar a prevalência do problema, o que normalizaria comportamentos não-desejáveis (“Não posso levar amostras? Certo, não levarei.”). “Comunicadores do serviço público devem evitar a tendência de enviar a mensagem normativamente confusa que a atividade alvo é socialmente reprovada porém difundida” (CIALDINI, 2003).⁹⁸

96 “Please don’t remove the petrified wood from the Park, in order to preserve the natural state of the Petrified Forest.”

97 Que imitava controladamente o aviso original: “Muitos visitantes anteriores removeram madeira petrificada do Parque, alterando o estado natural da Floresta Petrificada.”

98 “Public service communicators should avoid the tendency to send the normatively muddled message that a targeted activity is socially disapproved but widespread.” (CIALDINI, 2003, p. 108).

Por vezes, o comunicador erra duplamente, fazendo parecer, com boas intenções, que o problema é mais prevalente do que realmente é, para efeito dramático (no caso da floresta petrificada, os turistas infratores eram apenas 5% do total). Quando muito, deve-se, ao invés de exagerar, *marginalizar* tais comportamentos.

- situação prevalente positiva: focar na situação, sugerir segui-la.
- situação prevalente negativa: não focar na situação, sugerir a solução, focar em quem já tem comportamento desejável.

No caso das coberturas verdes, uma campanha que focasse na prevalência de tetos “cinza” seria *menos* eficaz que uma que sugerisse a colocação de tetos verdes. A campanha mais eficaz, porém, demonstraria *que muitos tetos verdes já existem*, que reforça a importância de exemplos positivos e casos modelo, utilizando a pressão social (percebida) para incentivar um comportamento desejável.

A influência social é subestimada ao se elaborarem políticas de incentivo, já que sempre se acredita que as motivações são internas — a maioria das pessoas pensa agir pelo incentivo moral, quando elas estavam de fato mais susceptíveis a um incentivo externo, o social, o que leva políticas dessa última natureza a serem pouco levadas em consideração. Ninguém gosta de admitir, mas imitar os outros é quase inevitável.

3.3 Incentivo negativo ou positivo?

Afinal, se toda a ocupação é inevitável, é justo puni-la? Deveria haver apenas incentivos positivos em vez dos negativos? Essa seção tenta lançar algumas questões relativas ao padrão de ocupação.

A interpretação tradicional da urbanização é *antropocêntrica* — o ambiente natural seria um quadro branco, um estado pré-ocupação. A urbanização seria inevitável e usa essas áreas “desocupadas” como recurso, e noção de dano ambiental não é levada em consideração.

Em outro extremo, pode-se interpretar que toda ocupação de lote é um dano ambiental, se comparada ao estado original (e.g. floresta). Esse seria um raciocínio *ecocêntrico* — o homem é sempre o agente que altera a natureza.

Até que ponto devemos punir um edifício meramente por existir? Podemos reescrever a pergunta baseado em termos econômicos — até que ponto devemos cobrar o proprietário apenas por ele ter uma propriedade?

De certo modo, toda ocupação já é “punida” na forma do IPTU. Se toda ocupação é danosa, (quase) toda ocupação paga por isso.

Caso entenda-se o IPTU como uma taxa pelos danos ambientais da ocupação, o Estado pode então isentar parte deste ônus caso a ocupação seja mais ecológica (ou seja, mais “inexistente” do ponto de vista ambiental) — um terreno intocado ficaria então completamente isento de tributos, caso ele cumprisse seus serviços ecológicos.⁹⁹ Nesse raciocínio, uma externalidade positiva seria meramente a ausência de negativas — aquele terreno apenas “deixa” de provocar danos a terceiros.

Abstraindo-se, pode-se dizer que, neste caso, o padrão, ou a linha-base, se encontra no estado inalterado. Qualquer ocupação será punida/cobrada, por estar abaixo dessa linha. Uma alteração mais radical pagará proporcionalmente mais.

Podemos chegar a uma terceira interpretação: a linha-base não estaria no estado intocado, pois se entenderia que, em uma cidade, a ocupação seja inevitável e traga benefícios sócio-econômicos. A diferença com interpretação antropocêntrica é que, nesse caso, ainda se estabelece uma linha-base (i.e. há dano ambiental), mas ela é posta em uma ocupação determinada como “típica”, que seria, portanto neutra — sem isenções, subsídios ou punições. Qualquer ocupação melhor que a típica receberia recompensas; nesse caso, além de meras isenções, podem-se incluir subsídios, por entender que há um esforço

99 Exatamente o oposto da interpretação da função social da propriedade, onde um terreno vazio é cobrado pesadamente.

por parte do proprietário. Qualquer ocupação *pior* que a típica seria punida: taxa corretiva, IPTU progressivo, entre outros instrumentos possíveis. Esse raciocínio equilibra o ecocentrismo com o antropocentrismo.

Onde deve estar o teto verde nesse espectro? Por um lado, uma ocupação com teto verde ainda é mais danosa que a ausência de ocupação — a cobertura é uma mera mitigação. Isso se alinha com o raciocínio ecocêntrico, que interpreta toda ocupação como danosa. Por outro lado, pode-se interpretar que, além de trazer benefícios socioeconômicos, uma ocupação “verde” traz, *ainda por cima*, os benefícios ambientais. Nesse sentido, é uma evolução em relação a uma ocupação “típica”, que só traz os (eventuais) benefícios socioeconômicos.

Assim, caso se entenda que um teto verde é um esforço individual, aquilo que vai além do típico, faz mais sentido que seja recompensado (subsidiado, isento, promovido etc.), pois estaria acima da linha-base — melhor que o teto cinza (neutro). Aqui, não é justo punir o cinza. Este pagaria apenas os impostos de arrecadação, não os de sanção.

Por outro lado, em uma situação em que a tecnologia dos tetos verdes seja tão difundida a ponto de ser *normalizada*, o próprio teto verde poderia ser considerado neutro, padrão, ou seja, “nada mais que a obrigação”. Seria equivalente a ter uma ligação regular de esgoto, por exemplo. Ninguém é recompensado por não jogar esgoto na rua; pune-se quem o faz. Nesse caso, o verde ficaria sem recompensa (nem punição). Já o teto cinza seria considerado a opção danosa, negativa, e, portanto justo de ser punido com sanções (ou seja, pagaria valores além dos tributos de arrecadação: taxas corretivas, ou mesmo multas caso se infracionasse a ação).

Tudo depende do estado de difusão da tecnologia na região, tanto em termos técnico-comerciais, quanto políticos e sociais.

3.4 Exigências legais sobre edificações no Brasil

As normas e legislações são forças importantes no estabelecimento do formato final das edificações (junto à deliberação dos profissionais e da força do mercado), sendo modos eficientes de se estabelecerem soluções construtivas. Elas podem ter cunho federal (e.g. legislações ambiental e urbanística), estadual (e.g. Constituição Ambiental) ou municipal.

No Brasil, a Constituição compete ao município o seu próprio ordenamento territorial:

Constituição Federal Capítulo IV - Dos Municípios

VIII – promover, no que couber, adequado ordenamento territorial, mediante planejamento e controle do uso, do parcelamento e da ocupação do solo urbano. (BRASIL, 1988).

Os códigos de obra levam em consideração tanto questões edilícias quanto urbanísticas, e têm como objetivo:

garantir que as condições mínimas exigidas pela sociedade sejam atendidas na construção e no uso das edificações: insolação, iluminação e ventilação; segurança estrutural e contra incêndio; estanqueidade à água; durabilidade, etc. (ONO, 2005).

... e podem ter âmbitos nacional, estadual ou municipal. No Estado de São Paulo, destacam-se o *Código de Saneamento* e o *Código de Segurança contra Incêndio* (do qual estão excluídas residências exclusivamente unifamiliares).

O código de obras municipal de São Paulo tem raízes no *Código de Obras “Arthur Saboya”*, de 1929, com requisitos estéticos, construtivos e de higiene. O Código de Obras de 1955 (Lei 4.615 de 13.01.1955) apenas renovou as condições gerais para as edificações. Uma reforma maior só veio com a Lei Municipal No 8.266/75, decorrente de pressões sociais que seguiram as tragédias dos incêndios no edifício Andraus, em 1972, e no Joelma, em 1974; além disso, definiu condições mínimas de insolação, ventilação e iluminação especialmente na vizinhança de grandes edifícios.

O Código atual foi estabelecido pela *Lei Municipal Nº 11.228 /1992 – Código de Obras e Edificações (COE)* (regulamentada pelo *Decreto Municipal Nº 32.329 /1992*) que “dispõe sobre as regras gerais e específicas a serem obedecidas no projeto, licenciamento, execução, manutenção e utilização das obras e edificações, dentro dos limites dos imóveis, no Município de São Paulo”, e é gerenciado pela SEHAB. Ono (2005) destaca suas inovações como uma:

[...] diferença de filosofia – inúmeras informações técnicas passam a ser consideradas como de responsabilidade e decisão do projetista. Direciona as decisões técnicas à adoção das normas brasileiras da ABNT (ONO, 2005).

A ABNT, uma entidade privada sem fins lucrativos, foi fundada em 1940, é filiada à ISO e é responsável pela normalização técnica no Brasil, reconhecida pelo Fórum Nacional de Normalização. Ono (2005) define a normatização como “atividade que estabelece prescrições destinadas à utilização comum”, com objetivos na “economia, comunicação, segurança, proteção do consumidor, eliminação de barreiras técnicas e comerciais”. Há inúmeros comitês dentro da ABNT, responsáveis por diferentes áreas (e.g. *CB-02 Construção Civil* e *CB-55 Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento*).

Normas podem ser **prescritivas**, que “define dimensões e materiais específicos: uma ‘receita’ de como projetar/construir.”; ou com base em **desempenho**, “que um material ou sistema deve atender, permitindo uma maior abertura para introdução de inovações tecnológicas.” (ONO, 2005). Como exemplo da última, ela cita a *NBR 15575 – Edifícios habitacionais – Desempenho*.

Destaca-se, quanto à responsabilidade do construtor, a *NBR 14.037: Manual de operação, uso e manutenção das edificações – Conteúdo e recomendações para elaboração e apresentação*, que busca:

informar as características técnicas da edificação construída; descrever procedimentos recomendáveis para o melhor aproveitamento da edificação; orientar os usuários para a realização das atividades de manutenção; prevenir a ocorrência de falhas e acidentes decorrentes de uso inadequado;

contribuir para o aumento da durabilidade da edificação (ONO, 2005, p. 11).

Por fim, o Código de Defesa do Consumidor (Lei Federal Nº 8.078, de 11 de setembro de 1990) estabelece proteções aos consumidores de habitações (ONO, 2013):

Capítulo V – Das Práticas Comerciais

Seção IV - Das Práticas Abusivas

Art. 39. É vedado ao fornecedor de produtos ou serviços:

[...]

VIII - colocar, no mercado de consumo, qualquer produto ou serviço em desacordo com as normas expedidas pelos órgãos oficiais competentes ou, se normas específicas não existirem, pela Associação Brasileira de Normas Técnicas ou outra entidade credenciada pelo Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – CONMETRO (ONO, 2005).

Porém, no quesito da sustentabilidade das edificações, a legislação brasileira se mostra falha:

Ao contrário da realidade européia, a legislação brasileira ainda não contempla o que foi colocado aqui como conceitos e critérios para uma arquitetura sustentável. Além do mais, a legislação e os códigos de obra são **muito mais normativos do que de fato direcionados para o desempenho**. Em termos de impacto ambiental do edifício em construção ou do edifício em operação, não existe ainda um suporte por parte da legislação brasileira que demonstre uma atitude pública em prol de edificações de menor impacto ambiental; um indicador de consumo de energia, por exemplo. No entanto, vale ressaltar o valor metodológico e científico de propostas já feitas e em desenvolvimento para o tema no Brasil, cuja viabilidade de implementação está na dependência de vontades políticas (GONÇALVES; DUARTE, 2006, p. 57, grifo nosso).

Certificações têm ganhado destaque no ramo da construção civil, e são definidas por Ono (2005):

Demanda do mercado em identificar a procedência, o processamento e/ou a qualidade de um determinado produto ou serviço, fornecendo ao produtor/fornecedor um diferencial e estabelecendo uma relação de confiança com o consumidor (ONO, 2005).

Na arquitetura, a certificação é ampla, englobando diversos aspectos do projeto:

A certificação constitui-se em um sistema de avaliação no qual é quantificado o grau de sustentabilidade de um projeto de acordo com determinados critérios de desempenho, que podem englobar desde consumo de energia até tópicos como o impacto ambiental gerado por tintas, por exemplo (GONÇALVES; DUARTE, 2006, p. 57).

Certificações de edifícios sustentáveis incluem o americano LEED: “Tetos verdes contribuem com pelo menos seis pontos LEED, podendo chegar a até 15 ou 16” (ALIVE STRUCTURES, [s.d.], tradução nossa).¹⁰⁰ Gonçalves e Duarte complementam:

LEED, foi desenvolvido pelo United States Green Building Council – USGBC, dos Estados Unidos, também inicialmente destinado exclusivamente a edifícios de escritórios; entretanto, atualmente, existe uma versão do LEED para edifícios residenciais e outras em fase de elaboração (GONÇALVES; DUARTE, 2006, p. 58).

Assim, as leis relativas às construções têm maior poder de influência em massa que os próprios arquitetos ou proprietários.

¹⁰⁰ “Green roofs contribute at least 6 LEED™ points, sometimes adding as much as 15 or 16.” (ALIVE STRUCTURES, [s.d.])

Parte II -Abordagens ambientais

Capítulo 4 – Economia de Energia

O surgimento da arquitetura moderna tecnicista confiava excessivamente nos sistemas de condicionamento e iluminação artificiais para garantia do conforto dos usuários, em uma idolatria da máquina; “a banalização da arquitetura do *International Style*, que, acompanhada pela crença de que a tecnologia de sistemas prediais oferecia meios para o controle total das condições ambientais de qualquer edifício” (GONÇALVES; DUARTE, 2006, p. 52). Junto com a industrialização e barateamento de maquinário e energia elétrica, isso levou a um consumo excessivo de energia, uma “estreita relação entre o conforto ambiental e o consumo de energia, que está presente na utilização dos sistemas de condicionamento ambiental artificial e de iluminação artificial” (GONÇALVES; DUARTE, 2006, p. 52). A energia, porém, é um bem cuja produção traz danos ambientais, que faz com que um consumo excessivo por parte das edificações seja indiretamente poluidor.

A arquitetura sustentável surge como uma resposta à homogeneização “universalizadora” dessa arquitetura:

A Arquitetura sustentável é a continuidade mais natural da Bioclimática, considerando também a integração do edifício à totalidade do meio ambiente, de forma a torná-lo parte de um conjunto maior. É a arquitetura que quer criar prédios objetivando o aumento da qualidade de vida do ser humano no ambiente construído e no seu entorno, integrando as características da vida e do clima locais, consumindo a menor energia compatível com o quantidade de conforto ambiental, para legar um mundo menos poluído para as próximas gerações (CORBELLÀ; YANNAS, 2003, p. 17).

Hoje o conceito se estende também ao impacto da produção dos materiais e a construção, além de seu descarte (*cradle to cradle*), e não apenas ao consumo operacional.

Gonçalves e Duarte (2006) dividem o desempenho energético dos edifícios em três categorias:

- edifícios 100% passivos;
- edifícios convencionais, que dependem de condicionamento;
- edifícios que lançam mão de estratégias passivas para redução do condicionamento artificial, usando-o complementarmente.

No primeiro cenário, tem-se um projeto totalmente passivo (*free running building*), em que o consumo de energia para a climatização é zero. Nesse caso, são as características do projeto arquitetônico e os padrões de ocupação que, interagindo com as condições ambientais externas, vão determinar as condições ambientais internas.

No segundo cenário, o edifício é dependente por todo o seu tempo de ocupação de um sistema artificial para o controle das condições ambientais internas, o que pode ser uma imposição do clima ou mesmo das especificidades do uso. Sendo assim, a arquitetura deve ser projetada para minimizar os gastos de energia para condicionamento artificial, seja para o arrefecimento, seja para o aquecimento.

No terceiro cenário, o uso do sistema artificial de climatização é parcial, ocorrendo apenas nos momentos do ano em que as condições ambientais internas estão fora dos padrões de desempenho estabelecidos, denominado condicionamento ambiental em modo misto (*mixed-mode*) (GONÇALVES; DUARTE, 2006, p. 56).

A cobertura é um elemento importante no ganho térmico da edificação; afinal, é sua função primordial o abrigo contra a insolação (junto com a função de abrigo contra chuva). “Em edificações térreas, considerando-se o ‘envelope’ composto pelas vedações e cobertura, esta última é responsável pelo acréscimo de considerável parcela da carga térmica em função de sua exposição permanente à radiação solar.” (NETO, 2009, p. 17).

Segundo Domínguez et al. (1992):

[...] no projeto de uma cobertura devem ser considerados simultaneamente três fatores:

Controle solar (quantidade de sombra produzida e adequação da forma à da superfície ocupada);

Parcela de radiação que atravessa a cobertura em relação ao total que incide sobre ela (o que depende do tipo de cobertura e dos materiais utilizados);

A quantidade de calor absorvido e dissipado pela cobertura (o que depende do tipo de cobertura, da forma e da cor da superfície).

Um dos benefícios de um teto verde é a economia de energia que seria gasta em condicionamento artificial da edificação abaixo, por terem desempenho térmico melhor que coberturas convencionais, como será visto. Sua eficácia é maior para edifícios de um pavimento, ou para os últimos andares. Já edificações mais altas podem considerar o uso de paredes verdes, por terem envoltórias verticais mais representativas.

4.1 Comportamento térmico de tetos verdes

O comportamento térmico de coberturas verdes é extremamente complexo. Não só se substitui uma superfície simples e inerte por uma metabolicamente ativa (as plantas) como também se coloca um meio de cultura com propriedades altamente instáveis devido à umidade variável. Isso sem mesmo levar em consideração as variações inerentes ao projeto de cada teto verde, ou as variáveis climatológicas e meteorológicas (que afetam também as coberturas convencionais).

Por outro lado, as propriedades de solos e plantas em relação a ciclos de energia e de água são largamente estudadas em diversos campos, como Ecologia e Engenharia Florestal e Agrônoma. A Engenharia Civil, Arquitetura e Paisagismo devem tirar proveito desse corpo de pesquisa e aplicá-lo em edificações.

É útil explicar os passos que uma carga térmica deve percorrer através de um teto verde para que atinja o interior da edificação.

4.1.1 Forçante radiativa

Todas as envoltórias estão sujeitas à radiação solar, as coberturas em especial. A radiação solar incidente depende primeiramente da posição do sol no céu e a inclinação da superfície de interesse. Em baixas e médias latitudes, o sol incide de maneira mais vertical (grande altura solar), especialmente próximo ao meio dia, se comparado a altas latitudes, onde a altura solar é menor (OKE, 1987). Isso enfatiza a importância das coberturas das edificações em relação a ganhos térmicos radiativos em regiões tropicais. A potência do sol a pino sobre uma superfície horizontal pode ultrapassar 1000 W/m^2 (BONAN, 2002).

Há também uma divisão entre radiação celeste (difusa) e a solar direta. A radiação difusa depende do fator de visão de céu (diminuído pela oclusão causada por barreiras no entorno, como árvores ou outras edificações), e é relativamente uniforme em toda a abóboda. Isso significa novamente que as coberturas estão sujeitas a maior radiação difusa se comparadas às paredes, já que estas últimas “enxergam” no máximo 50% do céu.

A radiação solar pode também ser dividida de acordo com suas propriedades radiativas: é composta pelo *infravermelho próximo* (comprimento de onda abaixo do vermelho, mas ainda próximo ao visível, chamado de *near infra-red* (NIR) em inglês), que representa quase 50% da radiação solar, invisível e com pouco poder de penetração, sendo facilmente bloqueado por nuvens ou água. A segunda parcela, representando aproximadamente 45% da radiação solar direta, é a chamada *radiação visível* (VIS), ou fotossinteticamente ativa (*photosynthetically active radiation*, PAR), já que pode ser detectada por nossos olhos e utilizada pelos pigmentos vegetais na fotossíntese. Por fim, há a *radiação ultravioleta* (UV, comprimento de onda além do violeta), danosa a muitos materiais e à pele, porém representando apenas 5% da radiação solar que chega

à superfície, em grande parte por sua interceptação por ozônio e oxigênio na estratosfera (BONAN, 2002).¹⁰¹

A refletância da superfície é denominada *albedo* (α)¹⁰² — quanto maior o albedo, mais radiação é refletida, para um máximo de 1 (i.e. um espelho ideal). Em geral, para a maioria dos materiais, o albedo *visível* (i.e. “claridade” do material) é um bom indicador para o albedo *global* (que inclui os invisíveis NIR e UV).

Um alto albedo global é uma das estratégias para se evitar ganhos térmicos sob radiação solar, aproveitada pelos chamados “**tetos brancos**” — ao se aumentar o albedo de coberturas por meio de pintura, os ganhos térmicos podem ser radicalmente reduzidos. Uma mudança de albedo de um valor de 0,2 para 0,8 representa um corte de 75% no ganho de energia de uma superfície.

Assim, é de se imaginar que a vegetação, que normalmente tem aparência escura, seja justamente o oposto do que se busca para redução de cargas térmicas. Porém, a inspeção visual não é suficiente para determinar a radiação global absorvida ou refletida — em especial, somente a parcela NIR representa quase metade da radiação solar, e ela sequer é enxergada pelos seres humanos. Essa radiação, além de não estimular os pigmentos na retina humana por ser pouco energética, também não estimula os pigmentos vegetais responsáveis pela absorção dos fótons na fotossíntese. Ou seja, além de invisível, a faixa NIR não é uma radiação fotossinteticamente ativa, *mesmo representando 50% da energia solar*. A absorção térmica foliar dessa radiação “inútil” causaria um ganho de calor imenso e deletério à planta. Assim, diversas estratégias foram desenvolvidas pelos vegetais para que isso não aconteça.

101 A radiação difusa de um dia claro têm uma composição espectral um pouco diferente da direta: há maior incidência de raios de maior frequência, como azul e ultravioleta, sendo menor a parcela de vermelho e NIR. No caso de dias parcialmente encobertos, a radiação difusa é bem mais próxima da radiação solar direta, exceto talvez com menor proporção de NIR, que é facilmente bloqueado por nuvens.

102 Por vezes a absortividade (o oposto do albedo) também é representada por α .

Fig. 5 Orquídea (*Cephalanthera damasonium*) mutante albina (sem pigmentos) comparada à equivalente normal. Tecidos vegetais em si são translúcidos a quase todos os comprimentos de onda advindos do sol; a absorção é deliberada e se dá através de pigmentos específicos. Fotografias NIR se assemelham à imagem da esquerda, já que não há pigmentos que absorvam essa radiação. Fonte: THREE ..., 2012.

Em primeiro lugar, a radiação NIR é difundida pela estrutura microscópica da folha, especialmente o parênquima esponjoso¹⁰³. Em outras palavras, para a radiação NIR, a folha é translúcida, tanto se refletindo quanto atravessando¹⁰⁴. Isso pode ser claramente observado em fotografias especiais que detectam apenas essa radiação — as folhagens têm aparência leitosa, fantasmagórica, e extremamente claras. Mesmo a olho nu, a extrema translucidez

103 Camada de células irregulares na parte inferior da folha; a camada que abriga os cloroplastos é o parênquima paliádico, mais organizado, e localizado sobre o parênquima esponjoso.

104 “Por outro lado, a energia do infravermelho próximo não é afetada por esses pigmentos e penetra quase por completo o parênquima paliádico. Quando alcança o parênquima esponjoso, a presença de espaços de ar causa a refração a energia NIR em diversas direções. Isso resulta na saída de aproximadamente metade da energia [do infravermelho próximo] pela epiderme inferior, e metade pela epiderme superior, em direção ao céu.”

“On the other hand, near infrared (NIR) energy is not affected by those pigments and almost completely penetrates the pallisade parenchyma. When it reaches the spongy parenchyma, the presence of air spaces causes the refraction of the NIR energy in various directions. This results in approximately half the energy exiting the leaf from the lower epidermis and the other half from the top epidermis, towards the sky.” (REMOTE..., [s.d.], tradução nossa).

das folhas pode ser observada em plantas albinas, que têm a mesma aparência de “parafina”. Aliás, o único motivo das folhas normais serem escuras é a eficiente absorção da radiação fotossinteticamente ativa (i.e. visível) pelos pigmentos presentes nos cloroplastos, como clorofilas (que absorvem vermelho e azul) e pigmentos acessórios (que absorvem verde). Folhagens de sombra costumam ter folhas ainda mais escuras, para aproveitar ao máximo a pouca radiação disponível. A reflexão seletiva das folhas é utilizada no sensoriamento remoto para detecção de assinaturas espectrais, que indicam espécies ou estado fitossanitário.

Fig. 6 Absorção, refletância e transmissão em diversas camadas foliares.
Azul; verde; vermelho; infravermelho próximo
Fonte: Remote..., [s.d.]

Adicionalmente, as folhas são cobertas por uma cera que reflete parte da radiação (inclusive a visível) (WARK, 2011).

Sendo tão importante no ganho térmico e com efeitos visíveis nulos (e.g. sem ofuscamento), foram desenvolvidos diversos materiais que têm a capacidade de refletirem seletivamente a radiação NIR (emulando as folhas),

mantendo a possibilidade de cores mais escuras que os tetos brancos. Alguns pigmentos inorgânicos complexos especiais podem ser aplicados em diversas superfícies, como telhas e paredes, ou até mesmo asfalto, que se mantém a até 15 °C a menos que asfalto convencional (KINOUCI et al., 2004¹⁰⁵ apud. SYNNEFA et al., 2007). Como comparação, uma tinta preta normal possui um albedo global de 0,05; em uma tinta preta “fria”, esse valor chega a 0,27, um aumento de 440%. Há, porém, redução no desempenho com o tempo, que pode ser parcialmente recuperado com lavagem da superfície (SYNNEFA et al., 2007).

Fig. 7 Comparação de temperaturas de revestimento preto convencional (3,4) e um refletor de NIR (1,2). Apesar de serem visualmente idênticos, o revestimento convencional se aquece consideravelmente mais, por absorver a radiação NIR invisível.
Fonte: SYNNEFA, et al. 2007.

4.1.1.1 Ondas longas

Outro fator que limita seus ganhos térmicos radiativos líquidos é a *emissividade* (ϵ) do material vegetal. Longe da faixa visível, em uma fatia bem menos energética do espectro eletromagnético, está o *infravermelho distante* (ou *far*

¹⁰⁵ Kinouchi, T., Yoshinaka, T., Fukae, N., Kanda, M., 2004. Development of cool pavement with dark colored high albedo coating. Fifth Conference for the Urban Environment, Vancouver, Canada.

infra-red, FIR), que corresponde à radiação emitida por corpos a temperaturas ambientes. Todo material acima do zero absoluto emite essa radiação; ela é fruto da movimentação das partículas (i.e. sua temperatura). Objetos a temperaturas ambiente emitem predominantemente radiação FIR; conforme se aquecem, passam a emitir também infravermelho próximo, visível e até ultravioleta e além, seqüência facilmente observável em uma lâmpada incandescente. Essa radiação é chamada de radiação de corpo negro, por ignorar toda radiação refletida (i.e. como um objeto preto) e considerar apenas aquela emitida.

Um objeto que estivesse totalmente isolado (e.g., no espaço) emitiria lentamente sua energia térmica até esgotá-la (zero absoluto). Porém, havendo outro objeto em seu “campo de visão”, haverá uma troca de energia térmica radiativa entre eles, mesmo sem contato — um absorveria parte da radiação emitida pelo outro.

Diferentes materiais emitem essa radiação com diferentes intensidades. Metais, devido ao “mar de elétrons” característico de sua estrutura atômica, são relativamente difíceis de serem penetrados por radiação eletromagnética, refletindo facilmente a que vem de fora (daí sua aparência brilhante e baixíssima transparência) e dificultando a saída de sua própria radiação emitida (daí o baixo calor irradiado; mesmo em altas temperaturas, pouco se sente seu calor sem encostar neles). Por outro lado, muitos materiais não metálicos, como água e vegetação, não têm essa dificuldade. Assim, absorvem abundantemente a radiação de ondas longas incidente (raramente significativa), além de emitirem amplamente a sua própria radiação.

O eventual ganho ou perda de energia térmica (i.e. aquecimento ou resfriamento) será determinado pela temperatura relativa, sempre tendendo ao equilíbrio (como toda troca térmica) — um objeto com temperatura maior que o entorno sempre tenderá a se resfriar radiativamente, seja de modo rápido (objeto e entorno com alta emissividade) ou lento (objeto e entorno com baixa emissividade), até que atinja a temperatura dos objetos do entorno.

Além disso, a emissão aumenta com a quarta potência da temperatura; isto é, um pequeno aumento de alguns graus causa um grande aumento na emissão do material. Isso explica por que, por exemplo, um asfalto escuro exposto à luz solar não fica tão quente a ponto de derreter — quanto mais quente ele fica, *menor* é sua capacidade de reter esse calor radiativamente; logo, os altos ganhos são rapidamente compensados por sua cada vez maior emissão, chegando a uma temperatura estável de equilíbrio, como uma válvula de escape.

Deve ser lembrado que *a absortividade em radiação de ondas longas pouco tem a ver com a absortividade da radiação de ondas curtas* (i.e. albedo, exposto anteriormente) — um objeto “escuro” (baixo albedo) pode ter alta ou baixa emissividade. Como exemplo, tanto a água quanto a vegetação possuem alta emissividade, mesmo que suas características visuais sejam radicalmente diferentes. De modo similar, um teto branco não é necessariamente mais emissivo que um revestimento asfáltico. A “radiação de corpo negro” nada tem a ver com a cor do objeto. Não é possível avaliar a emissividade através de propriedades visuais.

Synnefa et al. (2007) definem as duas principais características radiativas de um material como seu **albedo** (se reflete ou absorve ondas curtas) e sua **emissividade** (se emite/absorve ou reflete ondas longas); um material ideal para uma envoltória (que queira evitar ganhos radiativos) teria *um alto albedo e uma alta emissividade*. Ou seja, além de evitar os ganhos por ondas curtas, esse material emitiria com facilidade, em forma de ondas longas, os eventuais ganhos¹⁰⁶. A tabela a seguir demonstra os valores de α e ϵ de diversos materiais.

106 A reflexão de ondas longas tem uma importância secundária nos ganhos radiativos.

	Material	Emissividade	Albedo
artificiais	vidro comum	0,90 — 0,95	Transparente
	alumínio, cromo (polidos)	0,02 — 0,04	0,10 — 0,40
	tijolo ou pedra ou telha cor vermelha	0,85 — 0,95	0,65 — 0,80
	tijolo ou pedra ou telha cor amarela	0,40 — 0,60	0,30 — 0,50
naturais	solo nu	0,90 — 0,98	0,05 — 0,40
	deserto	0,84 — 0,91	0,20 — 0,45
	capim	0,90 — 0,95	0,16 — 0,26
	floresta decídua com folhas	0,98	0,20
	água	0,92 — 0,97	0,03 — 1,00
	neve fresca	0,99	0,95
	gelo marítimo	0,92 — 0,97	0,30 — 0,45

Tabela 4: Propriedades radiativas de materiais artificiais e naturais.

Fonte: Adaptado de Frota; Schiffer (2001) e Oke (1987)

Como pode ser visto, mesmo materiais construtivos não metálicos possuem emissividade menor que água, vegetação e solo. Além disso, como já exposto, o albedo global da vegetação é enganadoramente alto em relação à sua aparência. Isso faz com que plantas tenham propriedades radiativas perto das “ideais”.

Em relação aos outros materiais não vegetais da cobertura, o meio de cultura possui normalmente um albedo baixo, que é reduzido ainda mais com seu molhamento: “Albedo foi consistentemente mais alto em amostras secas (0,17–0,40), diminuindo substancialmente (0,04–0,20) conforme umidade era adicionada.” (SAILOR et al., 2008).¹⁰⁷ Um solo que acaba de ser saturado, se exposto à radiação solar, tenderá a absorver mais radiação que um solo seco. Mesmo assim, em uma cobertura verde, o objetivo é que haja um mínimo de solo exposto por estar idealmente sombreado pela folhagem. Uma opção para minimizar a exposição é a colocação de alguma cobertura (*mulch*) sobre o solo que tenha alta refletividade, como pedriscos ou mesmo tetra-pak com a parte

¹⁰⁷ “Albedo was consistently higher for dry samples (0.17–0.40) decreasing substantially (0.04–0.20) as moisture was added.” (SAILOR, et al. 2008).

metálica para cima (para hortas). Mesmo sem *mulch*, um solo exposto rapidamente perderá umidade superficial, quando seu albedo efetivo aumentará.

A parcela energética ganha ou perdida exclusivamente por radiação, seja de ondas curtas ou longas, e incluindo a reflexão, emissão e absorção, é denominada *forçante radiativa*, sendo útil separá-la de outras dinâmicas térmicas, como condução, evaporação e convecção. É basicamente o balanço da energia que adentra um sistema.

Por exemplo, a forçante radiativa **global** é o balanço médio de ganhos radiativos terrestres. Ela determina a temperatura global, e um eventual resfriamento ou aquecimento. Nuvens e neve diminuem a forçante global por seu alto albedo, refletindo para o espaço as ondas curtas. Já a fuligem tem efeito oposto, absorvendo a radiação de ondas curtas.

A importância da emissividade é demonstrada pelo “efeito estufa” — após o aquecimento, a superfície terrestre tende a emitir o calor por radiação de ondas longas para o espaço. Porém, alguns gases atmosféricos (vapor d’água, gás carbônico, metano, óxido nitroso, entre muitos outros) absorvem essa radiação com muita facilidade, do mesmo modo que o vidro de uma estufa invernal. Impedida de ir embora, a radiação se mantém na Terra, causando um aquecimento vital à biosfera, mas que pode ser facilmente desestabilizado. Ou seja, fazendo um paralelo: tanto em envoltórias de edificações quanto no clima global, quanto mais facilidade houver de emitir o calor por ondas longas, menor será o seu ganho térmico; daí a importância de materiais altamente emissores em envoltórias.

Considerando objetos isolados, como corpos celestes, a forçante radiativa é fundamental para determinar seu aumento ou diminuição de temperatura geral. Porém, não é a única dinâmica existente em sistemas abertos, como ecossistemas.

4.1.1.2 O termo “sombreamento”

Na descrição do desempenho térmico de coberturas verdes, muito se descreve o “sombreamento” que as folhas trazem, indicando a interceptação da radiação solar. Porém, faria sentido dizer que uma telha “sombreia” a edificação? Ou ainda que a tinta “sombreie” uma parede?

O uso do termo “sombreamento” para descrever a interceptação da luz solar por *revestimentos* é inadequado, já que os materiais estão tão próximos à estrutura que transmitem significativamente o calor interceptado (e.g. condução, convecção, radiação). Uma coisa é uma árvore sombrear a edificação, já que a planta está fora do sistema representado pela edificação. É mais difícil, porém, considerar que telhas “sombreiam” a edificação,¹⁰⁸ ou que a tinta “sombreia” a parede.

O mesmo vale para sistemas de outras escalas — não se pode afirmar que arborização “sombreia” a cidade (arborização é parte do sistema urbano); pode-se, sim, dizer que *nuvens* sombreiam a cidade. Aumentando a escala, já não se pode dizer que nuvens “sombreiam” a Terra; já a *lua* o faria em um eclipse; e assim por diante. Assim, o termo “sombreamento” supõe um certo distanciamento que torna desprezíveis as trocas térmicas entre o sombreador e o sombreado, restando *apenas a interceptação da luz como efeito significativo*.

Afinal, é possível dizer que as plantas sombreiam a cobertura? A vegetação nos tetos verdes é um dos poucos revestimentos que poderiam (com cautela) ser considerados “sombreadores” da edificação *caso se despreze completamente a (baixa) condução térmica entre elas e o solo*; mesmo assim, o termo deve ser evitado por não levar em consideração o destino da energia radiativa interceptada.

108 Por outro lado, um beiral “sombreia” a parede externa.

4.1.2 Calor latente

Como visto, a vegetação se livra radiativamente de boa parte da carga térmica solar, mesmo que isso seja feito de um modo um tanto sorrateiro, através da reflexão da radiação invisível NIR, sem utilidade para a planta. Mesmo assim, ainda há significativo ganho térmico por parte das plantas, já que sua sobrevivência depende da exposição solar.

Isso é parcialmente remediado por meio da transpiração, controlada pelos estômatos. Um stress térmico causa a abertura das células guardiãs, o que gera evaporação da água de dentro da folha, ou seja, gera-se calor latente (em vez de calor sensível, que implicaria em aumento de temperatura). Mesmo sem stress térmico, qualquer abertura estomática para absorção de CO₂ gera inevitavelmente a perda de H₂O. Essa perda é limitada, em última análise, pela disponibilidade hídrica do sistema base-solo-vegetação.

Além disso, existe ainda a *evaporação do solo*, que compete com a força matricial para prender a água. Além da evaporação superficial, há ainda a evaporação interna, ou seja, a difusão da atmosfera interna extremamente saturada por meio dos macroporos em direção à superfície, onde ocorre a perda da água. A evaporação do solo faz com que haja um estoque hídrico independente da planta pronto para ser evaporado, o que ajuda a cobertura se resfriar. Há ainda a evaporação da interceptação¹⁰⁹, importante nas primeiras 24 horas após uma chuva, ou talvez na evaporação de orvalho logo de manhã.

A evaporação é aproveitada por diversas estratégias para a redução de carga térmica de uma edificação.¹¹⁰ Um exemplo são os *tetos “molhados”*, que abrigam um tanque de água na cobertura com função de perda de calor latente.¹¹¹ Outro sistema experimental envolve a colocação de material poroso sobre coberturas (*“teto poroso”*), como folhelho (um tipo de xisto altamente

109 Cf. 7.1 Comportamento hídrico das coberturas verdes, pág. 194.

110 Pode parecer pouco, mas a evaporação de 1g de água resfria em 1 °C 3 kg de concreto.

111 Cf. RUNSHENG, et al (2003), que utiliza um tecido de algodão flutuante para otimizar a evaporação

poroso) e outros materiais para absorção e evaporação de água. Os resultados mostram ser uma alternativa a tetos verdes, por emular a retenção do meio de cultura e sua função evaporativa, sem a manutenção de plantas ou alto custo (WANPHEN; NAGANO, 2009). Do mesmo modo, uma parede ventilada úmida foi desenvolvida para resfriamento interno na Itália (NATICCHIA et al. 2010), e uma mureta cerâmica altamente capilar foi testada como método de resfriamento de áreas externas (HE; HOYANO, 2010).¹¹²

O fenômeno ocorre mesmo em telhas cerâmicas, que são porosas:

Deve-se atentar que, apesar da semelhança entre a transmissão térmica da cobertura com telhas de barro e aquela com telhas de fibrocimento, o desempenho térmico proporcionado por estas duas coberturas é significativamente diferente pois as **telhas de barro são porosas e permitem a absorção de água (de chuva ou de condensação). Este fenômeno contribui para a redução do fluxo de calor para o interior da edificação, pois parte deste calor será dissipado no aquecimento e evaporação da água contida nos poros da telha.** Desta forma, sugere-se a utilização de telhas de barro em seu estado natural, ou seja, isentas de quaisquer tratamentos que impeçam a absorção de água (ABNT, 2003; pág. 23, nota 2, grifo nosso).¹¹³

Está sendo estudado até mesmo um método que utiliza a mudança de estado de um material (no caso fusão e solidificação, em vez da evaporação) para amortecer o resfriamento ou aquecimento de um edifício, chamado de *phase change material* (PCM) (PASUPATHY; VELRAJ, 2008), com resultados promissores, mas com eficiência atualmente limitada ao inverno.

Qualquer tipo de evapotranspiração é limitado pela umidade relativa do ar, sendo seu poder de arrefecimento máximo a diferença entre a temperatura de bulbo úmido e bulbo seco, ou seja, não funciona em atmosfera com umidade relativa de 100%. Porém, esse limite teórico raramente é atingido, havendo

112 Cf. Santamouris e Kolokotsa (2013), que avaliaram diversas técnicas evaporativas, diretas (dentro do ambiente) e indiretas (fora do ambiente).

113 Cf. BUENO, André Duarte. Transferência de Calor e Umidade em Telhas: Simulação e Análise Experimental. 1994. 133p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1994.

no mínimo uma diferença prática de 2 °C (SANTAMOURIS; KOLOKOTSA, 2013).

4.1.3 A fotossíntese

É importante compreender brevemente o processo fotossintético, que é o principal motivador do metabolismo vegetal, e que traz consequências à transpiração local. Sendo extremamente complexo e ainda sendo revelado, não se adentrará em detalhes, apresentando-se apenas os três principais metabólismos vegetais e como eles afetam o calor latente local.

A fotossíntese pode ser dividida em duas etapas, que ocorrem simultaneamente: a etapa clara (“*foto*”) e a escura (“*síntese*”). Na etapa clara, há a utilização da radiação PAR (visível), capturada pelos pigmentos foliares (clorofila e pigmentos acessórios), para quebra de uma molécula de água e, por um processo complexo, utilização do hidrogênio para criação de ATP, a energia química utilizada pelos seres vivos. O restante da molécula de água, ou seja, oxigênio, é liberado como refugo (BONAN, 2002).

Já na etapa escura, ou seja, que não depende de radiação, o ATP criado é utilizado, em outro processo complexo chamado de ciclo de Calvin, para a síntese de moléculas de gás carbônico em açúcares. Essas moléculas são trazidas para dentro do cloroplasto por uma enzima chamada *rubisco*¹¹⁴, a proteína mais abundante na Terra. Porém, o oxigênio inadvertidamente concorre com o gás carbônico nesse transporte, provavelmente pelo rubisco ter evoluído em uma atmosfera ancestral com menos oxigênio. Isso acarreta em um fenômeno chamado de *fotorrespiração*, em geral deletério à planta, e que consome energia para ser neutralizado, diminuindo a eficiência do processo (BONAN, 2002).

Existem plantas que evoluíram para evitar a fotorrespiração, utilizando outra enzima, *PEP carboxilase*¹¹⁵, que não tem afinidade com oxigênio, para

114 abreviatura de *ribulose-bisfosfato carboxilase oxigenase*.

115 do inglês *PhosphoEnolPyruvate carboxylase*, ou fosfoenolpiruvato carboxilase.

captura do gás carbônico, que então é levado para dentro de estruturas isoladas chamadas bainha do feixe¹¹⁶, onde esse gás carbônico é finalmente repassado para o rubisco e utilizado na etapa escura. Ou seja, há uma *separação física* entre a atmosfera externa e o local da etapa escura. Esse metabolismo é denominado C4, por ter uma cadeia de quatro carbonos como primeiro produto dessa etapa. A eficiência do processo fotossintético é otimizada, garantindo que as plantas tenham altas taxas de crescimento e produtividade, como milho, cana-de-açúcar e alguns capins. Porém, como pode ser deduzido pelas plantas descritas, há a necessidade de altas temperaturas ambientais e grande disponibilidade de água, o que limita esse tipo de vegetação a climas tropicais; caso contrário, é provável que tivessem dominado outras áreas do globo (BONAN, 2002).

Há ainda um terceiro metabolismo que evita a abertura estomática durante o dia para evitar perdas hídricas excessivas, abrindo os estômatos somente à noite, quando há a síntese de ácidos a partir do CO₂ atmosférico. Esses ácidos servem de reservatório que são utilizados durante o dia como fonte de CO₂ sem a necessidade de contato com a atmosfera. Esse é o chamado *Metabolismo Ácido das Crassuláceas*¹¹⁷, não estando, porém limitado a esta família, estando presente em plantas que necessitam manter suas reservas de água a todo custo, como epífitas e desérticas (BONAN, 2002). Esse é o metabolismo predominante em plantas xerófilas frequentemente utilizadas em coberturas verdes extensivas, como as do gênero *Sedum*¹¹⁸. É importante enfatizar que não há abertura estomática (i.e. transpiração) durante o dia, reduzindo a possibilidade de transformação do calor sensível em latente nessas horas, podendo prejudicar o potencial de resfriamento.

116 *bundle sheaths*

117 *Crassulaceae*, família de plantas suculentas xerófilas.

118 Na verdade, parecem ser MAC facultativas, se utilizando do metabolismo C3 convencional em condições de boa irrigação (TORRES, 2010).

O nível de iluminação em que a fotossíntese é capaz de suprir apenas a energia necessária para os processos metabólicos básicos da planta é o *ponto de compensação*; uma intensidade menor que isso pode definhando a planta. Conforme o nível de iluminação aumenta, a intensidade da fotossíntese linearmente; fica disponível energia para crescimento, reprodução e armazenamento.

Em um alto nível de iluminação, a folha é incapaz de aproveitar toda a luz, sendo seu o excesso *prejudicial*, como pode ser visto em plantas de sombra colocadas sob a luz direta do sol, que amarelam e morrem. Para evitar isso, a energia absorvida pela clorofila pode ter três destinos: 1) *fotoquímico* (a fotossíntese propriamente dita), 2) *calor* ou 3) *fluorescência*, ou seja, a reemissão em luz visível. Em coberturas verdes, como há grande exposição solar, é possível que parte significativa da energia solar absorvida esteja sendo reemitida visivelmente em frequências menores (i.e. vermelho), o que contribuiria para a dissipação radiativa de energia, junto com a radiação térmica, mas que pode ser difícil de ser detectada visualmente.

Mesmo assim, a assimilação (fotossíntese) corresponde ao destino de apenas 1% da radiação solar total incidente em uma região, atingindo um máximo de 3% somente em culturas extremamente produtivas, como cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.). A afirmação que as plantas não se aquecem porque a energia que viraria calor seria utilizada na fotossíntese é, portanto, exagerada. A fotossíntese tem apenas um papel indireto no balanço térmico da folha, devido à evaporação dos estômatos.

4.1.4 Convecção

De modo similar à evaporação, a convecção depende de características do ar. A convecção em si é o movimento de um fluido devido à diferença de densidade causado por um gradiente de temperatura, fazendo com que, por exemplo, um ar aquecido seja empurrado para cima pelo ar mais frio do entorno, que tem mais peso. Caso haja uma fonte de calor posicionada na parte

inferior, isso causa uma movimentação constante de ar frio deslocando o ar que foi aquecido, este sempre indo para cima.¹¹⁹

Existe ainda a convecção forçada, quando uma movimentação de ar pré-existente (e.g. vento) causa a troca de calor, em vez da movimentação causada pela própria diferença de densidade.

Como modo de troca de calor, a convecção é uma combinação entre mistura de gases (difusão, turbulência etc.) e condução de calor, que ainda existe mesmo em fluidos. No caso de uma cobertura, isso inclui a condução de calor entre a superfície sólida ou líquida para o ar pela camada laminar, e o eventual movimento convectivo formado ou forçado. Essa troca de calor depende de diversos fatores, como condutividade térmica de ambos os materiais, velocidade do vento, diferença de temperatura, formato e tamanho da camada limite laminar, entre outros.

Conforme explicado na evaporação, a camada limite laminar de uma folha depende de seu tamanho e formato, sendo maior em folhas maiores, havendo, portanto, maior dificuldade de trocas convectivas, i.e. um desacoplamento entre a temperatura da folha e a do ar. Ou seja, uma folha grande forma um espesso “escudo” de ar que impede trocas difusivas e convectivas. Isso é útil em plantas tropicais, que têm que sobreviver com altas temperaturas do ar (BONAN, 2002).

A grande superfície de contato entre o ar e a vegetação da cobertura verde, aliado com a maior velocidade do vento naquela altura e ao pequeno tamanho das folhas, faz com que a troca de calor entre teto verde e ar seja eficiente, lembrando que, quase sempre, a temperatura superficial é mais elevada que a do ar. Ou seja, *o teto verde dissipa facilmente seu calor ao ar*. Em contraste, em uma cobertura convencional, há a criação de uma forte camada limite laminar

119 A única força atuante é a gravidade — o ar quente não é puxado para cima, e sim empurrado pelo ar frio, que toma seu lugar.

que impede essas trocas, mantendo uma “tampa” de ar quente presa à superfície caso não haja vento forte o suficiente para dissipá-la.

4.1.5 Condução

Finalmente, apenas depois de consideradas todas as outras trocas, pode-se adentrar na condução, que é o método predominante para determinação de trocas de calor entre edificações e o exterior.

No caso de coberturas verdes, a condução é um processo complexo, pois muitos de seus materiais são porosos, com variação no conteúdo aquoso, além de ser um sistema composto.

A *condutância* propriamente dita é a velocidade de transferência de calor (energia) por um meio dado um gradiente de temperatura. A melhor analogia é a condutância elétrica, que também depende da *condutividade* do material e do *gradiente elétrico* (potencial em volt). Ou seja, a condutância é favorecida pela condutividade do material (i.e. isolante ou condutivo), o formato (maior área e menor distância percorrida a favorecem) e diferença de temperatura/potencial elétrico. Um fio mais espesso (maior área), mais curto ou com material mais condutivo transfere o calor ou eletricidade com maior facilidade; já um fio mais fino (menor área), mais comprido ou com material mais isolante os transfere com dificuldade.

Em geral, quando se trata de envoltórias, faz mais sentido se referir ao comprimento (i.e. tamanho do percurso a ser percorrido pelo calor) como “espessura”, e o equivalente à espessura do fio (i.e. área que o calor tem para se movimentar) como “área”. Mesmo assim, o raciocínio continua o mesmo — quanto maior a área da superfície e menor a espessura do material e maior a condutividade deste, maior será a transferência de calor na interface. Dada uma mesma cobertura, por exemplo, a menor condutância será determinada pela maior espessura e menor condutividade. Se comparado a uma cobertura

convencional, *um teto verde costuma ser mais espesso, favorecendo um isolamento* (NETO, 2009).

Em relação aos materiais, a **vegetação** dificulta enormemente a condução de calor, já que o percurso a ser percorrido por ele é maior que a altura da planta, devendo obrigatoriamente seguir as folhas, o caule e a raiz (maior comprimento). Além disso, esses elementos costumam ser finos (menor área) e ter baixa condutividade.¹²⁰ Isso é facilmente observado na formação de orvalho — o resfriamento radiativo das folhas durante noites limpas não é conduzido ao caule e ao solo com facilidade, o que as torna frias e ideais para condensação do vapor d'água. Assim, a temperatura foliar é pouco influente na temperatura de outros componentes da cobertura devido a essa restrição na condução.

No caso do **meio de cultura**, como já dito, suas características variam enormemente, sendo a principal variável o *nível de umidade* — a presença de água substitui o ar altamente isolante, contribuindo para maior condutividade do material composto.¹²¹ Uma condutividade máxima seria atingida eliminando-se 100% do ar, ou seja, na saturação máxima, que nunca ocorre em uma cobertura verde funcional.

Outra propriedade térmica importante é a *capacidade de calor*, ou seja, quanta energia é necessária para elevar a temperatura de um objeto.

Para defini-la, é importante lembrar a diferença fundamental entre *temperatura* e *calor*, já que são usados coloquialmente como equivalentes (“O ar está quente; está calor”). Em Física, esses termos têm significados mais rígidos.

- **Calor** é *energia térmica*; em mecânica, a energia cinética se “dissipa” em calor; em elétrica, uma resistência “gera” calor; etc. É uma **quantidade de energia** da movimentação microscópica das partí-

120 Compara-se a uma cobertura convencional, onde o percurso do calor é menor (espessura dos materiais), a área é maior, e o material costuma ser mais condutivo.

121 Mesmo que a água tenha uma condutividade mais baixa que o componente quartzo; a compactação do solo teria portanto um efeito maior que o aumento na umidade.

culas e seus componentes, que pode ter origem ou ser transformada em outras formas de energia. Sendo assim, é medida em joules (J) ou calorias (cal).

- Já **temperatura** é a movimentação *cinética* média das partículas detectada por um termômetro. Esse nível de movimentação cinética afeta reações físicas (mudança de estado, emissão de corpo negro etc.) e químicas. É materialmente agnóstica, ou seja, independe do material. É medida em kelvin (K) ou graus Celsius (°C).

A introdução de energia não necessariamente causa uma maior movimentação cinética das partículas; nem essa movimentação cinética é exclusivamente dependente da energia do sistema.

Em outras palavras, pode haver um aumento de temperatura sem introdução de energia — o *aquecimento adiabático* (sem calor), que ocorre, por exemplo, ao se comprimir um gás; há um aumento da movimentação cinética das moléculas devido ao menor volume (a temperatura aumenta), mas não houve troca de calor. O *resfriamento* adiabático ocorre quando uma massa de ar quente chega às camadas superiores da atmosfera, expandindo-se e havendo uma diminuição de temperatura sem troca de calor, que pode condensar o vapor d'água e criar nuvens.

Do mesmo modo, uma troca de calor pode não provocar uma mudança de temperatura — a evaporação demanda energia (calor), mas não há mudança de movimentação cinética molecular sensível ao termômetro; daí o nome *calor “latente”*.

Mesmo fora desses casos, certa quantidade de calor tem efeito variável na temperatura de diferentes materiais devido a diversos fatores do comportamento molecular.¹²² O efeito é que uma mesma quantidade de energia térmica pode provocar uma grande ou pequena alteração na temperatura do material;

122 A energia pode ser usada para outros processos que não têm a ver com a temperatura; por exemplo, a energia pode rotacionar uma molécula; como a temperatura é movimento translacional (deslocamento), e não rotacional (giro), esse calor usado na rotação está “escondido” no material (MORTIMER, 2000).

a isso é dado o nome de *calor específico* do material. Quanto maior o calor específico, mais energia ele pode absorver sem um maior aumento de temperatura. A água, por exemplo, exige grandes quantidades de calor para aumentar sua temperatura, devido às suas propriedades moleculares únicas¹²³. Assim, a presença de água tende a inibir grandes flutuações de temperatura, como pode ser visto no efeito da continentalidade — regiões litorâneas tendem a ter temperaturas mais amenas que as interiores.

Já a *capacidade de calor* é uma propriedade de um *objeto*, levando em consideração sua massa (além do calor específico do material) — quanto maior a massa, mais energia é necessária para aumentar a temperatura.¹²⁴

A capacidade de calor de um meio de cultura dependerá de seus componentes, e novamente a água é o mais variável. Entre os materiais cotidianos, a água possui altíssimo calor específico, exigindo grandes trocas de calor para mudanças pequenas em sua temperatura, com efeito de amortecimento das flutuações diárias. Quanto mais água tiver um meio de cultura, maior será esse amortecimento. Mas a capacidade não depende apenas da água, podendo ser fornecido por outros materiais, em geral bem mais pesados, como a laje de concreto, o quartzo do solo etc. A água é praticamente inexistente em coberturas convencionais, sendo que sua capacidade de calor dependerá exclusivamente desses materiais sólidos, com menor retorno carga $\times$ capacidade de calor.

A profundidade das flutuações diárias de temperatura depende de uma propriedade composta: a *difusividade térmica*, que determina a velocidade com que um objeto fica com temperatura uniforme. Ela é facilitada pela condutivi-

123 i.e. o calor é usado para vibração das pontes de hidrogênio, das ligações covalentes (vibracional) e rotação das moléculas (rotacional) de H_2O , que competem com a movimentação cinética (translacional) que dá a temperatura.

124 Pode-se usar uma analogia mecânica: o quanto uma quantidade de energia cinética alterará a velocidade de um objeto depende das propriedades desse objeto: massa, formato etc. Dada uma mesma quantidade de energia, os efeitos seriam radicalmente diferentes para uma bola de gude (que dispararia) e uma bola de boliche (que mal moveria).

dade térmica (transferência de energia), mas dificultada pelo calor específico (energia necessária para mudança de temperatura). Assim, em um meio de cultura, a difusividade máxima é atingida em uma umidade média, quando todo o sistema de solo tende a uma temperatura uniforme; em baixas umidades, a difusão da temperatura é comprometida pelo excesso de ar isolante; em altas umidades, a difusão da temperatura é inibida pela grande quantidade de calor demandada pela água para mudar sua temperatura. A difusividade é importante na determinação do alcance de reações e comportamentos que dependem da temperatura (profundidade que um solo congela durante o inverno, por exemplo) (OKE, 1987).

Assim, em geral, a presença de água tem papel ambíguo para as propriedades condutivas: contribui para transferência de calor no meio poroso, que evita sobreaquecimento superficial, mas leva calor à laje; por outro lado, inibe flutuações de temperatura neste meio, e, conseqüentemente, do ar.¹²⁵

Em relação a materiais não aquosos, matéria orgânica tem baixa condutividade térmica; como efeito, um meio de cultura altamente orgânico tenderia a ter altas flutuações térmicas nas camadas superficiais, que podem chegar a temperaturas extremas, não difundidas para as camadas inferiores. Por outro lado, quartzo, componente mineral predominante em muitos solos, possui alta condutividade térmica: um meio altamente mineral conduz facilmente o calor superficial para as camadas inferiores, evitando o sobreaquecimento da superfície, mas transferindo a energia para as camadas inferiores, e, no caso de uma cobertura verde, até a laje. Santamouris et al. (1994) propõem o uso de materiais altamente condutivos para a pavimentação urbana, efetivamente utilizando a geotermia para inibição de flutuações excessivas na superfície,

125 “A capacidade de calor variou entre 830 a 1123 J/(kg K) para amostras secas, e 1085–1602 J/(kg K) para amostras úmidas. [...] A condutividade térmica variou entre 0,25 a 0,34 W/(m K) para amostras secas, e 0,31–0,62 W/(m K) para amostras úmidas.”

“Specific heat capacity ranged from 830 to 1123 J/(kg K) for dry samples and 1085–1602 J/(kg K) for wet samples. [...] Thermal conductivity ranged from 0.25 to 0.34 W/(m K) for dry samples and 0.31–0.62 W/(m K) for wet samples.” (SAILOR, 2008, tradução nossa).

que causam aquecimento do ar por condução e convecção, e aquecimento do entorno por irradiação.

Eliminando-se o efeito evapotranspirativo com o ensaio em ambientes com ar saturado ($UR = 100\%$), Neto (2009) delineou o papel exato da condução de calor em coberturas verdes:

O comportamento descrito pelos telhados nos ensaios [em ambiente controlado] demonstra que o ecotelhado possui uma inércia térmica maior e uma transmitância térmica menor que os demais [fibrocimento e tetra-pak], proporcionando um conforto térmico melhor na edificação (NETO, 2009, p. iii).

Kotsiris (2012) e Eumorfopoulou e Aravantinos (1998) concluíram que, em termos de resistividade térmica, o uso de materiais isolantes especializados tem maior eficácia que o conjunto meio-de-cultura-vegetação, e que o desempenho é otimizado combinando as duas estratégias. Ou seja, uma cobertura verde não substitui um sistema de isolamento térmico quando este se faz necessário, apesar de contribuir para seu desempenho.

4.1.5.1 A inadequação da transmitividade de tetos verdes

Ao contrário de coberturas tradicionais, não é suficiente a modelagem por transmitividade térmica, ou *U-value*,¹²⁶ sem levar em consideração fatores como ganhos radiativos ou evaporação, vitais nas coberturas verdes:

O sombreamento contra a radiação solar, evapotranspiração e processos fisiológicos vegetais afetam o desempenho da cobertura mais que o aumento na resistência térmica.¹²⁷

Para Wark (2011):

A habilidade de um teto verde de controlar o fluxo de energia térmica não pode e não deve ser descrito apenas por

¹²⁶ Valor de condução de energia entre dois ambientes de temperaturas diferentes, que supõe um fluxo de energia por unidade de área de acordo com condutividades de cada material, dado um gradiente térmico entre as faces interna e externa.

¹²⁷ “the shading from solar radiation, evapotranspiration and plant physiological processes affect the roof performance more than the increase in thermal resistance.” (CASTLETON et al., 2010, p. 1585).

uma resistência, **nem mesmo uma resistência “ajustada”, “equivalente” ou “aproximada”**.¹²⁸

Moody e Sailor (2013) complementam:

Planta, solo, isolamento e camadas de apoio são os quatro elementos-chave que afetam o desempenho térmico de um teto verde. Essas camadas se combinam para criar um material composto único que age como massa térmica com resfriamento evaporativo e propriedades térmicas variáveis com o tempo. **Tratar um sistema tão complexo como uma simples camada isolante com uma resistência melhorada é fundamentalmente errado**, já que não captura o armazenamento térmico e o resfriamento evaporativo transientes que ocorrem em um teto verde.¹²⁹

Sailor et al. (2008) também afirmam que:

Pesquisas recentes investigaram os impactos energéticos de eco-telhados em edificações tanto através de medição direta dos fluxos de calor [...], ou com modelagem [...]. As abordagens baseadas em medição em geral utilizam dados de fluxo de calor para estimar a resistência geral para condução de calor (*R-value*) para a construção do eco-telhado. Apesar de útil, **qualquer modelo que almeje capturar a natureza transiente da transferência de calor em um sistema de eco-telhado deve levar em consideração a condutividade térmica, densidade e capacidade de calor específica do solo em si**. Senão, o armazenamento de calor no solo — que pode ser significativo em construções com eco-telhado — pode não ser adequadamente representado.¹³⁰

128 “the ability of a green roof to control the flow of heat energy cannot and should not be described only by an *R-value*, not even an “adjusted,” “equivalent,” or “approximate” *R-value*.” (WARK, 2011, tradução e grifo nossos).

129 “Plant, soil, insulation, and support layers are the four key elements affecting the thermal performance of a green roof. These layers combine to create a unique composite material that acts as a thermal mass with evaporative cooling and time-varying thermal properties. Treating such a complex system as a simple insulative layer with an enhanced “*R-value*” is fundamentally wrong as it does not capture the transient thermal storage and evaporative cooling that take place on a green roof.” (MOODY; SAILOR, 2013, p. 262, tradução e grifo nossos).

130 “Recent research has investigated the building energy impacts of ecoroofs either through direct measurement of roof heat fluxes [...], or through modeling [...]. The measurement-based approaches generally use heat flux data to estimate the overall resistance to conduction heat transfer (*R-value*) for the ecoroof construction. While this approach is useful, any model that is to capture the transient nature of heat transfer in an ecoroof system must account for the thermal conductivity, density, and specific heat capacity of the soil itself. Otherwise, the heat storage in the soil — which may be significant in ecoroof constructions — cannot adequately be represented.” (SAILOR et al. 2008, p. 1247, tradução e grifo nossos)

Assim, não se pode estabelecer um *U-value* para uma cobertura ou parede verde, nem mesmo de modo aproximado, pois isso acarretaria em uma representação insuficientemente fiel de seu comportamento térmico, que vai além do isolamento.

4.1.6 Conclusão acerca do comportamento térmico de coberturas verdes

Ferraz (2012) realizou medições em duas células de ensaio localizadas na Cidade Universitária da USP, comparando uma cobertura cerâmica com uma cobertura verde com grama-amendoim (*Arachis repens*), leguminosa tropical de metabolismo C3, concluindo o melhor desempenho do teto vegetado:

O protótipo com cobertura verde tem um desempenho melhor que o protótipo com cobertura cerâmica em períodos de frio e calor. Mesmo sem condicionamento artificial, a **edificação com cobertura verde conseguiu, nas condições de verão analisadas, atingir as condições que a NBR 6401/08 considera como de conforto**; já a edificação com cobertura cerâmica, sob as mesmas condições, apontou a necessidade de condicionamento artificial para atingir os mesmos resultados. Sob as condições de inverno analisadas, as duas edificações apontaram a necessidade de condicionamento artificial para atingirem as condições consideradas na norma, entretanto, observou-se que **a edificação com cobertura verde necessitaria de 10 vezes menos potência para aquecimento que a outra**, promovendo assim, menor gasto energético com condicionamento artificial (FERRAZ, 2012, p. 93, grifo nosso).

Devido à complexidade do sistema de tetos verdes, que inclui componentes inertes, porosos, vivos etc., há dificuldade na modelagem de seu desempenho; como já dito, é simplista estabelecer uma transmissividade para elas:

Modelar o comportamento térmico de tetos verdes requer o estudo de diversos fenômenos que interagem, como transferência de massa e calor e fisiologia vegetal. Muitos modelos de tetos verdes estão disponíveis na literatura, desde os mais simples aos mais detalhados. O modelo mais simples considera apenas a diminuição da transmitividade térmica da cobertura. Muitos outros estudos apresentaram modelos

mais detalhados, com balanço térmico que considera outros fenômenos influentes, como sombreamento solar pela folhagem e resfriamento por evapotranspiração (JAFFAL et al., 2012, p. 158, tradução nossa).¹³¹

Para Moody e Sailor (2013), por ser errado representar os efeitos energéticos de tetos verdes simplesmente como isolamento adicional (já que o balanço energético do teto verde é complexo e nem sempre levam a economia de energia), eles propõem outro critério “**Dynamic Benefit of Green roofs**” (DBGR), que leva em consideração a razão entre o consumo de um edifício tradicional e outro com teto verde, sendo maior que 1 caso haja economia.

Gaffin et al. (2005) combinaram o efeito evaporativo em um índice que simula um albedo de uma superfície vegetada como se a perda de calor latente se desse por reflexão, de modo a comparar tetos verdes e brancos. Sua conclusão é que tetos verdes têm “**albedo equivalente**” a superfícies brancas não metálicas, como gesso branco, sem a necessidade de limpeza, e com benefícios hídricos e ecológicos adicionais.

Assim, as propriedades térmicas de coberturas verdes **não** podem ser resumidas apenas a um dos espectros:

- *claro-escuro* (albedo)
- *emissivo-refletivo*
- *latente-sensível*
- *isolante-condutivo*
- *maciço-leve*

... sendo uma amálgama destes (*[claro/médio]-emissivo-latente-isolante-maciço*), afetando diferentes aspectos do ganho, da transferência e da capacidade térmicas simultaneamente, sendo verdadeiros “conjuntos de massa

¹³¹ “Modeling the thermal behavior of green roofs requires the study of several interacting phenomena, such as heat and mass transfer and plant physiology. Many green roof models are available in the literature, ranging from simple to detailed. The simplest model considers only the decrease of the roof U-value. Many other studies have presented more detailed models, with a heat balance that considers additional influencing phenomena, such as solar shading by foliage and cooling by evapotranspiration.” (JAFFAL et al. 2012, p. 158).

térmica com resfriamento evaporativo”.¹³² Por outro lado, as coberturas convencionais são normalmente alguma combinação de *[escuro/médio]-emissivo-sensível-[condutivo/isolante]-[médio/leve]*, que favorece a elevação da temperatura interna e externa por meio da transformação de grandes quantidades de energia luminosa em térmica, conversão eficiente de energia térmica em temperatura, e a transferência de calor (ao ar e ao interior) devido às altas temperaturas criadas, associado à carência de dissipação radiativa ao espaço (pela baixa emissividade).

¹³² “*thermal mass assemblies with evaporative cooling*” (MOODY; SAILOR, 2013).

Fig. 8 “Fluxo de calor por um teto vegetado”

Primeira coluna: Folhagem; lacuna dos caules; meio de plantio; camada de drenagem; impermeabilização; isolamento térmico (se necessário); laje; teto interno; interior

Legenda: adição de calor por radiação solar; radiação solar refletida; transferência de calor por radiação de ondas longas para o céu/atmosfera; fluxo de calor convectivo com o ar ambiente; transferência térmica por massa (evaporação); transferência por condução através do sistema de teto verde; calor absorvido ou liberado por camadas de grande massa; calor gerado internamente por corpos, iluminação, computadores etc.

Fonte: WARK, 2011, tradução nossa

A radiação recebida por uma envoltória é inevitável — como visto, em um dia limpo com sol a pino, uma superfície horizontal chega a receber 1000 W/m^2 (BONAN, 2002). Dado esse influxo de energia, a estratégia é que essa energia não cause um aumento extremo de temperatura.

A estratégia primária é evitar a absorção da radiação luminosa; a secundária é que a energia absorvida não se traduza em aumento da temperatura; a terciária é conter a energia e evitar que passe para a laje e consequentemente o ambiente interno.

Como visto, os tetos verdes oferecem todas as estratégias: refletindo boa parte da radiação luminosa; fazendo com que os eventuais ganhos sejam dissipados radiativamente, evaporativamente, transpirativamente e convectivamente; que a energia restante seja utilizada pelos componentes para aumento de temperatura próprio, poupando a laje; e que a energia seja retardada ao máximo na chegada à laje, tirando proveito da flutuação diária na radiação.

4.2 Políticas de Economia de Energia

Tendo explicado brevemente o comportamento térmico de um teto verde, fica claro que há menores ganhos térmicos pela cobertura, o que acarreta em uma economia de energia que seria usada para o condicionamento artificial, podendo até mesmo dispensá-lo.

A economia de energia é assunto importante no mundo todo, sendo que a motivação principal nos EUA e na Europa é a prevenção de emissões de carbono por meio das usinas termoeletricas a base de gás natural e carvão.

No Brasil, mesmo com uma diferente matriz elétrica, ainda há necessidade de menor consumo elétrico e energético em geral.

4.2.1 Brasil

As crises do petróleo na década de 1970 forçaram atitudes do governo brasileiro em relação à economia de energia:

O Brasil possui, há pelo menos duas décadas, programas de Eficiência Energética reconhecidos internacionalmente: o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), o Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural (CONPET) e o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE). Mesmo antes destes, ainda em 1975, o Grupo de Estudos sobre Fontes Alternativas de Energia (GEFAE) organizou, em colaboração com o MME, um seminário sobre conservação de energia, tratando-se, portanto de uma iniciativa pioneira no país. Ainda em 1975, a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) obteve autorização da Presidência da República para alocar recursos financeiros à realização do Programa de Estudos da Conservação de Energia, passando a desenvolver e apoiar estudos visando à busca de maior eficiência na cadeia de captação, transformação e consumo de energia (BRASIL: MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2011, p. 3).

Mesmo assim, uma nova crise energética em 2001, desta vez com motivos internos, forçou a promulgação da Lei nº 10.295, também conhecida como **Lei da Eficiência Energética**, em 17 de outubro, que “dispõe sobre a política nacional de conservação e uso racional da energia, visando à alocação eficiente dos recursos energéticos e também a preservação do meio ambiente”. Houve também o incremento do *Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica*, o Procel, que induziu a criação do subprograma **Procel Edifica**. As medidas de economia de energia estabelecidas em 2001, porém, já estavam superadas em 2005, e em 2007 houve um crescimento de 4% no consumo nacional.

O setor de edificações é um dos que mais consomem energia elétrica no Brasil — do consumo total de 426 TWh em 2009, 178 TWh correspondiam às edificações residenciais, comerciais, de serviço e públicas, com possibilidade de redução de consumo de aproximadamente “30% com implementação de ações de eficiência energética nos sistemas de iluminação, ar condicionado e intervenções arquitetônicas na envoltória no que diz respeito às edificações existentes. Este percentual se eleva para 50% em edificações novas” (BRASIL: MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2011, p. 70).

Setor	energia (%)	eletricidade (%)
residencial	11,3	23,9
comercial	3,0	15,1
público	1,8	8,6
Total predial	16,1	47,6

Tabela 5: Consumo predial por setor em 2010.

Fonte: EPE, 2010.

O consumo elétrico das edificações é basicamente de iluminação, climatização e atividades-fim, sendo a tendência para a iluminação é uma redução em consumo devido à introdução de tecnologias mais eficientes, como lâmpadas fluorescentes compactas. Já a climatização tem a tendência de aumento de consumo, devido a fatores climáticos globais e locais, além do maior acesso a condicionadores de ar e ventiladores pela população. As atividades-fim também tendem a aumentar seu consumo, devido à aquisição de mais equipamentos pelo mesmo motivo.

Existe o risco de se adotarem morfologias urbanas e prediais que agravem o consumo por climatização, exatamente por estar mais acessível, o que exige maior conscientização sobre a arquitetura bioclimática, com estratégias que devem ser resgatadas e inovadas.

4.2.1.1 Procel Edifica

Entre as atividades do Procel Edifica estão “pesquisas e apoio à produção de novas tecnologias, materiais e sistemas construtivos, além de estimular o desenvolvimento de equipamentos eficientes, utilizados em edificações” (BRASIL: MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2011, p. 71), organizados em seis vertentes, duas delas com especial interesse aos tetos verdes:

Tecnologia

Ampliar as possibilidades do mercado de equipamentos, materiais e técnicas eficientes quanto ao uso da energia, através do fomento à pesquisa, sensibilização e implementação de

projetos de EEE; realizar ensaios de materiais e equipamentos; realizar avaliações de eficiência energética em instalações de climatização; certificar materiais e equipamentos; e construir unidades de demonstração de EEE. Estimular a pesquisa e o desenvolvimento de materiais e tecnologias mais eficientes e/ou que contribuam para a eficiência energética do ambiente construído, considerando inclusive a avaliação do impacto ambiental de sua produção e o seu ciclo de vida

Habitação e Eficiência Energética

Fomentar estudos, pesquisas e ações para promover melhoria dos prédios e habitações, principalmente às de baixa renda; incluir parâmetros para a orientação de EEE nos Códigos de Obras, Planos Diretores e Caderno de Encargos (BRASIL: MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2011, p. 71).

Para isso, foram estabelecidas linhas de ação diversas:

Habitação

Estimular a inserção de conceitos de eficiência energética em edificações em projetos de interesse social financiados por agentes dos governos federal, estadual e municipal (Exemplo: projetos financiados pela CAIXA- programa Minha Casa, Minha Vida).

Promover a integração e a sinergia entre a política habitacional e da política energética para as edificações. [...]

Regulamentação

Implementar a Rede de Eficiência Energética em Edificações para aplicação da metodologia de avaliação do desempenho termo energético de edificações; Fomentar a incorporação de temas de eficiência energética em edificações nos estudos de planejamento urbano e nos códigos de obra e cadernos de encargo dos municípios brasileiros

Regulamentar através de legislação pertinente, tornando obrigatória a etiquetagem de: prédios públicos em um horizonte máximo de 10 anos, de edificações comerciais e de serviços em 15 anos e residenciais em 20 anos (BRASIL: MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2011, p. 71).

O documento dá especial destaque aos edifícios públicos, com uma política de incentivo baseada em modelos positivos. “O consumo de energia elétrica relativo aos Prédios Públicos em 2009 foi aproximadamente de 12 TWh. Desta forma, os Prédios Públicos contribuíram com 2,8% do consumo total de energia elétrica no País”, (BRASIL: MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2011, p. 78) com potencial conservador de otimização (basicamente iluminação e ar condicionado) de 20% (2,4 TWh).

A readequação de edifícios públicos se encaixa na estratégia de incentivo social, agindo como exemplo. Além disso, força o mercado e o corpo técnico a se adequar a tecnologias, vencendo a rampa inicial.

O Governo Federal figura como um dos maiores consumidores de energia elétrica, fato que sugere torná-lo um **exemplo para a sociedade brasileira** de gestão dos recursos naturais e financeiros, eficiência energética e sustentabilidade.

Espera-se que as propostas decorrentes do Plano Nacional de Eficiência Energética, bem como do projeto Eficiência e Sustentabilidade na Esplanada dos Ministérios, resultem na formatação de um projeto piloto, embrião de uma política pública de longo prazo, que possa contemplar o universo dos 27 mil prédios públicos federais, bem como **induzir ações semelhantes nas esferas estadual e municipal** (BRASIL: MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2011, p. 83, grifo nosso).

4.2.1.2 Etiquetagem

De modo similar à consagrada pontuação existente para eletrodomésticos, em 2009 o INMETRO lançou uma pontuação para edificações, com notas de A a E, de acordo com a eficiência energética em três critérios: envoltória, iluminação e condicionamento de ar (com ENCE – *Etiqueta Nacional de Conservação de Energia* parciais para cada, além de um geral para a edificação toda). Existem ainda “bonificações” no caso de desempenhos extraordinários, como: 40% no consumo de água; 10% com uso de energias renováveis; 30% cogeração ou inovações tecnológicas; 70% de fração solar para coletoras.

Existem dois métodos de avaliação: um **prescritivo**, baseado em pontuação, e um **simulatório**, que ecoa as abordagens mencionadas anteriormente.

Dá-se ênfase à envoltória, cujo desempenho é julgado por uma das oito zonas climáticas brasileiras onde a edificação se localiza, e usa critérios como percentual de abertura, fator solar do vidro, entre outros.

As residências são divididas em:

- Unidades Habitacionais Autônomas (UH)
- edificações unifamiliares (casas): ENCE para desempenho no verão e no inverno, ponderando as pontuações de acordo com áreas de permanência prolongada, como quartos e salas.
- aquecimento de água
- condicionamento (quando existente)
- Unidades Autônomas de Edificações Multifamiliares (apartamentos): edificações multifamiliares, ponderado por andares, dando uma pontuação geral ao edifício. As áreas de uso comum são calculadas separadamente.

Segundo INMETRO ([s.d.]), o Programa Brasileiro de Etiquetagem tem como objetivo:

Prover informações úteis que influenciem a decisão de compra dos consumidores, que podem levar em consideração outros atributos, além do preço, no momento da aquisição dos produtos.

Estimular a competitividade da indústria, através da indução do processo de melhoria contínua promovida pela escolha consciente dos consumidores (INMETRO, [s.d.]).

A certificação começa a ser um fator na escolha de produtos:

É o que mostra, por exemplo, pesquisa recente da MarketAnalysis: 40% dos consumidores brasileiros já estão dispostos a pagar mais 10% por eletrodoméstico de marca mesmo desconhecida se ele possuir o Selo Procel (FIGUEIREDO, [s.d.]).

Assim, ao contrário de subsídios ou descontos, o programa de etiquetagem visa incentivar a escolha voluntária dos consumidores, fornecendo informações confiáveis (“informação perfeita”) para tal, assim incentivando a indústria a alcançar tais objetivos. É discutível se tal medida se mostrará eficaz na compra ou construção de habitações. Há um incentivo econômico de longo prazo pela própria economia na conta de luz, e a etiquetagem ajuda na explicitação de tal economia, mas depara-se naquele problema do uso esporádico do condicionamento artificial (em comparação com EUA, por exemplo), que faz com que a economia financeira real seja menos importante. Não fica claro para o comprador, que a residência é “mais confortável” termicamente, i.e., que uma nota alta na etiquetagem equivaleria à compra de um aparelho de ar condicionado em uma residência com nota baixa. Caso ele nunca tenha tido condicionamento artificial e seus custos, a etiquetagem essencialmente não lhe informa nada. Ele pode não perceber que possui um aparelho de ar condicionado “virtual”.

4.2.1.3 Normas

Acerca das normas construtivas, Neto (2009) nota a ausência da tecnologia de tetos verdes justamente sobre o desempenho térmico de edificações:

Ao estudar a norma ABNT 15220 [Desempenho térmico de edificações] parte 3 [Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social], especificamente no Anexo D que especifica valores característicos de transmitância térmica, capacidade térmica e atraso térmico de coberturas, percebeu-se que **não existem referências a telhados ecológicos**. Admitindo que essa norma é seguida pelos profissionais vinculados à construção civil, seria de se esperar que ela contemplasse também novas tecnologias e novos materiais, mais adequados às necessidades de eficiência energética e redução de impacto ambiental das técnicas construtivas (NETO, 2009, p. 52, grifo nosso).

Assim, uma opção para incentivo a tetos verdes é o reconhecimento de seu papel no desempenho térmico das edificações, tanto nas normas ABNT, quanto nos selos como o Procel Edifica. Isso provavelmente se dá devido à pouca difusão da tecnologia do país. Experimentos conduzidos pelas próprias entidades poderiam verificar o desempenho dos telhados vegetados. Dado o consumo elétrico em ascensão no país, assim como maior acesso a sistemas de condicionamento artificial, é vital o reconhecimento da arquitetura bioclimática como peça fundamental no quadro energético brasileiro.

Capítulo 5 – Clima urbano

As características ópticas e térmicas das superfícies predominantes em um local, assim como sua configuração geométrica, determinam em parte os seus microclimas e mesoclimas. As cidades, por possuírem grandes quantidades de superfícies duras e impermeáveis, acabam tendo climas diferentes do entorno, seja ele rural, florestal ou desértico. Neste capítulo, será dado destaque ao fenômeno do aquecimento urbano.

5.1 Aquecimento urbano

O aquecimento urbano foi primeiramente descrito pelo químico e meteorologista amador britânico Luke Howard, que registrou aumento de temperatura de Londres em relação ao entorno rural, atribuindo-o à concentração populacional e ao formato das edificações. O efeito foi confirmado empiricamente em muitas cidades.

As consequências do aquecimento urbano incluem desconforto humano, podendo causar morte em casos extremos (ondas de calor em Chicago, 1995 e França, 2003); aumento no uso de condicionamento artificial e consequente consumo de energia; alterações climáticas complexas, que podem incluir tempestades mais violentas; agravamento de poluição como a criação de ozônio. Já em períodos frios, o aquecimento pode ser considerado desejável.

A geração de qualquer clima, seja local ou global, é um fenômeno extremamente complexo, envolvendo inúmeras variáveis interdependentes estudadas ao longo de décadas, e ainda um campo de intensa pesquisa, descobertas e debate. A alteração radical da superfície junto ao intenso consumo energético, ambos caracterizadores das aglomerações urbanas, causará diversos efeitos com pesos e inter-relações variadas, envolvendo fatores fixos, variáveis, climáticos, morfológicos, cíclicos etc., impossíveis de se resumir brevemente, e sem consenso de seu funcionamento exato.

Aqui está apresentada uma representação conceitual do processo, de cunho explicativo e não preditivo, buscando estabelecer uma moldura geral baseada na Física termodinâmica; a seguir, será focado o papel das coberturas verdes como mitigador do fenômeno.

O aquecimento urbano, ou a diferença de temperatura característica entre a cidade e o entorno rural, é um fenômeno pouco intuitivo — *se o montante energético incidente (vindo do sol) pode ser considerado igual para a cidade e para áreas rurais/florestais, como é possível que as cidades tenham temperaturas mais altas?* Aonde vai a energia no caso do campo/floresta? Como a mesma incidência causa efeitos climáticos tão diversos? Por que não ocorre o contrário, ou seja, a cidade ser mais fria que o entorno?

O conceito chave é lembrar que *temperatura* não é sinônimo de energia (calor). Não importa a energia incidente, *contanto que ela não se traduza em altas temperaturas*.

O processo de transformação da energia radiativa em aumento de temperatura é complexo, envolvendo muitas etapas. Cada etapa representa uma oportunidade para reduzir o montante transferido para a seguinte, em um gradual afunilamento.

- Primeiro, há a absorção parcial da radiação de onda curta e longa, ocasionando uma entrada de energia; parte é refletida.
- O calor (energia térmica) é então gerado. Porém, a energia térmica pode ser consumida em processos moleculares *que não ocasionam aumento de temperatura*
 - A mudança de estado (quebra da ligação intermolecular), e.g. evaporação. A evaporação da água, por quebrar uma ligação forte como a ponte de hidrogênio, demanda enormes quantidades de energia; a vaporização de um litro

d'água tem energia suficiente para elevar 6 litros do líquido de zero para 100°C. Cria-se *calor “latente”*.

- Vibração das ligações intramoleculares (e.g. covalentes) ou pontes de hidrogênio (H₂O) e rotação das moléculas, ocasionando alta capacidade de calor; e.g. água.
- O restante é movimento cinético das moléculas, simplificadamente o principal causa de aumento de temperatura.
- Nota-se a enorme importância da água nessa etapa.
- Finalmente há aumento de temperatura. De acordo com a lei da termodinâmica, esse calor será dissipado de três modos, evitando seu acúmulo temporal e espacial:
 - condução;
 - convecção;
 - irradiação de ondas longa.

Gráfico 2 Diagrama esquemático do percurso energético até sua dissipação.

Caso se desejasse um aumento máximo na temperatura:

- maximizar a absorção da radiação solar e consequente transformação em calor;

- maximizar o aumento da temperatura evitando fenômenos moleculares não cinéticos;
- minimizar a dissipação de calor convectiva, condutiva (material isolante) e irradiativa (material pouco emissor), gerando picos e *hotspots*.

O que acontece em áreas urbanas é que há uma relativamente eficiente e rápida transformação da energia incidente em temperatura altas, o que não ocorre no campo/floresta.

O *albedo* urbano não é necessariamente mais baixo que o florestal. A vegetação tem albedo global de médio (campos, plantações) a baixo (floresta, pinheiros), enquanto superfícies urbanas variam de muito claras (tinta branca) a muito escuras (asfalto). Uma inspeção visual de fotos aéreas mostra que uma área urbana dificilmente pode ser descrita como uma mancha escura em um entorno claro.

Já a *emissividade* sofre sim uma redução com a urbanização, pela remoção de superfícies altamente emissivas como as vegetais e aquáticas, e sua substituição por concreto e asfalto, com emissividades intermediárias. Isso causa um acúmulo de calor análogo a um efeito estufa (que nada mais é que uma redução efetiva na emissividade global terrestre).

Fatores adicionais incluem:

- a *razão de Bowen* sofre uma forte alteração — enquanto em florestas a parcela latente (evapotranspiração) é alta em relação à sensível, nas áreas urbanas acontece o contrário;
- a *atividade humana* utiliza energia que, em sua maior parte, vira calor: fornecimento elétrico somado à queima de combustíveis (tanto fósseis quanto biogênicos, e.g. gasolina, diesel, álcool e gás natural ou GLP) e à atividade metabólica. O montante acaba sendo aproximadamente 10% da energia térmica urbana total;

- a *poluição* causa diversos efeitos diretos (albedo das partículas) e indiretos (nucleação e geração de nuvens) no clima local, sendo seu papel no aquecimento urbano ambíguo e complexo.

Segue-se que mitigação desse efeito é conseguida de diversas maneiras:

- 1) reduzir a energia líquida absorvida pelo sistema urbano, aumentando o albedo, que determina a parcela refletida;
 - *utilização de tetos brancos e pavimentos claros, pavimentos e tetos frios (refletores de NIR), e vegetação (arborização urbana, parques, jardins, quintais, esverdeamento de edifícios);*
- 2) com o calor gerado:
 - 2a) a mudança de estado da matéria utiliza parcela que seria transformada em movimento cinético das partículas; ou seja, o **calor latente**, como evaporação, evita que a energia transforme-se em aumento de temperatura. Isso pode se dar com o aumento da evapotranspiração na forma de:
 - *vegetação (arborização urbana, parques, jardins, quintais, esverdeamento de edifícios);*
 - *corpos d'água;*
 - *superfícies porosas ("tetos porosos", repermeabilização do solo, pavimentos drenantes).*
 - 2b) transformação ineficiente do calor restante em temperatura, com uso de materiais altamente capacitivos (e.g. água)
 - *aumento da presença de água, idem ao anterior;*
- 3) Inevitavelmente, há aumento de temperatura; deve-se garantir que não seja extremo, lançando mão das três formas de dissipação.

- 3a) a **distribuição espacial** (evitar *hotspots*) consiste em transferir o calor para sumidouros¹³³ próximos: e.g. solo (condução), corpos d'água (convecção) e ar (convecção);
- *aumento da condutividade térmica de pavimentos, efetivamente aproveitando a massa térmica do solo (i.e. calor excessivo é conduzido às camadas inferiores — compare com um piso termicamente isolante, onde há sobreaquecimento superficial e consequente emissão e condução do calor para a atmosfera/entorno¹³⁴);*
 - *ventilação urbana e aumento da superfície geral*
- 3b) a **distribuição temporal** (evitar picos) advém do reconhecimento que o influxo energético não é constante, tendo um pico aproximado ao meio dia, e esgotando-se com o anoitecer. Os sumidouros anteriores podem, portanto, “recarregar” sua capacidade à noite, dissipando o calor nos períodos que não há incidência solar. Há uma distribuição e suavização da curva de temperatura, com o cuidado anterior de permitir realmente sua dissipação.
- 3c) a irradiação é potencializada pela emissividade — garantir que a energia térmica seja eficientemente emitida ao sumidouro celeste.

133 As edificações não são válidas como sumidouros, justamente por abrigarem pessoas.

134 Mallick e Bhowmick (2014) explicam como as propriedades térmicas do asfalto contribuem para o aquecimento urbano. A dissipação condutiva de calor é importante para revestimentos sobre o solo:

“Devido à própria natureza do material, um pavimento de asfalto possui uma alta absorptividade (0,85–0,93) da radiação solar. Ao mesmo tempo, sua baixa condutividade (0,76–1,4 W/mK) evita que a energia absorvida seja transportada para outro local. Isso, associado à capacidade de calor relativamente alta (921–1.674 J/khK) da mistura asfáltica permite que armazenem a energia térmica que tem o potencial de ser coletada de diversos modos.”

“Due to the very nature of the material, an asphalt pavement has a high absorptivity (0.85-0.93[...]) of solar radiation. At the same time its low conductivity (0.76-1.4 W/mK[...]) prevents the absorbed energy from being transported elsewhere. This, coupled with relatively high thermal capacity (921-1,674 J/KgK [...]) of the asphalt mixture, allows asphalt pavements to store thermal energy that has the potential of being harvested in various ways.” (MALLICK; BHOWMICK, 2014, tradução nossa).

- *uso de materiais altamente emissivos, como solo, água e vegetação;*
 - *remodelamento da geometria urbana, evitando cânions profundos.*
- 4) em uma parcela comparativamente menor, a economia de energia elétrica e de combustíveis fósseis.

5.1.1 Tetos Verdes

Independente das causas exatas do fenômeno do aquecimento urbano, que podem ter pesos variáveis dependendo do clima e configuração urbana, e ainda não foram esclarecidas com exatidão, há uma relação muito clara entre a presença de vegetação e temperaturas mais amenas, o que indica fortemente que o plantio é uma estratégia viável para sua redução.

Memon et al. (2008), em uma revisão de 19 trabalhos, identificaram que:

- nove recomendam o **plantio** para a mitigação, sendo que cinco *exclusivamente* essa estratégia;
- cinco recomendam alterações diversas no **albedo**;
- quatro estabelecem resfriamentos **evaporativos** diversos como viáveis;
- outras estratégias citadas envolvem alteração na **configuração urbana** e instalação de **painéis fotovoltaicos**.

A ressalva é que “a maioria das medidas propostas eram baseadas em simulações numéricas e não haviam sido implementadas” (MEMON et al., 2008, tradução nossa).¹³⁵ Eles elaboram:

As medidas mitigadoras propostas podem ser divididas em três tipos: aquelas que não puderam ser implementadas de nenhum modo, aquelas que mostraram benefícios significativos mas que não foram implementadas, e aquelas que foram implementadas seja por simulação ou através de pesquisa de campo. Em comparação com os primeiros dois ti-

¹³⁵ “[...] most of the proposed measures were based on numerical simulations and were not implemented.” (MEMON et al., 2008)

pos, o último pode ser mais promissor; mesmo assim, ainda carece de implementação prática. A possibilidade é que a **implementação prática pode não trazer os benefícios e enormes economias relatados** (MEMON et al., 2008, p. 126, tradução e grifo nossos).¹³⁶

Assim, as coberturas verdes contribuem de diversas maneiras:

- a vegetação reduz a forçante radiativa (somatória de fenômenos radiativos de ondas longas e curtas) por reflexão e emissão (geralmente possuindo alto fator de visão de céu);
- o aumento da presença de água no meio de cultura e nas plantas ajuda no calor latente e capacidade térmica;
- o próprio meio de cultura distribui a carga térmica espacialmente (evitando *hotspots*) e temporalmente (evitando picos);
- a folhagem ajuda na distribuição espacial por convecção aérea (i.e. folhas não sobre-aquecem).

136 “The proposed mitigating measures could be divided into three types, those which could not be implemented in anyway, those which have shown significant benefits but have not implemented and those which have been implemented either through simulation or through field survey. In comparison to the former two the last type might be more promising, however, it still lack practical implementation. The possibility is that practical implementation may not yield the reported huge savings and benefits.” (MEMON et al., 2008, p. 126).

5.2 Políticas de Clima urbano

5.2.1 Mundo

O aquecimento urbano está presente na maioria das cidades do mundo. Santamouris (2001¹³⁷ apud MOONEN et al., 2012), em uma compilação de dados, descobriu que a intensidade do fenômeno varia de 1 grau em Johannesburgo (África do Sul) e Singapura, a até 14 graus em Paris; São Paulo tem um aquecimento urbano relativamente ameno, com média de 2 graus. IPCC (1990¹³⁸ apud MOONEN et al. 2012) chegou a valores similares (entre 1,1 e 6,5 °C).¹³⁹ Poucas, porém, possuem políticas específicas para sua mitigação; Chicago é uma exceção.

5.2.2 Chicago

O esforço para o combate ao fenômeno iniciou-se por vontade do prefeito Richard Daley, que desde o início de sua administração pretendendo ser um “prefeito verde”. Ele visitou a cidade-irmã Hamburgo em 1998; logo depois, um acordo (*settlement*) da companhia de energia por conta de apagões no mesmo ano entregou US\$ 100 milhões ao longo de quatro anos à prefeitura, que foram dirigidos parcialmente a estratégias de manejo de calor urbano.

O plano iniciou-se em 2000 pelo esverdeamento demonstrativo da própria sede da prefeitura (1860 m²), um edifício que não teve alguns andares construídos, que permitiu estruturalmente a instalação de tetos verdes intensivos e extensivos. Em 2003, o Departamento de Planejamento e Desenvolvimento da

137 Santamouris, 2001. Energy and climate in the urban built environment. James & James Ltd, London, UK.

138 IPCC, 1990. Climate Change—The IPCC Impacts Assessment. Australian Government Publishing Service, Canberra, Australia.

139 “Santamouris (2001) compiled data from a large number of heat island studies worldwide. He reports heat island intensities for European cities ranging between 2.5 °C (London, UK) and 14 °C (Paris, France), for American cities ranging between 2 °C (Sao Paulo, Brasil) and 10.1 °C (Calgary, Alberta), for Asian cities ranging between 1 °C (Singapore) and 10 °C (Pune, India), and for African cities ranging between 1.9–2 °C (Johannesburg, South Africa) and 4 °C (Cairo, Egypt). The IPCC has compiled data from various sources and found heat island intensities ranging from 1.1 °C up to 6.5 °C (IPCC, 1990)” (MOONEN et al., 2012, p. 199).

cidade organizou uma série de seminários discutindo incentivos e educando construtores e imobiliárias sobre medos e conceitos errôneos da tecnologia, que hoje é o centro de sua política de ocupação sustentável, que também inclui arborização urbana (GEHR, 2013).

A cidade exige alguns compromissos ambientais de projetos envolvendo assistência de zoneamento ou financeira municipais. Edifícios públicos devem também ser certificados pelo LEED e incluir tetos verdes. Existem também incentivos — tetos verdes são aceitos como área permeável no cálculo de retenção de águas pluviais durante a aprovação do projeto (GEHR, 2013).

O esforço resultou em 651 000 m² de tetos verdes (GEHR, 2013), que, porém, representam apenas 0,1% da área total de coberturas, que contrasta com a Alemanha, com 15 a 20% das coberturas verdes. “[Os alemães] estão duas décadas à frente dos EUA” (Steven Peck *in* KAMIN, 2010).

O esforço atual é a incorporação permanente dos tetos verdes em leis locais. O próximo passo é a adoção de um sistema baseado em desempenho (GEHR, 2013).

5.2.3 Brasil

Duarte (2001) descreve algumas políticas urbanas relacionadas à melhoria dos microclimas:

Algumas cidades brasileiras já tem alguns instrumentos de intervenção implementados, em processo de implantação, ou ainda sob a forma de projetos de lei, e que podem resultar na melhoria das condições microclimáticas urbanas. Esses instrumentos são:

- incentivos fiscais (desconto ou isenção do IPTU, em alguns casos) para a preservação e o aumento de áreas verdes nos lotes urbanos;
- uso de instrumentos de política urbana, tais como a concessão onerosa do direito de construir e transferência de potencial construtivo para incentivo à proteção de patrimônio natural e ambiental

- criação de um anel de conservação sanitário-ambiental
- exigência de taxa mínima de permeabilidade do terreno
- parcerias entre prefeitura e iniciativa privada para plantio e manutenção de áreas verdes, em troca da cessão do espaço para veiculação publicitária;
- estabelecimento de critérios e multas para corte de árvores
- afastamentos mínimos entre edifícios para garantir melhores condições de insolação e ventilação
- incentivos para a adoção de galerias comerciais nos pavimentos térreos dos edifícios, proporcionando, dentre outros fatores, proteção contra sol e chuva para o pedestre, incentivando assim o percurso a pé nas áreas de comércio e serviços (DUARTE, 2001, p. 25).

Existem, portanto, algumas políticas públicas voltadas ao clima, pelo viés do estímulo à vegetação.

5.2.4 São Paulo

O clima de São Paulo é influenciado por inúmeros fatores naturais e antrópicos, como topografia, orientação, proximidade com corpos d'água, altitude, nível e tipo de ocupação, verticalização etc. De modo a ilustrar a complexidade do assunto, foi incluída em apêndice uma leitura de relatório de Tarifa e Armani (2000), em uma tentativa de analisar e visualizar as especificidades regionais. Cf. Apêndice E - O clima da Região Metropolitana de São Paulo, pág. 294.

Capítulo 6 – Poluição atmosférica

As cidades concentram poluição atmosférica devido às atividades humanas como veículos, indústrias e queima de material, além de fatores morfológicos (e.g. edifícios altos) que dificultam sua dispersão. Como maior parte da população mundial atualmente vive em cidades, essa poluição causa grandes danos à sua saúde, com perdas de produtividade e gastos na saúde pública, além de alterações climáticas, que tem seus próprios efeitos.

A poluição pode ser considerada como uma externalidade negativa das atividades econômicas. Portanto, há pouco incentivo privado para seu controle, demandando quase sempre intervenções do estado. O principal instrumento é normativo — os *padrões de qualidade do ar*, metas com valores máximos de determinados poluentes, que guiam as outras políticas públicas.

Em termos práticos, as estratégias para mitigação da poluição são 1) a redução da emissão, 2) a deposição/eliminação e 3) a dispersão (essa última não sendo válida para poluentes globais, como dióxido de carbono).

O método mais eficaz e com melhor custo-benefício é a redução de emissões, exemplificada pela inspeção veicular.

A deposição/eliminação de poluentes da atmosfera configura uma estratégia *complementar* à redução das emissões, com a vegetação urbana como elemento chave. Os tetos e paredes verdes se apresentam como ferramenta para aumento da massa foliar e de solo exposto em áreas com pouca possibilidade de arborização (i.e. centrais, geralmente as mais poluídas). O funcionamento específico da remoção varia com o tipo de poluição, como será visto.

6.2.1 Tipos de poluentes

Poluentes atmosféricos podem ser **gasosos**, ou **sólidos/líquidos**, estes últimos denominados *material particulado*. Ambos possuem enorme variedade em comportamento, distribuição, longevidade e consequências para a saúde

e clima, devido a diferentes composições químicas, tamanhos, concentrações e contextos.

Material particulado (MP) são partículas em suspensão no ar, tendo origens naturais ou antropogênicas. Vão desde poeira e sedimentos, que são rapidamente depositadas devido ao grande tamanho, a partículas ultrafinas geradas por reações químicas no próprio ar.

O MP é classificado de acordo com seu diâmetro aerodinâmico: MP 10 para as menores de 10 microns, as mais frequentemente monitoradas; MP 2.5, ou *finas*, quase exclusivamente antropogênicas, 80% originárias de veículos; MP 1, *ultrafinas*, menores que 1 microns, secundárias (oriundas de reações químicas no ar) e as mais comuns nos EUA.

O MP antropogênico pode causar sérios danos à saúde humana, como agravamento de alergias, tosse e morte prematura, tendo efeitos similares ao tabagismo. Em geral, quanto menores as partículas, maior a possibilidade de penetração no corpo humano, desde as vias aéreas superiores (“inaláveis”), para os brônquios e alvéolos (“pulmonares”) e circulação sanguínea (as ultrafinas, ou “respiráveis”).

Os **efeitos na vegetação** são sutis e raramente agudos: a aderência das partículas às folhas pode alterar suas propriedades óticas, causando aquecimento e diminuindo o fluxo luminoso para dentro da folha; partículas finas podem adentrar os estômatos, causando obstrução; partículas ácidas podem alterar as propriedades do solo, prejudicando a disponibilidade de cátions; metais podem bioacumular nos tecidos vegetais, causando toxicidade em casos extremos (a tolerância varia com a espécie).

O **efeito climático** do MP é variável e complexo; *diretamente*, alteram a forçante radiativa local e global, absorvendo (fuligem) ou refletindo (sulfatos) a radiação solar; *semi-diretamente*, irradiam o calor absorvido, podendo formar camadas estagnadas na atmosfera; *indiretamente*, constituem núcleos

de condensação, podendo causar chuvas ou, pelo contrário, semear nuvens excessivamente, gerando gotículas suspensas esparsas em vez de gotas com dimensões precipitativas; essas nuvens então podem refletir a radiação solar, em uma complexa cadeia de efeitos.

A **remoção** de MP se dá por diversos mecanismos, de acordo com as dimensões das partículas.

- a **deposição seca** inclui *sedimentação gravitacional* (partículas maiores), a *interceptação* (colisão lateral), a *impactação* (colisão frontal em obstáculo fino), a *turbulência* (colisão interparticular com coalescência) e *difusão* (movimento aleatório), entre outros.
- a **deposição úmida** se dá por captura pela precipitação, quando a chuva “limpa” o ar, ou a supramencionada formação de núcleos de condensação.

A vegetação tem configuração morfológica própria para exposição solar (que se alinha com sedimentação gravitacional) e captura de gases (adequada para interceptação), multiplicando a superfície depositiva urbana. Assim, as plantas se mostram ótimos captadores de MP, potencializadas por fatores como presença de pelugem, rugosidade superficial, abundância de pecíolos (ligação entre folha e caule, que causa muitos eventos de impactação), aderência e umidade; o destaque é dado às árvores.

A floresta urbana presta, portanto um serviço vital à saúde da população; a colocação direta de arborização próxima a vias se mostrou uma estratégia viável para aproveitar esse potencial, especialmente em relação a partículas mais grossas. Nowak et al.(2006) conclui que a arborização urbana americana contribui para a retirada de material particulado, evitando oito mortes por ano apenas na cidade de Nova York, e uma média de uma morte em cidades menores.

Em relação a soluções não arbóreas, o esverdeamento do interior de cânions viários urbanos potencializa a deposição de MP devido às turbulências

típicas desses locais, destacando a importância de paredes verdes. Tetos verdes também são uma estratégia pesquisada, sendo que a estimativa de sua eficácia varia enormemente.

Após a deposição, o material pode ter três destinos: carreamento em uma chuva; quebra em outros compostos, ou armazenamento (biorretenção), dependendo do tipo de poluente.

Partículas podem, porém, voltar ao ar através da ressuspensão, estimada em 50% das partículas (OTELLÉ et al., 2010), especialmente próximo a tráfego veicular.

Já **poluentes gasosos** não podem ser “depositados”, devendo ser quebrados ou, no caso de poluentes locais, dispersados.

Entre os inúmeros poluentes gasosos, destacam-se os COVs, ou **compostos orgânicos voláteis**, majoritariamente de origem vegetal, com funções botânicas ainda não inteiramente compreendida.¹⁴⁰ Seus efeitos à saúde humana são variados, sendo a maioria inofensiva; uma eventual toxicidade se dá apenas por exposição prolongada, e inclui potencial cancerígeno no caso de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs).

Seu efeito mais grave é participar da formação de ozônio troposférico, devendo-se atentar na escolha de espécies vegetais que exalem menos COVs em áreas onde a geração do ozônio seja uma preocupação (ver abaixo). Um COV simples, o **metano**, é oriundo de decomposição em aterros ou pecuária, e é um poluente global como forte gás estufa.

O **monóxido de carbono** é carbonífero, porém inorgânico, originário da combustão incompleta, e também muito perigoso à saúde, prejudicando o transporte de oxigênio no sangue, podendo causar falta de concentração e até

¹⁴⁰ Podem incluir a eliminação de carbono, hormônios florais, alelopatia (eliminação de plantas competidoras), comunicação, entre outras.

acidentes veiculares. Ele pode ser fatal mesmo em pequenas concentrações, com efeito cumulativo em curto prazo.

Outro poluente de destaque são os **óxidos de nitrogênio (NOx)**, oriundos de combustão industrial e veicular, que força os abundantes oxigênio e nitrogênio a reagirem entre si. Além de ter efeito na saúde (irritação dos olhos) e no clima (chuva ácida), seu efeito mais grave é como outro precursor fundamental na geração de ozônio troposférico, juntamente com CO/compostos orgânicos e luz solar.

O **ozônio troposférico (O₃)** é um poluente secundário, podendo ser gerado a quilômetros de fontes poluidoras, com graves conseqüências à saúde, inclusive redução na expectativa de vida, mesmo tendo pouca longevidade (meia hora) após ser gerado. Estratégias para sua mitigação incluem a redução do efeito de aquecimento urbano (altas temperaturas aceleram sua produção) e coibir a emissão de seus precursores NOx e COVs. Assim, as coberturas verdes destacam-se como estratégia viável por reduzirem temperaturas superficiais, desde que atentada à produção excessiva de COVs vegetais.

Além desses, **óxidos de enxofre**, originários de diesel e outros combustíveis, causam chuvas ácidas.

6.2.2 Sequestro de carbono

O “efeito estufa” é fundamental para a manutenção da temperatura da Terra, sendo que sua intensidade variou enormemente durante a pré-história. Muitos gases componentes da atmosfera (e.g. vapor d’água, dióxido de carbono, metano) são opacos a algumas frequências de luz, em especial na faixa do infravermelho distante (radiação térmica terrestre). Ou seja, a atmosfera é relativamente transparente à radiação solar de ondas curtas incidente, que causa aquecimento da superfície; esta, por sua vez, reirradia a energia no infravermelho distante (radiação de corpo negro), que encontra uma atmosfera agora opaca, sendo assim reabsorvida e reemitida para a superfície, em um processo de acúmulo energético similar a estufas de vidro.

Atualmente, a liberação do carbono primordial armazenado em petróleo, carvão e gás natural por meio da queima de combustíveis fósseis faz com que a atmosfera atual adquira lentamente características térmicas da atmosfera primordial altamente carbonífera; ou seja, há um desequilíbrio no sistema térmico global, que causa o chamado “aquecimento global”, acelerado pela Revolução Industrial.

Várias iniciativas tentam coibir o acúmulo de gás carbônico e outros gases de efeito estufa, e incluem como estratégias básicas 1) a *diminuição de sua liberação* e 2) o seu *sequestro* em formas inertes, como madeira e plantas.

A quantidade de carbono (C) presente na vegetação é proporcional (45–50%) ao seu peso seco (BONAN, 2012). Um crescimento da biomassa de um local implica em um sequestro líquido de carbono, i.e. um sumidouro. Já a deterioração da biomassa, e.g. por meio de queimada ou apodrecimento, gera uma liberação líquida de gás carbônico, i.e. uma fonte. O equilíbrio é dinâmico — sempre há incorporação e liberação de carbono em todo sistema ecológico; o fator considerado para determinar o status fonte/sumidouro é se a liberação se sobrepõe ao acúmulo, ou vice-versa.

Se a quantidade de carbono é proporcional à biomassa, então a capacidade de um sistema ecológico de sequestrar mais carbono só existirá quando este ainda estiver em crescimento, sendo limitado ao seu tamanho máximo. Coberturas verdes em geral possuem pouca biomassa se comparado a sistemas naturais (e.g. florestas), em especial as extensivas.¹⁴¹

Podemos assim separar os diferentes fatores relativos ao sequestro de carbono de uma cobertura verde (dados numéricos de Getter, 2009), e se eles são iniciais ou constantes, e sumidouro (–) ou fonte (+):

(+) **Incorporação (inicial)**: pegada de carbono dos materiais da cobertura, ou seja, gás carbônico liberado nas suas produções.

- barreira de raízes: 219 g C/m²
- camada de drenagem: 535 g C/m²
- substrato, areia: 92 g C/m²
- **substrato, ardósia expandida: 5.769 g C/m²**
- total: 6,6 kg C/m²

(–) **Sequestro (efetivamente inicial)**: limitado à biomassa seca, que se estabiliza após o crescimento inicial; mortandade o reverte; inclui parcela orgânica no meio de cultura.

- biomassa vegetal aérea: 168 g C/m²
- biomassa vegetal subterrânea: 107 g C/m²
- substrato: 100 g C/m²
- total: 375 g C/ m² vitalício, *não anual*

(–) **Redução no consumo (constante)**: apenas se houver economia (devido ao desempenho térmico da cobertura) de energia elétrica ou aquecimento *gerados por queima de combustíveis fósseis*.

- eletricidade e gás natural: 702 g C/m².ano

141 No caso do conteúdo de carbono do ecossistema, além do conteúdo de carbono vegetal, pode-se também considerar animais (desprezível no caso de aves e mamíferos, mas significativa em artrópodes) e armazenagens abióticas (matéria orgânica, especialmente no solo). Como os meios de cultura já se iniciam com matéria orgânica, o sequestro adicional no solo durante a vida da cobertura é desprezível.

(+) **Manutenção (constante)**: irrigação, podas, fertilização (não considerada em Getter, 2009).

Assim, a pegada de carbono inicial advinda da fabricação dos materiais, transporte, construção, além da utilizada na manutenção (poda, irrigação) deve ser compensada pelo seqüestro em biomassa (limitado) e pela economia de energia elétrica de fontes fósseis (constante), para que a cobertura possa ser considerada um sumidouro de carbono.

$$\text{inicial} + (\text{constante} \times \text{tempo}) \quad (3)$$

$$\text{incorporado} - \text{sequestrado} + [(\text{manutenção} - \text{economia}) \times \text{tempo}]$$

(positivo ou negativo)

(positivo ou negativo)

- *inicial positivo + constante positivo* = nunca haverá sequestro líquido de carbono; a pegada inicial aumentará constantemente devido à manutenção.
- *inicial negativo + constante negativo* = desde o início já há sequestro líquido do carbono devido à grande biomassa; pegada diminuirá constantemente devido à economia de energia.
- *inicial negativo + constante positivo* = o seqüestro inicial devido à grande biomassa será desfeito com a custosa manutenção em um ponto de compensação, a partir do qual a pegada aumentará constantemente.
- *inicial positivo + constante negativo* = a incorporação inicial do carbono nos materiais construtivos será compensada pela constante economia de energia fóssil, em um ponto de compensação, a partir do qual a pegada diminuirá constantemente.

Getter (2009) chega ao quarto cenário, tendo um ponto de compensação de sete anos; ou seja, *a partir do sétimo ano, a cobertura compensa sua pegada de carbono*.¹⁴² Supondo a instalação de 147.300.000 m² nas coberturas comerciais e industriais de Detroit, e levando em conta apenas o sequestro na biomassa, acarretaria em um sequestro de 55.252 toneladas de carbono, ou o equivalente à remoção de 10.000 SUVs por um ano das ruas (i.e. cada veículo demanda 14.734 m² de cobertura verde em biomassa para compensar suas emissões anuais).

Ou seja, uma cobertura verde só sequestrará carbono caso:

- a biomassa seja grande o suficiente para compensar a pegada de sua instalação;
- a economia de energia fóssil compense a manutenção.

No Brasil, devido à matriz elétrica relativamente limpa, com 76,9% de fornecimento hidráulico¹⁴³ (EPE, 2010), as coberturas verdes dificilmente trarão benefícios em se tratando de sequestro de carbono, já que seu mérito maior é deixar de emitir, e não remover.

Getter (2009) chega a uma conclusão parecida (tradução nossa):

Enquanto esses valores dependem do clima e do projeto da cobertura verde, mesmo assim representam um pequeno porém significativo potencial para sequestro de carbono em ambientes urbanos.¹⁴⁴

De modo similar, para EPA ([2008?], tradução nossa):

Por conta de muitas das plantas serem pequenas e a camada do meio de cultura ser relativamente fina, tetos verdes tendem a não possuir uma capacidade de armazenamento de carbono tão grande como árvores ou florestas urbanas.¹⁴⁵

142 Não levando em consideração a manutenção e supondo uma matriz energética americana (baseada em queima de combustíveis fósseis) e incluído aquecimento artificial.

143 A matriz energética geral (i.e., incluindo energia automotora etc.) continua majoritariamente não renovável (53,2%), predominada pelo petróleo (41,9%) (EPE, 2010).

144 “While these figures depend on climate and green roof design, they nonetheless represent a small but significant potential for sequestering carbon in urban environments.”

145 “Because many of the plants are small and the growing medium layer is relatively thin, green roofs tend not to have as large a carbon storage capacity as trees or urban forests.”

É questionável se o benefício carbônico da incorporação de quantidades relativamente baixas de vegetação em edifícios vale o custo, especialmente se levarmos em consideração o carbono liberado para a própria fabricação dos componentes do sistema. Mesmo assim, pode ser considerado um efeito secundário dos inúmeros outros serviços prestados pela natureza.

Assim, é duvidoso se um poluente com efeitos exclusivamente globais, como o gás carbônico, deva ser lidado com uma tecnologia que se destaca por seus efeitos locais.

6.1 Políticas de Controle da Poluição Atmosférica

Como exposto, a instalação de tetos verdes não é uma medida eficiente para controle de poluição atmosférica, sendo que o controle na fonte tem um custo-benefício melhor. Mesmo assim, a vegetação urbana tem um papel complementar (que talvez não valesse à pena se não fossem os outros benefícios gerados).

No mundo, a OMS sugere limites para diversos poluentes, com exposição anual e diária máxima.

6.1.1 EUA

Nos EUA, o *Clean Air Act*, de 1963 (que seguiu o *Air Pollution Control Act* de 1955) foi um importantíssimo passo para a diminuição da poluição atmosférica do país. Iniciou-se com programas de pesquisa, e, a partir de 1970, estabeleceu diversos itens regulatórios, e foi seguida pela criação da Agência de Proteção Ambiental (EPA) em 1971 para execução de seus itens.

A execução é deixada para os Estados, já que exige conhecimentos da geografia, economia etc. locais; porém, caso não mantenham os limites federais, tem suas obrigações tomadas pela EPA. Mesmo assim, alguns estados têm seus próprios programas de controle de poluição ainda mais rígidos.

6.1.2 Brasil

No Brasil, a poluição atmosférica é mencionada na Constituição:

Art. 23. É competência comum da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios:

VI - proteger o meio ambiente e *combater a poluição em qualquer de suas formas*;

Art. 24. Compete à União, aos Estados e ao Distrito Federal legislar concorrentemente sobre:

VI - florestas, caça, pesca, fauna, conservação da natureza, defesa do solo e dos recursos naturais, proteção do meio ambiente *e controle da poluição*;

Além disso, é um dos tipos de crime ambiental estabelecido pela Lei 9.605 de 13 de fevereiro de 1998:

Poluição e outros crimes ambientais: a poluição que provoque ou possa provocar danos a saúde humana, mortandade de animais e destruição significativa da flora.

A resolução CONAMA nº 003 de 28 de junho de 1990 define (Art. 2º, item I e II) padrões primários, mais rígidos (que podem afetar a saúde da população se ultrapassados), e secundários (dano mínimo à saúde humana e ao ambiente), que por sua vez guiam a elaboração de *Planos Regionais de Controle de Poluição do Ar*, sendo que o monitoramento da qualidade do ar é atribuição dos Estados (Art. 4º).

Art. 2º - Para os efeitos desta Resolução ficam estabelecidos os seguintes conceitos:

I - Padrões Primários de Qualidade do Ar são as concentrações de poluentes que, ultrapassadas, poderão *afetar a saúde da população*.

II - Padrões Secundários de Qualidade do Ar são as concentrações de poluentes abaixo das quais se prevê o mínimo *efeito adverso sobre o bem-estar* da população, assim como o *mínimo dano* à fauna, à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral.

Parágrafo Único - Os padrões de qualidade do ar serão o objetivo a ser atingido mediante à estratégia de controle fixada pelos padrões de emissão e deverão orientar a elaboração de Planos Regionais de Controle de Poluição do Ar.

Nenhuma resolução CONAMA menciona a importância da vegetação na diminuição da poluição atmosférica.

6.1.3 Estado de São Paulo

Sendo a região mais industrializada e mais populosa do país, além de ter a segunda menor área, o sudeste (em especial o Estado de São Paulo) concentra altos níveis de poluição atmosférica. No Estado, a poluição concentra-se nas maiores cidades e seus arredores:

De todas as 29 cidades do Estado que possuem estações de medição da Cetesb, 11 estão acima dos níveis de poluição da Capital. Os níveis são mais elevados na Baixada Santista e são equivalentes na Grande São Paulo e nas regiões de Jundiaí, Campinas, Sorocaba e Piracicaba (BERNARDES, 2013).

A poluição ocasiona prejuízos enormes à saúde pública:

[...] ‘Entre 2006 e 2011, houve um total de 100 mil mortes atribuíveis à poluição em todo o Estado’. ‘Os custos diretos com internações chegam a R\$ 70 milhões no Estado (R\$ 31 milhões na capital), no sistema público de saúde. Na rede privada e suplementar, o gasto é de R\$ 170 milhões’” (Evangalina Vormittag *in* BERNARDES, 2013).

No Estado de São Paulo, a poluição é monitorada pela CETESB:

A Legislação Estadual (DE 8468 de 08/09/76) também estabelece padrões de qualidade do ar e critérios para episódios agudos de poluição do ar, mas abrange um número menor de parâmetros (CETESB, [s.d.]).

6.1.4 RMSP

A região de São Paulo é uma das mais poluídas do Brasil.

As indústrias e veículos são responsáveis pelo lançamento no ar próximo do solo (onde vivemos e respiramos), diariamente, por perto de 6.000 toneladas de poluentes. Isto equivale a que cada um dos 16 milhões de habitantes da Grande São Paulo está sujeito a respirar, por dia, 350 gramas de elementos nocivos à saúde. Hoje, os veículos automotores são os principais causadores da poluição do ar na Grande São Paulo, produzindo 90% da poluição atmosférica, enquanto as indústrias são responsáveis pelos outros 10% (TARIFA; ARMANI, 2000).

O montante de veículos automotores da RMSP emite um fluxo expressivo de poluentes na forma de gases e resíduos sólidos e líquidos. A atividade industrial também gera montante expressivo de poluentes, embora sua participação na composição da poluição de RMSP tenha diminuído persistentemente desde o final da década de [19]80. Os canteiros de obras de construção civil, os serviços de limpeza urbana e a queima de lixo e vegetação normalmente também são apontados como importantes fontes poluidoras (AZEVEDO; TARIFA, 2001).

Na RMSP, os maiores culpados são os veículos pesados, especialmente caminhões:

Cerca de 40% do MP na Região Metropolitana de São Paulo é emitido por veículos pesados movidos a óleo diesel. O restante vem da poeira, proveniente de aerossóis secundários e da ressuspensão de partículas, e da fuligem produzida pelas indústrias (BERNARDES, 2013).

A CETESB reconhece o transporte como um dos principais causadores de poluição urbana:

As ações para a redução da poluição causada pelo Sistema de Transportes, independentemente do país onde ela ocorra, passa por diversas ações como a articulação do planejamento de uso e ocupação do solo e melhoria do sistema viário; a melhoria do sistema de transportes; a redução das emissões de veículos automotores; a melhoria dos sistemas de circulação e fiscalização do tráfego; a melhoria da qualidade dos combustíveis e alternativas energéticas de baixo potencial poluidor; o desenvolvimento de instrumentos econômicos e fiscais; educação e o desenvolvimento social (CETESB, [s.d.]).

A inspeção veicular e rodízio são tentativas de reduzir a poluição na cidade de São Paulo. A Inspeção Veicular foi um programa iniciado em 2012, que mede as emissões de CO, CO₂ e HC em todos os veículos, além de opacidade e material particulado em veículos a diesel, com resultados satisfatórios:

Considerando apenas os veículos a diesel que fizeram a inspeção em 2011 na cidade, o estudo concluiu que foram evitadas 1.515 internações hospitalares e 584 mortes por pro-

blemas respiratórios e cardiovasculares, resultando em uma **economia de mais de R\$ 160 milhões ao sistema de saúde na Grande São Paulo**, o que representa mais de 20 vezes o custo das inspeções correspondentes.

Ainda de acordo com a análise, a emissão de material particulado dos motores a diesel foi reduzida, em média, em 28% ante os 13,8% registrado em 2010 (INSPEÇÃO..., 2013, grifo nosso).

Assim, de modo similar a outras metrópoles mundiais, a grande presença de veículos emite enormes quantidades de poluentes na atmosfera paulistana, havendo pouca variação com o tipo de combustível. A dispersão é fundamental para a mitigação dos danos à saúde, e é determinada por fatores topográficos (fundos de vale tendem a acumular poluentes), assim como condições meteorológicas específicas:

As condições meteorológicas típicas nos meses mais frios e secos (outono e inverno) favoreceram a acumulação de poluentes atmosféricos, resultando em valores mais altos das concentrações do material particulado MP10 (SOUZA, 2006).

Devido ao relativamente baixo desempenho dos tetos verdes como removedores de poluentes atmosféricos, é questionável se haveria benefícios significativos com a adoção em massa da tecnologia, sendo que o controle na fonte, como a inspeção veicular, tende a ser mais eficiente. Mesmo assim, as coberturas e paredes verdes, juntamente com arborização urbana, podem ter papel complementar na questão.

Capítulo 7 – Manejo de Águas Pluviais

Os tetos verdes têm se revelado importantes ferramentas para a mitigação de problemas hidrológicos urbanos, com destaque à redução de inundações. De modo a melhor compreender esse papel, será descrito brevemente o comportamento hídrico das coberturas verdes, havendo diferenças profundas entre a abordagem de curto prazo e a de médio prazo, com diferentes fenômenos dominando cada uma.

7.1 Comportamento hídrico das coberturas verdes

No papel hidrológico de uma cobertura verde está incluída não só a vegetação em si, como também o meio de cultura e as camadas construtivas.

7.1.1 Curto prazo

Em curto prazo, a vegetação contribui para a **interceptação** da água da chuva por folhas, galhos e troncos; esse estoque é rapidamente esgotado, especialmente em chuvas de forte intensidade e/ou contínuas.

Há **fatores morfológicos** que potencializam a interceptação, sendo o mais importante deles o *índice de área foliar* (IAF), isto é, quanto maior a quantidade de folhagem acima de uma superfície, maior será sua capacidade de retenção interceptativa. “Valores de IAF para tetos verdes variam dependendo do tipo de vegetação, mas tipicamente ficam entre 0,5 e 5,0” (SAILOR, 2008, tradução nossa).¹⁴⁶ Porém, nem todos os tipos de folhas se comportam da mesma maneira. Algumas folhas, como as em forma de agulhas típicas de coníferas, armazenam muito mais água pelo fato das gotas terem dificuldade de coalescerem, ao contrário de folhas largas e grandes, típicas de plantas tropicais. Vegetação rasteira tem capacidade de interceptação similar a coberturas arbóreas (aprox. 1,3 mm) (BONAN, 2002); deve ser lembrado, porém, que bosques

¹⁴⁶ “Values of LAI for green roofs vary depending upon plant type, but are typically in the range of 0.5–5.0.” (SAILOR, 2008).

e florestas são compostos por muitas camadas foliares que potencializam essa interceptação. Mesmo assim, de acordo com esses valores, uma cobertura verde extensiva teria um papel interceptativo similar a uma árvore viária (i.e. baixo).

Fatores climáticos também influenciam na capacidade de interceptação, mais ainda que os fatores morfológicos supracitados. A frequência de precipitação é o fator mais importante: chuvas frequentes não deixam a capacidade de retenção interceptativa se renovar; chuvas intercaladas por períodos secos, por outro lado, permitem que essa capacidade seja renovada rapidamente por conta da evaporação abundante. A interceptação pode, portanto, variar enormemente para um mesmo local, de acordo com as condições climáticas, alterando a média anual evaporada.

Esse fator é a *renovação do estoque*, que tem importância similar ao próprio *tamanho* desse estoque descrito anteriormente; juntos, fazem com que a interceptação tenha importância significativa, equivalente à da transpiração no ciclo hidrológico.

Assim, fatores morfológicos e climáticos influenciam a parcela anual de água interceptada por uma área, sendo ela muitas vezes de difícil medição. De modo geral, para maximizar essa capacidade, um teto verde deve ter diversas camadas de plantas (e.g. arbórea, arbustiva, rasteira), de preferência com folhas pequenas, rugosas e acuciformes, e cobertura de solo (serrapilheira), onde haverá uma interceptação adicional. Tetos verdes extensivos têm baixa capacidade de interceptação vegetal se comparados a intensivos. A posição alta das coberturas verdes assegura que a renovação será facilitada, por ser alvo de ventos e radiação solar em maior intensidade. A renovação do estoque por evaporação tem um benefício adicional de resfriamento da cobertura, sendo especialmente importante após as chuvas de verão.

Mesmo assim, de acordo com Xiao e McPherson (1998), a capacidade de interceptação da floresta urbana é insuficiente para a prevenção de enchen-

tes¹⁴⁷, sendo mais importante para a qualidade da água. Isso contradiz a crença tradicional que aponta a perda de massa foliar como um dos maiores fatores que causam enchentes urbanas (o outro sendo a impermeabilização excessiva). É possível, portanto, que programas de arborização urbana tenham pouca eficácia na redução de danos por enchentes. Mesmo assim, em contraste com a arborização urbana, tetos verdes não trabalham apenas com a interceptação vegetal. Aliás, ela é considerada desprezível em muitos estudos¹⁴⁸. O grande diferencial é a retenção do meio de cultura.

O **meio de cultura** possui diversas propriedades que afetam sua interação com a água da chuva, estando entre superfícies impermeáveis e solos naturais. Primeiramente, de modo similar à vegetação, há sim uma interceptação de água, que, nesse caso, inclui a serrapilheira ou qualquer outra cobertura do solo (se existente), além do solo em si. Toda água retida dessa maneira que evapora dentro de um prazo de 24 horas após o evento é considerada interceptação (a água evaporada após esse período entra na parcela “evaporação do solo”).

Além disso, de modo similar a terrenos vazios, o meio de cultura possui uma taxa de infiltração, que é a velocidade com que a lâmina adentra a interface solo–ar. Essa infiltração se dá tanto por macroporos, ou seja, furos provocados por macrofauna, raízes, rachaduras ou agregação do solo, que provém uma rápida absorção da água por meio da gravidade.

A frente de molhamento é a onda de saturação que transpassa a espessura do solo ou meio de cultura. Esse movimento, tanto lateral quanto para baixo,

147 “[...] florestas urbanas tornam-se cada vez menos eficientes na redução do escoamento superficial conforme a quantidade de precipitação por tempestade aumenta. Apesar das árvores reduzirem o escoamento, elas podem não ser muito efetivas para controle de inundações. Inundações ocorrem geralmente durante eventos de tempestades maiores, muito depois do armazenamento do dossel ter sido excedido.
[...] urban forests become increasingly less effective at reducing stormwater runoff as the amount of precipitation per storm increases. Although trees reduce runoff, they may not be very effective for flood control. Floods usually occur during major storm events, well after canopy storage has been exceeded.” (XIAO; MCPHERSON, 1998, tradução nossa).

148 Cf. CARTER, BUTLER, 2008

é a percolação, que varia enormemente com diversas propriedades do meio, inclusive com a própria quantidade de água nele contida — contra-intuitivamente, solos mais saturados têm percolação mais rápida que solos mais secos. Isso se dá pela afinidade da água com as cargas negativas das partículas de solo, denominada adesão. Enquanto essa adesão, que “segura” a água, não seja vencida, haverá resistência para seu movimento; estando ela esgotada por alguma quantia de água, o restante então se movimenta com maior liberdade.

O movimento mais livre ocorre com um solo 100% saturado, isto é, sem qualquer vazio preenchido com gases; as propriedades desse movimento, que ocorre em lençóis freáticos (*fluxo de base*), são diferentes das do movimento não saturado. Como em coberturas verdes a saturação máxima deve ser evitada a todo custo, não se faz necessário adentrar em seus detalhes.

Solos excessivamente argilosos têm uma condutividade hidráulica muito baixa, podendo haver empoçamento ou escoamentos laterais superficiais indesejados (ou planejados, caso se queira imitar áreas alagadas¹⁴⁹). Já solos muito arenosos possuem condutividade hídrica excessiva, havendo baixa retenção de água, que é necessária para as plantas. Como em culturas em nível, um solo pleno, com mistura de argila, areia e silte equilibrada, é vantajoso no plantio (BONAN, 2002). Meios de cultura costumam evitar esses materiais pesados em favor de agregados porosos e matéria orgânica, com o mesmo efeito prático.

Uma umidade tão baixa que traz prejuízos permanentes a uma cultura é denominada *ponto de murcha permanente* (PMP). A faixa entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente é a chamada *água disponível [à planta]* — uma umidade superior à capacidade de campo é logo drenada; uma inferior ao ponto de murcha permanente é tão fortemente presa pela força matricial do solo ou meio de cultura que é impossível de ser absorvida pelas raízes, mesmo sendo relativamente abundante, como em argilas.

149 Cf. Capítulo 8 – Biodiversidade e áreas verdes, pág. 220.

Ao contrário de solos em nível, porém, o destino da água não é diretamente os lençóis freáticos; ao chegar às camadas impermeáveis da cobertura, a camada de drenagem se assegura de conduzir a água lateralmente para as saídas. O tempo entre a queda da água e sua saída do sistema é o *tempo de retorno*.

Esse comportamento é drasticamente diferente de uma cobertura tradicional, seja ela laje ou telhas, onde a água da chuva corre como escoamento superficial quase imediatamente, havendo mínima interceptação, esta sendo unicamente pelo “molhamento” da superfície¹⁵⁰, sendo o tempo de resposta o preenchimento desse minúsculo estoque.

Em contraste, um meio de cultura (composto por inúmeras partículas) possui uma superfície de retenção muitas ordens de magnitude maior; tanto que não vale mais a pena quantificar esse volume pela “superfície de contato”, e sim pela capacidade de campo (ou curva de retenção, dependendo da escala temporal desejada). Em geral, a capacidade de campo é estimada em 25% do volume total de um solo natural; ou seja, em um teto verde com meio com cultura de espessura igual a 200 mm, há a retenção teórica de aproximadamente 50 mm em médio prazo, considerando a água previamente presente como desprezível.¹⁵¹

De modo similar à interceptação, a capacidade de retenção matricial é determinada fortemente pelas características dos eventos de chuva, que variam com o clima local.

Por isso, simples afirmações de quanto um teto verde (ou qualquer outro modo de mitigação) retém “anualmente” devem ser encarados com ceticismo — é possível que os tetos verdes tenham tido ótimos desempenhos apenas em chuvas ou tempestades pequenas e intercaladas, que permitem alta renova-

150 Quanto mais rugosa a superfície, maior será esse armazenamento, por menor que seja; do mesmo modo que com a vegetação, ele será potencializado pela renovação evaporativa freqüente do estoque).

151 Como há um retardo da saída de água, em curto prazo a retenção é ainda maior.

bilidade; porém com impactos desprezíveis em tempestades maiores, i.e. as mais destrutivas. Em outras palavras, uma retenção de 50% da água de chuva anual não significa uma redução de 50% dos danos; i.e. chuvas leves, esparsas, separadas por períodos secos contribuem para diminuir a parcela escoada anual; a eficácia como prevenção de danos de enchentes deve ser considerada com mais cuidado. Berndtsson (2010) elabora:

Valores exatos de redução de deflúvio superficial (apresentados como uma porcentagem da precipitação) não podem ser facilmente comparados entre diferentes estudos pelas diferentes condições nas quais os estudos foram realizados (e.g. condições meteorológicas) e número diferente de eventos (duração do período de estudo) que foram incluídos para calcular os valores de retenção apresentados (BERNDTSSON, 2010, p. 353, tradução nossa).¹⁵²

Assim, tetos verdes tendem a reter mais em climas com chuvas esparsas, ou em chuvas de frente fria, que costumam ter maior duração e menor intensidade. Já locais tempestuosos, ou durante as típicas chuvas de verão de São Paulo, seu desempenho é consideravelmente menor.

7.1.2 Médio Prazo

Em *médio prazo*, o fenômeno dominante é a **evapotranspiração** (i.e. evaporação e transpiração). Como já dito, ela tem o papel de renovação dos estoques interceptativos e matriciais, e tem papel importantíssimo na transformação de calor sensível em latente, reduzindo temperaturas locais.

A evaporação em si é potencializada com movimentação do ar, altas temperaturas, radiação solar e baixa umidade relativa do ar, todos presentes em coberturas e paredes verdes. Ela se dá na água interceptada em folhas, galhos, serrapilheira e, em menor grau, solo; além de água condensada por orvalho ou destilação, e ainda por água livre eliminada pelos vegetais (exsudato). A evapo-

152 “Exact values of runoff reduction (presented as a % of precipitation) can hardly be compared between different studies due to different conditions in which studies were performed (e.g. weather) and different number of events (length of study period) which were included to calculate the presented retention values.” (BERNDTSSON, 2010, p. 353).

ração acontece espontaneamente, não havendo controle dos vegetais. Deve-se lembrar que a vaporização da água é um fenômeno que consome quantidades enormes de energia, seja ela ebulição ou evaporação. Para se ter uma ideia, a energia necessária para se evaporar apenas um litro de água é suficiente para levar 6 litros de zero a 100 °C.

Já a transpiração é um fenômeno fisiológico vegetal controlado pelos estômatos, aberturas microscópicas presentes principalmente na parte inferior das folhas. A transpiração tem inúmeras funções:

- Em primeiro lugar, constitui uma consequência inevitável da fotossíntese — a abertura estomática implica não só na entrada de CO_2 , como também na saída de H_2O . Isso se dá devido ao gradiente de concentração — a atmosfera interna à folha é rica em oxigênio e vapor d'água, pobre em gás carbônico, em contraste com a externa. Com a abertura estomática, há a difusão dos gases em direção às menores concentrações. Isso acarreta em enormes perdas hídricas para as plantas:

Aproximadamente 97% da água absorvida por plantas é perdida para a atmosfera, 2% é usado para aumento de volume ou expansão celular, e 1% para processos metabólicos, predominantemente fotossíntese. A perda hídrica para a atmosfera parece ser uma consequência inevitável de efetuar a fotossíntese. A absorção de CO_2 é acoplada com a perda de água. Por conta do gradiente hídrico para perda de água ser muito maior que para absorção de CO_2 , até 400 moléculas de água são perdidas para cada molécula de CO_2 ganha (VINCE; ZOLTÁN, 2011, tradução nossa).¹⁵³

- Além disso, a evaporação é um dos motores para a movimentação contra a gravidade de fluidos intravegetais, i.e. contribui para que a seiva bruta suba às folhas, em conjunto com a capilaridade.

153 “About 97% of water taken up by plants is lost to the atmosphere, 2% is used for volume increase or cell expansion, and 1% for metabolic processes, predominantly photosynthesis. Water loss to the atmosphere appears to be an inevitable consequence of carrying out photosynthesis. The uptake of CO_2 is coupled to the loss of water [...]. Because the driving gradient for water loss from leaves is much larger than that for CO_2 uptake, as many as 400 water molecules are lost for every CO_2 molecule gained.” (VINCE; ZOLTÁN, 2011).

- Outra função é o próprio resfriamento da folha, que, junto com o descarte (por difusão e reflexão) de radiação não fotossintética (i.e. NIR e verde) e a camada limite foliar (folhas maiores são menos acopladas com as condições atmosféricas, i.e. podem manter temperaturas mais contrastantes), garantem que o órgão se mantenha em temperaturas amenas, mesmo exposto à radiação solar. Esse resfriamento (aliado à baixíssima condutividade térmica vegetal) que torna o uso de vegetação em superfícies urbanas tão estratégico para redução do efeito ilha-de-calor e cargas térmicas edilícias.

De modo simplificado, a saída de vapor transpirativo deve vencer a *resistência estomática* (ditada pelo metabolismo da planta, em resposta a condições ambientais, através do controle das células guardiãs dos estômatos) e a *resistência da camada limite foliar* (determinada tanto por fatores morfológicos, como tamanho e formato da folha, quando por condições climáticas; ventos atrapalham a formação de uma camada limite espessa).

A abertura estomática é estratégica para a sobrevivência da planta, sendo um instrumento de controle da economia hídrica e energética do vegetal. Ela é induzida por abundância de luz e água; já stress hídrico (devido à evaporação excessiva e ou solo seco), insuficiência luminosa, excesso de CO₂ ou extremos de temperatura causam o fechamento das células guardiãs. Ou seja, exatamente em condições presentes na maioria das coberturas verdes (stress hídrico, altas temperaturas) há uma diminuição na transpiração, e consequentemente, na própria parcela de calor latente.¹⁵⁴

De modo mais extremo, em plantas suculentas de metabolismo MAC, a abertura estomática é *completamente suprimida* durante períodos diurnos, como estratégia para mitigar perdas hídricas críticas em plantas desérticas, epífitas e epítitas. Destaca-se o gênero *Sedum*, utilizado largamente na compo-

154 A planta está mais interessada em sua própria sobrevivência do que em seu emprego como regulador térmico urbano-predial.

sição de telhados verdes extensivos; esse tipo de vegetação não se utiliza sempre da transpiração para resfriamento diurno.¹⁵⁵ Isso leva a crer que a afirmação difundida de que todos os tetos verdes resfriam por evapotranspiração seja uma representação incompleta da realidade. Wark (2011) estima que a parcela evaporada seja de apenas um terço da energia total incidente mesmo em plantas C3, com exemplo hipotético da alfafa:

[...] a evapotranspiração remove somente por volta de 1/3 do calor excedente advindo do sol do meio dia. Portanto, a evapotranspiração claramente não é o método primário de arrefecimento mesmo a alfafa tendo raízes profundas e abundância de água. Para evitar que a cultura cozinhe antes do por-do-sol, os outros 2/3 do calor solar devem ser lidados por outros meios como convecção ao ar, emissão de radiação ao céu, e um pouco de condução ao solo. Note que estamos falando apenas do calor excedente, não os 5% a 10% da luz solar utilizada na fotossíntese por plantas de rápido crescimento, como alfafa ou hortaliças como alface e tomate.

[...] Supondo que as necessidades hídricas de plantas *Sedum* estabelecidas fossem satisfeitas por quantidades típicas de chuva [em Boston], podemos utilizar as mesmas equações anteriores para concluir que nosso teto verde não irrigado usa a evapotranspiração para se livrar de apenas 10% do calor solar (WARK, 2011, tradução nossa).¹⁵⁶

Assim, a transpiração estomática é um fator ativo no clima, variando com fatores fisiológicos (fenológicos ou metabólicos) e ambientais, sendo, portanto extremamente complexo de ser modelado.

155 Sendo MAC facultativas, pode haver a transpiração no caso de serem bem irrigadas (TORRES, 2010).

156 “[...] evapotranspiration only removes about 1/3 of the excess heat coming in from the noontime sun. So evapotranspiration is clearly not alfalfa’s primary method of staying cool even though it has deep roots and plenty of water. To keep the crop from cooking before sunset, the other 2/3 of the solar heat must be dealt with by other means such as convection to the air, radiation emission to the sky, and a little bit of conduction back into the ground. Note that we are only talking about excess heat, not the 5% to 10% of sunlight that is used for photosynthesis by fast growing plants like alfalfa or garden crops like lettuce and tomatoes. [...] Assuming that the established sedum’s water needs are satisfied by typical rainfall amounts, we can crank through the same equations used for the alfalfa crop to conclude that our non-irrigated green roof uses evapotranspiration to rid the roof of only 10% of the solar heat.” (WARK, 2011).

Berndtsson (2010) fez uma revisão de trabalhos relacionados ao papel dos tetos verdes em eventos de chuva. Todos os telhados verdes tiveram efeito no escoamento em relação a coberturas convencionais. De modo geral, a retenção e comportamento de descarga estão relacionados a (positivo = ajuda na retenção e retardo):

- **Características das coberturas:**
 - número de camadas e tipo de material;
 - espessura do solo [positivo];
 - tipo de solo, cobertura vegetal;
 - tipo de vegetação;
 - geometria do telhado: inclinação [ambíguo] e comprimento;
 - posição (sombreamento, direção);
 - idade [positivo].
- **Condições meteorológicas:**
 - duração do período de estiagem predecessor [positivo];
 - estação/clima (temperatura do ar [positivo], condições de vento, umidade [negativo]);
 - característica do evento de chuva (intensidade [negativo] e duração).

Ele encontrou dificuldade em comparar diversos estudos por falta de critérios uniformes. Além disso, os resultados apresentaram enormes variações; como exemplo, ele apontou uma revisão de diversos experimentos alemães que concluíram que “a redução do deflúvio superficial [...] igual à 85–65% da precipitação anual, e para tetos verdes extensivos, os valores correspondentes foram de 81–27%” (BERNDTSSON, 2010) ¹⁵⁷, uma faixa muito ampla; os outros trabalhos analisados por ele também se encontram nessa faixa.

¹⁵⁷ “annual runoff reduction being equal 85–65% of annual precipitation (100%) and for extensive roofs the corresponding values were 81–27%.” (BERNDTSSON, 2010).

De modo geral, a retenção é mais efetiva para eventos curtos, e a quantidade de água armazenada é aproximadamente a diferença entre o ponto de murcha (~15%) e a capacidade de campo (~45%), ou ~30% da espessura do meio de cultura (BERNDTSSON, 2010).

A vegetação tem importância menor que o substrato, porém seu papel exato ainda não foi identificado.

A retenção é maior em períodos quentes e secos, e menor em períodos frios e/ou chuvosos, devido à recuperação da capacidade de retenção.

7.1.3 Poluição hídrica

Tetos verdes têm grande importância na regularização do ciclo hidrológico urbano, principalmente pelo meio de cultura funcionar como uma esponja, retardando os picos e emulando as condições pré-ocupação que se caracterizavam por grande área de interceptação (folhagem arbórea, arbustiva e rasteira, liteira), além de solos livres (não impermeabilizados) e muito permeáveis (zona de raízes, fauna). Porém, o papel dos tetos verdes na qualidade da água escoada é ambíguo, podendo haver tanto filtragem quanto carreamento de substâncias poluentes pela água pluvial.

Como visto anteriormente, há grande deposição de material particulado em todas as superfícies urbanas, especialmente as horizontais. As coberturas convencionais contribuem com a poluição hídrica de diversas maneiras:

Sobre as coberturas, essas substâncias incluem: metais pesados lixiviados dos revestimentos; poluentes atmosféricos depositados de modo seco ou úmido, como SO₂ e NO_x; poeiras suspensas oriundas de veículos, indústria, construção civil; e sais para derretimento de gelo. A distribuição e concentração de poluentes no deflúvio está relacionada à natureza das superfícies, e também aos padrões locais de deposição seca e úmida (SPEAK, 2013, p. 33, tradução nossa).¹⁵⁸

158 “On rooftops these substances include: heavy metals leached from roof surface materials [...]; dry and wet deposited air pollutants such as SO₂ and NO_x [...]; airborne dusts from vehicle use, industry, construction [...]; and salts from road de-icing [...]. The distribution and concentration of pollutants in runoff is related to the nature of the surfaces [...], as well as local patterns of wet and dry atmospheric deposition” (SPEAK, 2013, p. 33).

O material acumulado em coberturas verdes possui grande área de aderência dada a superfície das partículas de solo¹⁵⁹. Assim, há a retenção de algumas substâncias que serão carregadas na chuva seguinte, e, caso o deflúvio não seja tratado, *meramente trocando uma poluição atmosférica por uma poluição hídrica*.

Tetos verdes também são eficientes em capturar poluição atmosférica como NO_x, SO₂, ozônio e PM 10, e é geralmente esperado que os poluentes fossem retidos na cobertura vegetada ou consumidos em reações. Porém, existe a possibilidade de que poluição atmosférica que foi capturada pela vegetação será uma hora carregada pelo deflúvio da cobertura, portando trocando uma poluição atmosférica por uma hídrica, a não ser que o descarte seja tratado (SPEAK, 2013, p. 33, tradução nossa).¹⁶⁰

As variáveis que influenciam a qualidade da água oriunda de coberturas verdes foram coletadas por Berndtsson (2010) como:

- tipo de material (composição do solo, material da drenagem e/ou impermeabilização, material dos canos de saída);
- espessura do solo;
- tipo de drenagem;
- manutenção e produtos químicos usados;
- tipo de vegetação, estação do ano (uso dos nutrientes pela biomassa);
- dinâmicas das precipitações;
- direção do vento;
- fontes locais de poluição;
- propriedades físico-químicas dos poluentes.

159 Cf. Capítulo 6 – Poluição atmosférica, pág. 179.

160 “Green roofs are also efficient at capturing air pollution such as NO_x, SO₂, ozone [...], and PM10 [...] and it is generally expected that the pollutants would be retained in the vegetated roof or consumed in reactions [...]. However, there is the possibility that air pollution that has been captured by vegetation will eventually leach into the roof runoff, thus trading air pollution for water pollution [...] unless runoff is treated.” (SPEAK, 2013, p. 33).

Agravando o quadro, o sistema de cobertura verde pode ser *fonte* de alguns poluentes, especialmente aqueles advindos de fertilizantes ou de materiais componentes do sistema de cobertura, especialmente plásticos e metais, ou mesmo fezes de animais (e.g. fósforo) (BERNDTSSON, 2010).

Um fator complicador é que diferentes estudos usaram critérios distintos para medição da eficácia da limpeza da água; por exemplo, meramente comparar a concentração de poluentes da água de chuva com a da água descartada não leva em consideração o volume retido no teto verde; em outras palavras, um volume menor de escoamento implica em menor poluição efetiva, o que essa metodologia não leva em consideração (BERNDTSSON, 2010). Mesmo se a *concentração* de poluentes na água descartada seja igual para uma cobertura verde e uma convencional, o descarte de 2 litros é menos danoso que o descarte de 20 litros.

Assim, o status fonte–sumidouro de uma cobertura verde em relação à qualidade da água varia conforme o tipo de poluente, e, em menor grau, o tipo de cobertura verde. A fertilização se mostrou como grande responsável por carreamento de poluentes oriundos de tetos verdes; assim, recomenda-se a parcimônia em sua utilização, além de testes de solo para a verificação de capacidade de retenção de cátions e outros critérios que otimizem a retenção e aproveitamento dos nutrientes. Além disso, a saída de água de um teto verde (ou de uma cobertura convencional) pode ser acoplada a um sistema de limpeza de água, como filtro de raízes, onde espécies como *Canna* sp. têm destaque na biorremediação.

7.2 Políticas de Manejo de Águas Pluviais

Com a resolução da maioria dos problemas de saneamento básico e poluição pontual em países de primeiro mundo, preocupações com poluição difusa, além do perfil hídrico de grandes cidades, fizeram com que o manejo de águas pluviais urbanas ganhasse destaque. A deposição seca e úmida dos

poluentes lançados por fábricas e principalmente veículos torna a água pluvial urbana altamente poluidora. Além disso, a alta impermeabilização dos solos e a perda da massa foliar agravam os picos de cheia e causam maiores danos em eventos de chuva. Assim, há uma preocupação crescente no manejo de águas pluviais que emule as condições pré-ocupação, dando ênfase no controle na fonte, isto é, retenção e detenção locais, interceptação e infiltração. O manejo de águas pluviais é o maior motivador da instalação de tetos verde atualmente no mundo.

7.2.1 Tarifas independentes de saneamento (split wastewater fees)

Em muitos países, inclusive aqueles com sistema de esgotamento unitário, há uma taxa única de esgoto e águas pluviais, cujos consumos são inferidos indiretamente de acordo com a quantidade de água tratada consumida, medida no relógio, como ocorre no Brasil. Pressupõe-se que um maior uso de água implica em maior uso do esgotamento. Porém, a inclusão da água pluvial neste montante não corresponde a uma estimativa realista, sendo injusta especialmente para residências de alto consumo de água tratada e baixa área de projeção por unidade.

Assim, esse tipo de tributação busca, além da taxa de esgoto baseada no consumo de água, a criação de outra calculada pela área de superfície impermeável da propriedade, forçando o proprietário a assumir a responsabilidade por sua contribuição às águas pluviais.

Tetos verdes são um dos instrumentos possíveis para que isso aconteça, sendo que uma propriedade completamente desconectada do sistema de águas pluviais pode ser isenta da taxa.

É uma medida que busca responsabilizar o indivíduo por suas ações, evitando repartir os danos para outros, de modo similar à colocação de relógios individuais em edificações, que no Brasil viu uma redução de até 37% no consumo (FREITAS, 2012).

São considerados um tipo de incentivo eficiente e bem sucedido, sendo o tipo preferido de política na Alemanha e o mais importante incentivo a tetos verdes em Berlim (NGAN 2004).

Promovem o planejamento integrado de destinação as águas pluviais, e controle na fonte pode ser único modo de ocupar áreas cuja infraestrutura de águas pluviais encontra-se saturada (NGAN, 2004).

Como incentivo a teto verdes, têm a vantagem de funcionarem tanto em áreas consolidadas quanto em processo de ocupação. Trata-se de um incentivo mais permanente que subsídios, prazo indeterminado, ao contrário de incentivos diretos que estão sujeitos a orçamentos, e funciona de modo voluntário, não sendo uma obrigação tecnológica *command-and-control*, portanto mais justo e transparente aos olhos do cidadão (NGAN, 2004).

Em termos financeiros, a arrecadação pode ajudar municipalidades com dificuldade para manter infraestrutura de águas pluviais e esgoto. Porém, alguns municípios, especialmente os menores, têm dificuldade em administrar tais taxas. Berlim percebeu um efeito neutro em sua arrecadação. Alguns municípios pode se sentir tentados a encarregar a destinação de águas pluviais exclusivamente à iniciativa privada. Exige aparato de manutenção e inspeção (NGAN, 2004).

Assim, são mais justos do ponto de vista social, já que, do modo convencional, famílias grandes em residências multifamiliares acabam financiando o sistema de águas pluviais, pois consomem altas quantidades de água e contribuem pouco do ponto de vista de área total impermeável per capita.

Em municípios com tarifas independentes de saneamento, tetos verdes ganham um desconto entre 50 e 100% na tarifa pluvial anual. É uma economia média de 0,50 €/m² por ano comparado a uma cobertura convencional (NGAN, 2004, p. 11, tradução nossa).¹⁶¹

161 "In municipalities with split wastewater fees, green roofs typically earn a discount of between 50 and 100% on the annual stormwater fee. That is an average saving of 0.50 €/m² (\$0.80 Cdn) each year for a green roof compared to a conventional roof." (NGAN, 2004, p. 11).

7.2.2 EUA

A Agência de Proteção Ambiental americana possui diretrizes para orientação do manejo de águas pluviais. A principal legislação foi o *Clear Water Act*, de 1972, que exigiu autorização (*permit*), através do *National Pollutant Discharge Elimination System* (NPDES), para o descarte de poluentes de fontes pontuais em águas superficiais, que pode ser concedida por estados previamente autorizados ou, em sua ausência, o braço regional da agência. O Ato se utiliza de padrões tecnológicos como uma medida mínima para se conseguir a autorização de efluentes; i.e. “a melhor tecnologia disponível”. Apenas quando o corpo d’água exige proteção maior ainda é que se utilizam **padrões de qualidade**.

Mesmo assim, em sua concepção original, o ato não regulava emissões não pontuais (difusas), como agrícolas e urbanas; quando EPA se recusou a incluir descarte de águas pluviais urbanas no NPDES, foi processado por um grupo ambiental. Nos anos 1980 percebeu-se que deflúvio urbano era fonte importante de poluição, documentado pelo *Nationwide Urban Runoff Program* (NURP), que descobriu grandes quantidades de metais pesados nos deflúvios, e identificou bacias de retenção e lagoas permanentes como importantes ferramentas. O Programa encontrou resistência legal de municipalidades e indústrias; mesmo assim, culminou na revisão do ato (1986), que passou a exigir autorização também para áreas impermeáveis industriais (incluindo áreas em obras, que são fontes “temporárias” de deflúvio) e de sistemas municipais separados de águas pluviais, exigindo uso de BMPs para redução de poluentes “na máxima extensão praticável” (“*maximum extent practicable*”). A revisão foi acompanhada de inúmeros auxílios (*grants*) e programas para a melhoria da qualidade da água local, em parte através do *Nonpoint Source Management Program*. Atualmente, propõe a inclusão de sistemas combinados de esgoto na legislação.

Há uma crescente cobrança separada do descarte de águas pluviais por parte de municípios, indo de 2 a 10 dólares mensais para uma residência típica, chegando a milhares de dólares para grandes edificações como aeroportos, escolas e grandes lojas, calculado de acordo com a área permeável do terreno. Isso não é feito para incentivo, e sim para arrecadar verbas diante de orçamentos apertados e maiores exigências da EPA para o descarte em corpos d'água. A medida, porém, encontra resistência, sendo caracterizada por alguns como “imposto sobre a chuva”. (CAUCHON, 2010).

Mesmo assim, a cobrança separada pode forçar o emprego de tetos verdes através de incentivos locais, já que não há lobby nacional específico da indústria como há o da energia solar ou eólica. De fato, “regulamentos de manejo de águas pluviais têm conduzido boa parte da construção de tetos verdes norte-americanos na última década.”¹⁶² (GEHR, 2013).

7.2.2.1 *Portland*

A pioneira Portland possui tarifa separada de descarte de águas pluviais desde 1977; em 1991, começou a incentivar tetos verdes como medida para controlar a vazão de seu sistema combinado de esgoto, forçado por um processo da EPA:

O programa de eco-telhados de Portland surgiu de um esforço maior iniciado em 1991 para melhor gerenciamento do sistema de esgotamento unitário, que descarregava 22,8 bilhões de litros de esgoto e águas pluviais no riacho Columbia Slough e rio Willamette todo ano. Parte da gênese do programa foi um litígio sob o Clean Water Act, após o qual a EPA exigiu que a cidade implantasse um controle mais rígido das águas pluviais (GEHR, 2013).¹⁶³

162 “Stormwater management regulations have driven a lot of North American green roof construction over the last decade.” (GEHR, 2013)

163 “Portland’s ecoroof program grew out of a broader effort started in 1991 to better manage CSOs, which had been discharging 6 billion gallons (22.8 billion L) of untreated wastewater and stormwater into the Columbia Slough and Willamette River every year. Part of the program’s genesis was a lawsuit under the Clean Water Act, after which the EPA required the city to implement stricter storm-water controls.” (GEHR, 2013).

Porém, EPA não permitiu o uso de infraestrutura verde para resolução do problema, o que exigiu obras no valor de 1,4 bilhões de dólares; mesmo assim, a cidade investiu também em medidas não-estruturais.

Portland iniciou programas de demonstração nos anos 1990, aliados a assistência técnica e de fiscalização, incluindo reuniões públicas, o que ajudou na aceitação da tecnologia no setor imobiliário (GEHR, 2013).

Em 1999, qualquer alteração construtiva ou obra com mais de 50 m² (¹⁶⁴) exigia o manejo local (*onsite*) do descarte; se não fosse possível, deveria ser feito remotamente (*offsite*), e, em último caso, deveria ser paga uma taxa de compensação¹⁶⁵. Além disso, passou a considerar tetos verdes como áreas permeáveis (EARTH PLEDGE, 2005).

O incentivo aos tetos verdes era mais antigo, sendo que nos anos 1980 poder-se-ia conseguir um bônus na área de construção no centro da cidade caso se usasse tetos verdes (até 30%: 1:1; entre 30 e 60%: 1:2; mais que 60%, 1:3; ou seja, para cada metro quadrado de teto verde, é permitida a construção de 3 metros quadrados a mais). A medida só conseguiu sucesso após a inclusão dos tetos verdes extensivos em 2001 (chamados em Portland de “*ecoroofs*”) (EARTH PLEDGE, 2005).

Além disso, um subsídio (*grant*) de US\$5 por pé quadrado para *ecoroofs* foi estabelecido em 2008, de modo a atingir uma meta de 17,2 ha até 2013 (a área de telhado da cidade é de 5000 ha). No primeiro ano, mais de 50 projetos requisitaram o subsídio, que efetivamente corta o custo de instalação pela metade (GEHR, 2013).

A cidade mantém uma política não agressiva para incentivo da tecnologia, apenas com incentivos e exigindo poucos detalhes na aprovação (GEHR, 2013).

Isso foi reforçado com outros programas, como o *Clear River Incentive Program*, que oferece descontos ao se usar BMPs; *Office Sustainable Development*,

164 500 pés quadrados

165 *in lieu fee*, tributo único que cobre custos de benfeitorias, não de operação ou manutenção

que exigiu LEED (que considera tetos verdes) para edifícios governamentais. Com isso, a tecnologia se desenvolveu, se popularizou, e tornou-se largamente voluntária, apoiado por assistência técnica municipal (EARTH PLEDGE, 2005).

No Brasil, a conta de água inclui o esgotamento calculado com base no consumo de água tratada. Esse valor varia de Estado para Estado, com taxas diferenciadas para comércios e residências, além de ter taxa progressiva, isto é, o custo por metro cúbico se eleva conforme o consumo. O estado do Rio de Janeiro possui a maior diferença entre a menor e a maior faixa: 700% por metro cúbico (a menor faixa vai de 0 a 15 m³, e a maior corresponde a um consumo superior a 200 m³). No Brasil, é obrigatório o *sistema separador absoluto*, ou seja, separação entre redes de águas pluviais e esgoto (FERNANDES, [s.d.]). Não se inclui o valor da construção de galerias na conta de água.

Mesmo assim, o espírito da medida, que é a responsabilização do indivíduo pela água pluvial descartada, pode ser mantido em outras formas, como cobrança de taxas relativas à área impermeável dos lotes, em adição às medidas já existentes, como as “Leis das Piscininhas”. O custo aos moradores explicita que o manejo de águas pluviais é um dever de todos os cidadãos, mas também que ele pode optar por soluções que reduzam esse custo, com um princípio é similar ao do poluidor-pagador.

7.2.3 Brasil

No Brasil, o descarte de águas pluviais é inserido na política de saneamento básico, conforme Art. 2º e 3º da Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007:

Art. 2º Os serviços públicos de saneamento básico serão prestados com base nos seguintes princípios fundamentais:

IV - disponibilidade, em todas as áreas urbanas, de serviços de drenagem e de manejo das águas pluviais adequados à saúde pública e à segurança da vida e do patrimônio público e privado;

Art. 3º Para os efeitos desta Lei, considera-se:

I - saneamento básico: conjunto de serviços, infra-estruturas e instalações operacionais de:

d) drenagem e manejo das águas pluviais urbanas: conjunto de atividades, infra-estruturas e instalações operacionais de drenagem urbana de águas pluviais, de transporte, detenção ou retenção para o amortecimento de vazões de cheias, tratamento e disposição final das águas pluviais drenadas nas áreas urbanas;

Além disso, a Lei determina que as tecnologias sejam adotadas de acordo com as condições de pagamentos dos usuários, o que afeta a adoção de, por exemplo, uma taxa de águas pluviais.

Art. 2º

VIII - utilização de tecnologias apropriadas, considerando a capacidade de pagamento dos usuários e a adoção de soluções graduais e progressivas;

Apesar de não citar a vegetação urbana ou outras soluções de infraestrutura verde, um dos princípios fundamentais reconhece a relação com os recursos hídricos:

XII - integração das infra-estruturas e serviços com a gestão eficiente dos recursos hídricos.

Porém, o texto segue uma linha de centralização dos serviços, como no artigo 5º ou no Art. 45:

Art. 5º Não constitui serviço público a ação de saneamento executada por meio de soluções individuais, desde que o usuário não dependa de terceiros para operar os serviços, bem como as ações e serviços de saneamento básico

§ 2º A instalação hidráulica predial ligada à rede pública de abastecimento de água não poderá ser também alimentada por outras fontes.

Por fim, a lei compete à União o fomento de tecnologias de saneamento, incluindo o manejo de águas pluviais no Plano Nacional de Saneamento Básico (PNSB):

Art. 48. A União, no estabelecimento de sua política de saneamento básico, observará as seguintes diretrizes:

IX - fomentar o desenvolvimento científico e tecnológico, a adoção de tecnologias apropriadas e a difusão dos conhecimentos gerados de interesse para o saneamento básico;

§ 1º O PNSB deve:

I - abranger o abastecimento de água, o esgotamento sanitário, o manejo de resíduos sólidos e o manejo de águas pluviais e outras ações de saneamento básico de interesse para a melhoria da salubridade ambiental, incluindo o provimento de banheiros e unidades hidrossanitárias para populações de baixa renda;

Percebe-se então uma clara ênfase no saneamento básico em detrimento do manejo de águas pluviais, que é tratado como secundário no documento, sendo mencionado de passagem. Isso é compreensível em um país em que doenças transmissíveis ainda são responsáveis por muitas mortes, e onde, mesmo em áreas mais urbanizadas, há falta de coleta ou tratamento de esgoto.

Mesmo assim, os dispostos na lei podem ser utilizados para pesquisa, aplicação e avaliação de soluções difusas de manejo de águas pluviais, mesmo não sendo explicitados. Carece uma orientação específica no modelo EPA de *best management practices*, ou pelo menos, uma iniciativa de pesquisa primordial que identificasse os maiores problemas do manejo de águas pluviais, que hoje focam apenas na prevenção de enchentes e pouco na poluição ou efeitos de erosão/assoreamento.

A Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano (SRHU), do Ministério do Meio Ambiente, enfatiza:

[...] a preservação do ciclo hidrológico natural, a partir da redução do escoamento superficial adicional gerado pelas

alterações da superfície do solo (decorrentes do desenvolvimento urbano), e da indução à infiltração da água no solo e conservação e reúso da água em edificações urbanas. Desse modo, privilegiamos o planejamento e formas de uso e ocupação que contemplem o controle da erosão, permeabilidade do solo, reservação, infiltração e utilização das águas pluviais nos próprios lotes, com formas de pavimentação permeável.

[...] é importante aperfeiçoar soluções de projeto para a drenagem urbana, com valorização e fomento a formas inovadoras de estruturas de drenagem (BRASIL: MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, [s.d.]).

Há ainda o *Plano Nacional de Saneamento Básico* (PLANSAB), que prevê investimentos de 503 bilhões até 2030, com metas intermediárias.

Art. 36. A cobrança pela prestação do serviço público de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas deve levar em conta, em cada lote urbano, os percentuais de impermeabilização e a existência de dispositivos de amortecimento ou de retenção de água de chuva, bem como poderá considerar:

I - o nível de renda da população da área atendida;

II - as características dos lotes urbanos e as áreas que podem ser neles edificadas (Lei nº 11.445) (BRASIL: MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2008, p. 26).

7.2.3.1 Município de São Paulo

São Paulo sofre com as inundações quase todos os verões, agravados pela ocupação das várzeas:

As principais causas das enchentes em São Paulo são a ocupação das várzeas e a grande impermeabilização do solo. Ou seja, trata-se de problemas que foram sendo estabelecidos pela forma de construção da cidade e que se intensificaram muito depois de 1930. [...] As várzeas [...] são áreas naturais de enchente dos rios nos períodos de chuva. Na medida em que não se tratou da sua preservação elas foram sendo ocupadas e, evidentemente, são as áreas mais atingidas por inundações (SÃO PAULO (MUNICÍPIO), 2002a).

A ocupação das várzeas agrava a resolução dos danos das enchentes, pois, idealmente, deveria haver um escoamento *ainda menor* que o da situação pré-ocupação para que essas áreas deixassem de acumular água.

A extensa área de ocupação urbana, associada a vários outros agravantes (lixo, assoreamento, desmatamento nas áreas de cabaceiras de nascentes, canalização, esgoto industrial e domiciliar lançados nos rios) tem aumentado o problema das enchentes e inundações, contando atualmente (1999) com aproximadamente 600 pontos (TARIFA, ARMANI, 2000).

Porém, ocorre exatamente o contrário. A perda constante de vegetação faz com que haja cada vez menos retenção das águas em eventos de chuva. Para Xiao e McPherson (1998), é questionável se mesmo a arborização viária urbana consiga ser eficiente para mitigação de enchentes em grandes eventos, já que a interceptação das copas é apenas uma fração do potencial retentivo de florestas (que inclui copa, cipós, arbustos, rasteiras, serrapilheira, infiltração, estoque no solo etc., todos com alta capacidade de renovação).

Entre as medidas centralizadas estão a construção dos piscinões (“reservatórios de acumulação temporária das águas das chuvas, que retardam sua chegada nos rios principais”, com seis já feitos) e o rebaixamento da calha do Tietê, cuja bacia inclui boa parte da mancha urbana; ambas poderão se mostrar paliativa se o modelo atual de urbanização continuar:

Para se ter uma idéia dos problemas causados pela impermeabilização temos que em 1929, numa ocorrência de grandes chuvas, a vazão do Tietê na altura da ponte do Limão foi de 318m³/s. Hoje, o projeto de aprofundamento do leito do Tietê pretende aumentar essa capacidade de vazão para 1.400 m³/s e mesmo assim o rio não teria capacidade para escoar um índice de chuvas igual ao de 1929 (SÃO PAULO (MUNICÍPIO), 2002a).

As inundações não são os únicos problemas trazidos pelas chuvas, o assoreamento¹⁶⁶ sendo outro grave e sinérgico:

166 A grande injeção de sedimentos nas águas fluviais é problema oposto que ocorre em algumas áreas urbanas ao redor do mundo, onde a falta de sedimentos devido à urbanização faz com que a água seja “faminta” e corra bancos e margens dos rios.

Para complicar ainda mais esse quadro, as periferias da área urbanizada ocupam hoje porções de solo provenientes de rochas decompostas com grandes declividades e sujeitas a erosão. Nesses solos rochosos, pertencentes ao complexo cristalino [...], a ocupação inadequada provoca erosão que carrega sedimentos para o leito dos rios, diminuindo sua capacidade de vazão por causa do assoreamento (SÃO PAULO (MUNICÍPIO), 2002a).

A retenção urbana só será atingida se lançarem mão do potencial do solo e similares, cuja porosidade gera retenção muito maior que mera massa foliar, e.g. jardins de chuva e tetos verdes. Porém, o próprio Atlas Ambiental de São Paulo mal reconhece o uso de drenagem sustentável e tetos verdes como alternativa para mitigação de enchentes:

Finalmente, existem muitas questões ligadas à micro-drenagem que devem ser tratadas. Dentre elas, o não lançamento de esgotos e lixo nos rios e nas galerias de águas pluviais, a limpeza dos bueiros e a manutenção das galerias. Também em projetos de reurbanização ou na abertura de novos loteamentos, deveria se garantir a recuperação das áreas permeáveis e a preservação das várzeas como áreas verdes (SÃO PAULO (MUNICÍPIO), 2002a).

7.2.3.2 Leis das “piscininhas”

As chamadas “piscininhas” têm seu apelido derivado dos “piscinões”, ou seja, grandes reservatórios para retenção de águas pluviais que são construídos em áreas com risco de enchentes. As “piscininhas” buscam, porém o manejo local das águas pluviais. A seguir, foram coletadas algumas leis brasileiras que obrigam sua instalação dados alguns critérios.

São Paulo - Lei Municipal nº 13.276, 04 de janeiro de 2002

Torna obrigatória a execução de reservatório para as águas coletadas por coberturas e pavimentos nos lotes, edificados ou não, que tenham área impermeabilizada superior a 500m².

Regulamentada pelo Decreto Municipal nº 41.814, 15 de março de 2002.

Primeira lei brasileira sobre o assunto. Estabelece fórmula para o cálculo do volume de água escoado. Torna obrigatório o uso de um reservatório para contenção da água. A destinação é preferencialmente a infiltração, podendo alternativamente ser descartada após uma hora de chuva ou para uso não potável. Obriga a permeabilização de 30% da área de estacionamentos.

Mauá – Lei Municipal nº 3528 de 29 de outubro de 2002

Dispõe sobre a obrigatoriedade da execução de reservatório para as águas pluviais coletadas em áreas impermeabilizadas superiores a 500m² para novas edificações e dá outras providências.

Similar à lei de São Paulo, utilizando mesma área mínima impermeável.

São Paulo - Lei estadual n.º 12.526, de 2 de janeiro de 2007

Estabelece normas para a contenção de enchentes e destinação de águas pluviais.

Lei similar à da cidade de São Paulo. Destaque dado ao artigo 4º, que contextualiza seu âmbito prático:

Artigo 4º - O disposto nesta lei será implementado no âmbito dos seguintes sistemas de atuação e articulação de ações dos poderes públicos:

I - Política Estadual de Recursos Hídricos e Sistema de Gerenciamento de Recursos Hídricos — SIGRH, instituídos pela Lei nº 7.663, de 30 de dezembro de 1991;

II - Política Estadual de Saneamento e Sistema Estadual de Saneamento — SESAN, instituídos pela Lei nº 7.750, de 31 de março de 1992;

III - Sistema Estadual de Administração da Qualidade Ambiental, Proteção, Controle e Desenvolvimento do Meio Ambiente e Uso Adequado dos Recursos Naturais — SEA-QUA, instituído pela Lei nº 9.509, de 20 de março de 1997.

Curitiba - Decreto Nº. 791

Dispõe sobre os critérios para implantação dos mecanismos de contenção de cheias.

Torna obrigatórios os reservatórios em empreendimentos com mais de 3 000 m² impermeabilizados, em regiões estratégicas do centro, ou no caso de intervenções “com redução de impermeabilidade de mais de 25%”.

Análise das leis de “piscininhas”

As leis são um ótimo início na conscientização sobre manejo na fonte e responsabilidade individual sobre descarte de águas pluviais.

Por outro lado, as leis atingem apenas os grandes contribuintes das enchentes, não dando atenção aos pequenos terrenos que coletivamente descartam grandes quantidades de águas pluviais, havendo ainda pouco efeito educativo na população em geral.

Tais leis poderiam ser expandidas aos pequenos lotes, onde a quantidade retida é proporcionalmente menor, facilitando medidas de retenção, ao mesmo tempo em que abrisse a possibilidade de outras, como tetos verdes, jardins de chuva, pavimentos permeáveis para todos, em adição à já existente área mínima permeável.

Capítulo 8 – Biodiversidade e áreas verdes

A própria natureza dos tetos verdes se baseia no suporte de seres vivos (as plantas) em um local antes inóspito, o que os torna mais “biodiversos” que coberturas convencionais. Porém, as orientações de projeto se baseiam predominantemente em questões construtivas (e.g. carga), dado que atualmente já é um desafio a própria colocação de vegetação nas edificações. Isso leva a habitats pobres povoados apenas por espécies pioneiras de alta mobilidade e não adequado como habitats permanentes para organismos terrestres (BUTTSCHARDT, 2001 apud BRENNEISEN, 2006).¹⁶⁷ Por exemplo, espécies de invertebrados que normalmente colonizam as coberturas possuem alta mobilidade, preferem ambientes mais secos e não são sensíveis à temperatura. A pobreza se deve primariamente à pequena espessura do meio de cultura, que “exacerba as já desafiadoras condições para plantas e animais nas coberturas verdes”.¹⁶⁸

Caso o objetivo específico do teto verde seja o abrigo de fauna, porém, a abordagem muda radicalmente — a filosofia de emular ambientes naturais é levada a outro nível, imitando desde condições hidrológicas características até composição específica do solo; as coberturas podem então servir de ambientes compensatórios em relação à urbanização.

Lundholm (2004) compara as coberturas verdes com afloramentos rochosos que abrigam plantas geófitas em rachaduras, os primeiros estágios em uma evolução ecológica, em contraste com tetos verdes, que são permanentes, e sugere um modelo de *habitat template* para emulação das condições biológicas.

167 Buttschardt, T. (2001). Extensive Dachbegrünungen und Naturschutz (Doctoral dissertation, Institut für Geographie und Geoökologie, Universität Karlsruhe, Germany, 2001). Karlsruher Schriften zur Geographie und Geoökologie, 13. 271 p

168 “exacerbates the already challenging conditions for plants and animals on green roofs.” (BRENNEISEN, 2006).

Assim, a conciliação entre necessidades biológicas mais rígidas e as necessidades construtivas sempre presentes configura um desafio no projeto e instalação de tetos verdes biodiversos (LUNDHOLM, 2004).

Biodiversidade é um termo genérico que indica a variedade de espécies, podendo ser definida em múltiplos níveis. **Riqueza** é o número de espécies ou genótipos em um grupo, mas que não descreve as diferenças entre essas unidades. **Diversidade de grupo funcional** distingue por características morfológicas ou fisiológicas gerais, como metabolismos (C3, C4, MAC, suculentas, leguminosas etc.). **Diversidade filogenética** mede o grau de parentesco entre os indivíduos, com combinações de grupos mais distantes sendo mais produtivas, e pode substituir a análise de traços funcionais.

Traços funcionais para tetos verdes incluem:¹⁶⁹

- tolerância à seca (suculência, tricomas foliares [pelos, que refletem luz e aumentam camada limite foliar], cerosidade, estágios dormentes [e.g. bulbos], baixa manutenção dos tecidos em períodos de poucos recursos);¹⁷⁰
- traços fenológicos (perenes são mais longevas);
- variação na floração contribui para sustentar diferentes animais.

Complexidade estrutural é importante no isolamento térmico, retenção de água e sobrevivência vegetal, “o que sugere que variação na altura, ramificação e folhagem também deve ser considerados na seleção de espécies para tetos verdes” (COOK-PATTON; BAUERLE, 2012, p. 86).¹⁷¹

169 “Candidate functional traits for green roof plants are related to drought tolerance, phenology, and morphology. Potential drought traits include mat or cushion growth forms, succulence, leaf trichomes (hairs) or waxes, a dormant life stage (i.e., tubers) during harsh conditions, and low tissue maintenance costs during periods of low resource availability.” (COOK-PATTON, BAUERLE, 2012).

170 “Tricomas densos refletem a luz do sol e aumentam a camada limite em volta da folha, ajudando a prevenir perdas hídricas. Do mesmo modo, camadas endo- e exodermes maiores reduzem a perda de água de volta ao ambiente.”
“Dense trichomes reflect sunlight and increase the boundary layer around the leaf, helping to prevent water loss [...]. Also, increased endo- and exodermis layers in roots reduce water loss back to the environment” (COOK-PATTON, BAUERLE, 2012).

171 “which suggests that variation in plant height, branching, and leafiness should also be considered when selecting green roof species.” (COOK-PATTON; BAUERLE, 2012, p. 86).

A natividade da flora é um ponto controverso, não menos por carecerem definições precisas, onde são incluídas desde o país até o local da construção:

Apenas 58% dos artigos forneceram uma definição de nativo [...]. Definições baseadas em geografia foram as mais comuns e por vezes incluíam um componente de bioma. Houve grande variabilidade na definição, desde local da construção, até o país (BUTLER et al., 2012, p. 1, tradução nossa).¹⁷²

Arquitetos são os que mais especificam plantas “nativas”; paisagistas e biólogos são intermediários, e engenheiros são os que menos o fazem (BUTLER et al., 2012).

De qualquer modo, a cobertura é fundamentalmente diferente de ambientes ao nível do solo, por isso a adoção de plantas “nativas” deve ser cuidadosa (BUTLER et al., 2012).¹⁷³

8.2.3.1 Fauna

Espécies animais possuem quatro necessidades (JOHNSTON; NEWTON, 2004): *comida, abrigo, água e área de procriação*. Uma cobertura verde não precisa fornecer todos os quatro, podendo servir apenas como conector na malha ecológica urbana.

Algumas características físicas facilitam a colonização de diversos animais, sendo que critérios mais específicos dependem das necessidades individuais de cada espécie:

172 “Only 58% of papers provided a definition of native [...]. Geographically based definitions were the most common and sometimes included a biome component. There was a great deal of variability in definition, ranging from the building site to a country.” (BUTLER et al., 2012).

173 “Por conta das coberturas serem ambientes fundamentalmente diferentes do chão, o uso de plantas nativas nas coberturas verdes não é direto e, se efetuado de modo inadequado, pode resultar em mortandade vegetal.”

“Because the rooftop is a fundamentally different environment than the ground, using native plants on green roofs is not straightforward and if done improperly can result in extensive plant mortality.” (BUTLER, et al., 2012, p. 1).

- **área:** Tetos verdes de grandes extensões ajudam aquelas espécies que necessitam de grandes áreas para sua sobrevivência (BRENNEISEN, 2006).
- **espessura do meio de cultura:** é o fator que mais determina a riqueza de uma cobertura verde. Ajuda *diretamente* animais que dependem do abrigo do solo para sobrevivência. Por exemplo, a minhoca comum (ordem *Megadrilacea*) não consegue sobreviver em tetos verdes extensivos devido à impossibilidade de se atingir camadas mais profundas para se proteger do calor. O efeito *indireto* é que maiores espessuras permitem maior variedade de flora.
- **variação topográfica:** montículos e depressões contribuem para diferentes sombreamentos e espessuras de solo, estimulando uma colonização variada — áreas rasas abrigam geófitas e suculentas esparsas, enquanto áreas profundas são colonizadas por densas comunidades de gramíneas e herbáceas (BRENNEISEN, 2006). O sombreamento por estruturas construtivas, como respiros e ar condicionado, além da inclinação e diferentes orientações de cada água podem todos ser utilizados para a criação de ambientes diferentes e fornecer a reclusão necessária para alimentação e ninhos de espécies ariscas (JOHNSTON; NEWTON, 2004).
- **variação hidrológica:** ao contrário das recomendações técnicas, áreas pouco drenáveis podem ser desejáveis, pois imitam várzeas e áreas alagáveis comuns em campinas; áreas secas podem abrigar plantas de perfil mais xerófilo. A disponibilidade de água (através de acúmulo ou irrigação), mesmo mínima, beneficia a fauna (JOHNSTON; NEWTON, 2004).
- **solo natural:** novamente ao contrário das recomendações técnicas, o uso de material natural local traz banco de sementes e fauna que dificilmente colonizariam a cobertura espontaneamente,

devendo-se reservar as camadas mais superficiais antes da obra; pode até mesmo imitar o perfil geológico com a colocação de *sub-solos* existentes.

[...] densidade de invertebrados é influenciada significativamente pela composição e distribuição do substrato e **menos dependente da composição florística** (CURRIE; BASS, 2010, p. 8, tradução nossa).¹⁷⁴

Para Brenneisen (2006):

[...] apesar de que substratos técnicos (ou seja, substratos desenvolvidos especificamente para tetos verdes) possuam muitas vantagens práticas em termos de peso, drenagem consistente e isolamento eficiente, são geralmente pouco satisfatórios em se tratando de biodiversidade (BRENNEISEN, 2006, tradução nossa).¹⁷⁵

- **acesso:** a colonização se inicia com a introdução das espécies. Assim, quanto mais acessíveis os tetos verdes (ou seja, mais baixos, menos isolados e de preferência com conexão com o solo, como no caso de edifícios semi-enterrados), maior a variedade. Pássaros e insetos chegam a acessar tetos com 20 andares de altura.
- **isolamento:** por outro lado, o isolamento contra o contato humano pode ser benéfico a muitas espécies, como plantas sensíveis ao pisoteio ou aves que fazem ninho no solo (PECK; KUHN, 2003). Além disso, há a possibilidade da não introdução de espécies prejudiciais aos seres humanos, como ratos, ou à fauna, como gatos.
- **plantas:** como no solo, plantas que fornecem néctar, frutos, sementes são preferíveis. Variedade também é importante: “Há expectativa de que comunidades diversas compostas por espécies com uso complementar de recursos utilizem os recursos totais de

174 “[...] invertebrate diversity is influenced significantly by the composition and distribution of substrate and less reliant on the composition of plants.” (CURRIE; BASS, 2010, p. 8).

175 “[...] although technical substrates (that is, substrates developed specifically for green roofs) have many practical advantages in terms of weight, consistent drainage, and efficient installation, they are generally suboptimal where biodiversity is concerned.” (BRENNEISEN, 2006, p. 29).

modo mais completo e eficiente.” (COOK-PATTON; BAUERLE, 2012).¹⁷⁶ Lundholm (2004) detalha:

Pesquisas em [...] comunidades vegetais identificou potencial para que maior diversidade de espécies afetasse funções do ecossistema como produção de biomassa, estabilidade e retenção ou absorção de nutrientes. Em geral, uma comunidade com mais espécies pode utilizar os recursos existentes de maneira mais completa, devido à complementaridade de nichos, que permite a coexistência de espécies que podem utilizar diferentes formas de recursos ou exibir consumo de recursos em diferentes épocas do ano (LUNDHOLM, 2004, p. 93, tradução nossa).¹⁷⁷

8.2.1 Tetos verdes na Ecologia da Paisagem

A Ecologia da Paisagem é um ramo nascido do reconhecimento da importância das discontinuidades espaciais para a ecologia, e se baseia no conceito de *manchas* (*patches*, áreas isoladas), matrizes (fundo) e corredores.

Tetos verdes podem ser importantes conectores ecológicos na paisagem urbana, limitada tradicionalmente à arborização viária, parques e quintais, por suavizarem a matriz urbana hostil. Velazquez (2005) comenta:

Em um contexto de ecologia da paisagem, tetos verdes criam uma borda artificial ou antrópica enquanto ainda servem como uma mancha de habitats vegetativos. Essas manchas de tetos verdes, no contexto matricial da cidade, podem atingir diversas funções ecológicas. Caso múltiplos tetos verdes sejam agrupados e projetados como corredores vegetados, alguma aparência de conectividade paisagística poderia ser conseguida. Tais corredores podem oferecer descanso para aves migratórias e borboletas (VELAZQUEZ, 2005).¹⁷⁸

176 “Diverse communities composed of species with complementary resource use are expected to utilize total resources more completely and efficiently.” (COOK-PATTON; BAUERLE, 2012).

177 “Research in other plant communities has identified the potential for larger amounts of species diversity to positively affect ecosystem functions such as biomass production, stability, and nutrient retention or absorption [...]. In general, a community with more species might more completely utilize existing resources due to niche complementarity, which allows the coexistence of species that can use different forms of resources or exhibit resource consumption at different times of the year.” (LUNDHOLM, 2004, p. 93).

178 “In a landscape ecological context, greenroofs create an artificial or man-made edge, while also serving as a vegetative habitat patch. These greenroof patches, set within the matrix of a city, can accomplish several ecological functions. If multiple greenroofs were grouped and designed as vegetated corridors, some semblance of

Peck e Kuhn (2003) complementam, citando dois tipos de habitats de tetos verdes identificados na Europa, os “trampolins” e as “ilhas”:

Na Europa, dois tipos de habitats de tetos verdes foram definidos e implementados, como parte de um sistema maior de corredores faunísticos em áreas urbanas. O primeiro é um habitat “trampolim”, que conecta bolsões de habitats naturais isolados uns com os outros. É importante lembrar que essa conexão é exclusivamente aérea (aves migratórias e nidificadoras, insetos, sementes aéreas). O segundo é o habitat “ilha”, que permanece isolado do habitat em nível. Esse tipo seria lar de variedades selecionadas de plantas cujas sementes não se espalham por ar ou distâncias curtas (PECK; KUHN, 2003, tradução nossa).¹⁷⁹

Inúmeros estudos na Inglaterra mostram a importância de tetos verdes para comunidades de invertebrados.¹⁸⁰

Mesmo assim, tetos verdes não são substitutos perfeitos para ecossistemas terrestres. A instalação da tecnologia *nunca deve justificar a remoção de ambientes naturais* (PECK; KUHN, 2003). Além disso, as limitações construtivas podem restringir a colonização por espécies nativas nos meios de cultura artificiais e nas condições térmicas e hídricas mais extremas; pode ser necessário o uso de plantas exóticas já adaptadas antes de experimentar com plantas nativas locais (GREENROOFS.COM). Brenneisen (2006) conclui:

Como ferramenta potencial para preservação e restauro de biodiversidade em áreas urbanas, tetos verdes precisam ser vistos menos de uma perspectiva de jardinagem ornamental e conservação de energia, e mais de uma perspectiva regio-

landscape connectivity could be achieved. Such corridors could offer respite for migrating birds and butterflies.” (VELAZQUEZ, 2005, p. 11).

179 “In Europe, two types of green roof habitats have been defined and implemented, as part of a larger system of wildlife corridors in urban areas. The first is a “stepping stone” habitat that connects natural isolated habitat pockets with each other. It is important to remember that this connection can be by air only (nesting and migrating birds, insects, airborne seeds). The second is an “island” habitat that remains isolated from habitat at grade. This type of habitat would be home to selected plant varieties whose seeds are not spread by air or over short distances” (PECK; KUHN, 2003, p. 9).

180 Cf. Jones (2002); Kadas (2006).

nal de planejamento paisagístico e ecológico (BRENNEISEN, 2006, tradução nossa).¹⁸¹

Há, portanto, contradições nos objetivos de tetos verdes biodiversos e as determinantes técnicas que devem ser melhor estudadas. Existe também a possibilidade de planos paisagísticos e ecológicos com enfoque nas coberturas, permitindo sua inserção na malha urbana. Por exemplo, podem-se definir corredores urbanos para avifauna ou insetos que não dependeriam apenas das copas das árvores.

181 “As a potential tool for preserving and restoring biodiversity in urban areas, green roofs need to be seen less from the perspective of ornamental gardening and energy conservation and more from a regional perspective of landscape and ecological planning.” (BRENNEISEN, 2006).

8.1 Políticas de biodiversidade

8.1.1 Mundo

A Convenção Sobre Diversidade Biológica (CDB), assinada em 1992, estabelece princípios que protegem a biodiversidade nos países signatários, reconhecendo todos os ecossistemas, e que eles devem ser usados para benefício da humanidade, mas de um modo que não leve ao declínio de longo prazo da biodiversidade. Defende o princípio da prevenção, em que o desconhecimento científico de danos não deve justificar uma degradação ambiental. Cada país deve elaborar Estratégias e Planos de Ação Nacionais para a Biodiversidade¹⁸² ou equivalente, delineando a estratégia local.

8.1.2 Alemanha

Em nível global, a legislação alemã está alinhada com a Agenda 21 e a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (CNUMAD), conhecida também como ECO-92, Rio-92.

Em nível continental, ela segue as Diretivas do Conselho das Comunidades Europeias (LAWLOR et al., 2006), entre elas:

- **Directiva dos Hábitats** (Directiva 92/43/CEE do Conselho, de 21 de Maio de 1992), relativa à preservação dos habitats naturais e da fauna e da flora selvagens.
- **Directiva Aves** (Directiva 79/409/CEE)

Em nível nacional, um preceito importante na legislação ambiental alemã é a “regra da intervenção”. Uma intervenção é definida pela BNatSchG §8 (1) como:

quaisquer alterações que afetem a aparência ou uso de áreas que levem a deficiência considerável ou duradoura da efi-

¹⁸² National Biodiversity Strategies and Action Plans (NBSAP)

ciência do equilíbrio da natureza ou do cenário natural.¹⁸³
(NGAN, 2004, tradução nossa).

Toda intervenção deve, em ordem de prioridade em relação a danos ambientais:

- **evitá-los**, ou seja, se há uma opção satisfatória que evite o dano, ela deve ser feita.
- **minimizá-los**, caso o dano não puder ser evitado, ele deve ser o menor possível.
- **compensá-los**: caso o dano não possa ser minimizado, ele deverá ser compensado com medidas mitigadoras no local.
- **relocá-los**: caso não seja possível a compensação local, deverá ser feita compensação em outra área.

As coberturas verdes se encaixam na opção de compensação, sendo que tal reconhecimento é deixado a cargo dos municípios, e a Regra serve de amparo legal, sendo, portanto, mal distribuída. Mesmo em municípios que permitem a compensação por tetos verdes, isso ocorre normalmente em áreas onde ainda há vegetação a ser removida e depois compensada, deixando áreas centrais consolidadas descobertas pelo instrumento.

Berlim instituiu incentivos em 1988, com a exigência que edificações que ocupassem área excessiva do lote seriam obrigados a ter as coberturas verdes (DUNNETT; KINGSBURY, 2004, p. 17)

8.1.3 Suíça

O cantão da Basileia introduziu política de fomento à biodiversidade em seu código de obras através dos tetos verdes, e demanda a inclusão de solo local no substrato, além de variação topográfica do meio de cultura (BRENNEISEN, 2006):

183 “any changes affecting the appearance or use of areas which lead to considerable or lasting impairment of the efficiency of the balance of nature or the natural scenery” (BNatSchG §8 (1) (NGAN, 2004).

Como parte da estratégia de biodiversidade da cidade, tetos verdes são obrigatórios em edificações novas com coberturas planas, e há orientação para criação de habitats para plantas e animais diferentes nos tetos verdes. Critérios de projeto para a criação desses habitats incluem variação na espessura do substrato e uso de solos naturais locais.¹⁸⁴ (BRENNEISEN, 2006, p. 27, tradução nossa).

Currie e Bass (2010) complementam:

A legislação federal de cultura e conservação da Suíça apoia a proteção de espécies ameaçadas da fauna e da flora. Em conformidade, o cantão da Basileia agora exige uma estratégia para biodiversidade para tetos verdes que aponta para uso de substratos misturados com solo local para extensivos. Na Basileia, tetos verdes devem ser construídos em todos os novos edifícios com coberturas planas (Ato de Conservação da Natureza e Paisagem 9; ...) Além do mais, em tetos verdes com mais de 500 m², o substrato deve ser mesclado ao solo local e instalado com profundidades variadas (CURRIE; BASS, 2010, p. 8, tradução nossa).¹⁸⁵

Para tal, Brenneisen (2006) recomenda pesquisas específicas que verifiquem o potencial como habitat de espécies específicas:

Para ser bem sucedido, uma estratégia de biodiversidade em tetos verdes deve ser baseada em um **programa de pesquisa regional** que investigou as oportunidades para uso de tetos verdes como habitats e condições específicas exigidas para a espécie que os povoaria.¹⁸⁶ (BRENNEISEN, 2006, p. 30, tradução nossa).

184 "As part of the city's biodiversity strategy, green roofs are now mandatory on new buildings with flat roofs, and guidance is provided for the creation of different plant and animal habitats on the green roofs. Design criteria for the creation of these habitats include varying the substrate thickness and using natural soils from nearby areas." (BRENNEISEN, 2006)

185 "Swiss Federal conservation and cultural legislation supports the protection of endangered plant and animal species. Accordingly, the canton of Basel now mandates a biodiversity strategy for green roofs that points to the use of local area soil substrates that are blended for extensive green roof construction. In Basel, green roofs must be constructed on all new buildings with flat roofs (Nature and Landscape Conservation Act § 9; Building and Planning Act § 72). Moreover, on roofs with more than 500 square meters, the green roof substrate must be blended with local area soils and designed and installed at varying depths." (CURRIE; BASS, 2010).

186 "To be successful, an urban biodiversity strategy for green roofs should be based on a regional research program that has investigated the opportunities for using green roofs as habitats and the specific conditions required by the species that would populate them." (BRENNEISEN, 2006).

8.1.4 Brasil

A Constituição da República Federativa do Brasil, de 1988, reconhece a importância da biodiversidade para o país, no Capítulo VI — Do Meio Ambiente, Art. 225:

Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.

Mais especificamente, a Lei Federal 9.605/98, que trata de crimes ambientais, define “fauna silvestre” como aquela formada por “espécies nativas, migratórias, ou que tenham todo ou parte de seu ciclo de vida em território brasileiro”. A ênfase é claramente sobre a biodiversidade silvestre, não mencionando a urbana.

1. Aperfeiçoar a regulamentação do uso e ocupação do solo urbano e promover o ordenamento do território, contribuindo para a melhoria das condições de vida população, considerando a promoção da equidade, a eficiência e a qualidade ambiental;
2. Promover o desenvolvimento institucional e o fortalecimento da capacidade de planejamento e gestão democrática da cidade, incorporando no processo a dimensão ambiental urbana e assegurando a efetiva participação da sociedade;
3. Promover mudanças nos padrões de produção e consumo da cidade, reduzindo custos e desperdícios e fomentando o desenvolvimento de tecnologias urbanas sustentáveis;
4. Desenvolver e estimular a aplicação de instrumentos econômicos no gerenciamento dos recursos naturais visando a sustentabilidade urbana” (AGENDA 21 BRASILEIRA, 2004, p. 15).

8.1.5 São Paulo

Como toda metrópole, a cidade de São Paulo sofre com a perda da biodiversidade caracterizada pela proximidade do bioma Mata Atlântica. O relatório

“Ações locais para a biodiversidade da cidade de São Paulo” (SÃO PAULO (MUNICÍPIO), 2008) descreve em detalhes a situação da cobertura vegetal no Município:

A cobertura vegetal existente no Município é constituída basicamente por **fragmentos da vegetação natural secundária da Mata Atlântica** em regiões mais preservadas como no extremo sul, na Serra do Mar, e ao norte, na Serra da Cantareira, e também por áreas implantadas como **parques, praças, arborização viária, além de terrenos particulares**.

Os **maciços florestais nativos** em estágios mais avançados de sucessão ecológica estão confinados no limite sul do município, onde verificam-se formações denominadas como Floresta Ombrófila Densa e Mata Nebular, além dos **campos naturais e formações de várzea**. Ao norte, os parques estaduais do Jaraguá, da Cantareira, e o parque municipal do Anhanguera abrangem os remanescentes de floresta Ombrófila Montana, e na zona leste na Área de Proteção Ambiental — APA do Carmo.

A metrópole avança sobre remanescentes do **Bioma Mata Atlântica** que, no Brasil, apesar da devastação acentuada, ainda abriga uma parcela significativa de diversidade biológica, com altíssimos níveis de endemismo e mais de 2300 espécies de vertebrados. Dessas, estima-se que aproximadamente 740 espécies são endêmicas. Para alguns grupos essa unicidade é ainda mais acentuada. Cerca de 80% das 24 espécies de primatas da Mata Atlântica não ocorrem em nenhum outro lugar do planeta.

O nível de diversidade e endemismo de plantas do Bioma é ainda mais impressionante. São estimadas 20 mil espécies, das quais cerca de 8 mil são endêmicas. **O alto nível de riqueza de espécies e endemismo, associado com a elevada pressão antrópica sobre o bioma, colocam a Mata Atlântica brasileira entre os 5 hotspots mundiais mais ameaçados do planeta** (SÃO PAULO (MUNICÍPIO), 2008, grifo nosso).

Destaque é dado à avifauna extremamente diversa (“285 espécies de aves pertencentes a 233 gêneros, 53 famílias, e 19 ordens”) e com alto grau de endemismo (“44 espécies possuem distribuição restrita ao bioma da Mata Atlântica, com a taxa de endemismo correspondendo a 15% do total de espé-

cies”), sendo que o atendimento às suas necessidades é priorizado mesmo na arborização urbana (“O programa [de arborização] estabelece uma lista de árvores nativas para plantio em áreas urbanas, sendo a maioria específica para fornecer alimentação e material de ninho para a avifauna”), e com alta presença no meio urbano devido ao entorno florestal:

as reservas florestais localizadas nos arredores abrigam boa parte da avifauna original da cidade, e explicam **a ocorrência eventual de algumas aves tipicamente florestais na cidade**. No Município de São Paulo, o Parque Estadual da Cantareira, localizado ao norte da cidade, representa uma das maiores florestas tropicais nativas em áreas urbanas do mundo (SÃO PAULO (MUNICÍPIO), 2008, grifo nosso).

Em termos legais, a proteção à biodiversidade está na Lei Orgânica do Município de São Paulo (1990), no Capítulo V – Do Meio Ambiente:

Art. 180 - O Município, em cooperação com o Estado e a União, promoverá a preservação, conservação, defesa, recuperação e melhoria do meio ambiente.

Art. 186 - O Município deverá recuperar e promover o aumento de áreas públicas para implantação, preservação e ampliação de áreas verdes, inclusive **arborização frutífera e fomentadora da avifauna**.

Art. 188 - O Município coibirá o tráfico de animais silvestres, exóticos e de seus subprodutos e sua manutenção em locais inadequados, bem como **protegerá a fauna local e migratória do Município de São Paulo**, nesta compreendidos todos os animais silvestres ou domésticos, nativos ou exóticos

Art. 189 - O Município estimulará as associações e movimentos de proteção ao meio ambiente (SÃO PAULO (MUNICÍPIO), 1990, grifo nosso).

Um dos problemas é a fragmentação ecológica, amenizada por meio da instalação de tetos verdes:

Pressionados pela urbanização, fragmentos de vegetação nativa acabam sendo isolados, conseqüentemente sofrendo com o efeito de borda e a suscetibilidade a incêndios. Não conectados, o fluxo gênico entre tais fragmentos é prejudi-

cado e, conseqüentemente, fica ameaçada sua sobrevivência (SÃO PAULO (MUNICÍPIO), 2008).

Há uma ênfase nas árvores na questão ambiental da cidade de São Paulo, em detrimento de campos e várzeas, o que pode levar a uma falta de incentivo à construção de tetos verdes leves como fomentadores da biodiversidade.

O Plano Diretor da cidade introduziu parques lineares, corredores, direito de preempção como ferramentas para as melhorias do Sistema de áreas verdes¹⁸⁷:

Plano Diretor - No atual Plano Diretor, elaborado pela PMSP a partir de 2001, sob a coordenação de SEMPLA, podem ser citados como principais destaques para a questão da vegetação: o conceito de Sistema de Áreas Verdes como um dos quatro elementos integradores da urbanização do território; a introdução da figura do direito de preempção, prevista no Estatuto da Cidade (Lei Federal 10.257, de 10/07/2001) para a implantação de novos parques, estando mapeadas no corpo da lei [doze] áreas sujeitas à aplicação deste instrumento; a proposta dos parques lineares contínuos e os caminhos verdes, implantados a partir do Programa de Recuperação Ambiental de cursos d'água e fundos de vale e a incorporação dos conceitos estabelecidos no Sistema Nacional de Unidades de Conservação – SNUC na definição do Sistema de Áreas Verdes (SÃO PAULO (MUNICÍPIO), 2002a).

8.1.5.1 Compensação Ambiental no Município de São Paulo

Todo projeto na cidade de São Paulo que envolva supressão da vegetação deve ter medidas compensatórias que mitiguem ou compensem o dano ambiental causado, cuja obrigação é determinada pelo Termo de Compensação Ambiental (TCA), descrito pela Portaria 44/SVMA-G/2010 (SÃO PAULO (MUNICÍPIO), 2010, p. 144).

187 Não se reconhecem tetos e paredes verdes no Sistema. De acordo com o Atlas Ambiental: “Segundo o Plano Diretor em vigor, em seu artigo 34, o Sistema de Áreas Verdes é constituído pelo conjunto de áreas de propriedade pública ou particular, delimitadas pela Prefeitura, com o objetivo de implantar ou preservar arborização e ajardinamento. São consideradas áreas verdes e como tais incorporam-se ao Sistema de Áreas Verdes, dentre outras: a) todos os parques públicos, praças, jardins e, ainda, as áreas verdes ligadas ao sistema viário; b) todos os espaços livres e áreas verdes de arruamentos e loteamentos existentes, bem como áreas verdes de projetos a serem aprovados.” (SÃO PAULO (MUNICÍPIO), 2002a)

O projeto deve ser aprovado pela Divisão Técnica de Proteção e Avaliação Ambiental (DPAA), pertencente à Secretaria do Verde e do Meio Ambiente de São Paulo (SVMA), que verifica a real necessidade de manejo, sugerindo alterações caso seja possível a não remoção de exemplares.

Após essa fase, caso ainda haja remoções, é feito um cálculo compensatório pelo número de árvores efetivamente removidas, levando em consideração os exemplares transplantados, caso sobrevivam. A densidade arbórea deve se manter igual ou superior à anterior (item 22).

A compensação prevê o plantio de um número de mudas nativas com diâmetro do caule à altura do peito (DAP) mínimo de 5 cm, ou um número proporcionalmente menor caso se opte por plantio de DAP maiores. O plantio é feito preferencialmente **no próprio terreno** onde foram feitas as supressões. Caso isso não seja possível, o plantio pode ser feito em outros terrenos ou as mudas doadas para viveiros municipais. A compensação é sempre arbórea, não sendo considerada a possibilidade de vegetação campestre ou tetos verdes.

Devido a um grande número de mudas aguardando plantio, a Câmara de Compensação Ambiental pode decidir por converter as mudas em obras e serviços a serem executados em áreas verdes da cidade (item 13.1.1), preferencialmente dentro da mesma região onde foi feita a supressão, definida como a mesma bacia hidrográfica (item 16.1).

A conversão é feita através de um valor da muda (“uma unidade de arborização pública”), atualizado mensalmente, que leva em conta a muda em si, com DAP de 5 cm e condições físicas e fitossanitárias adequadas, além de tutor e manutenção por dois anos (item 31). O valor da muda era de aproximadamente R\$ 350 em 2012.

A compensação tem caráter de proteger preferencialmente indivíduos arbóreos em detrimento de vegetação não lenhosa ou de pequeno porte como, por exemplo, as rasteiras (item 2).

2. A vegetação a ser considerada para efeito de autorização de manejo e respectiva compensação ambiental é aquela composta por espécime ou espécimes vegetais lenhosos, com Diâmetro do Caule à Altura do Peito — DAP superior a 3,0 cm (três centímetros) (SÃO PAULO (MUNICÍPIO), 2010).

Tal preferência é compreensível dada a cobertura original de caráter predominantemente florestal na região da cidade de São Paulo, sendo que vegetações ripárias já estão protegidas por serem áreas de proteção permanente (APP).

A lei possui também um caráter de proteção à vegetação nativa em detrimento da exótica. Tal critério é mais acentuado no caso de pinus e eucaliptos, consideradas “invasoras” — mesmo que grandes exemplares destes gêneros tenham importância no microclima local como quebra-ventos, sombreadores, retentores de material particulado, geradores de evapotranspiração e como abrigo para fauna, eles ainda são compensados “1 para 1”, podendo um exemplar de dezenas de metros de altura ser substituído por apenas uma muda de 2 metros. Assim, os serviços físico-climáticos destes indivíduos arbóreos têm menor importância em relação aos serviços ecológicos (COELHO, 2008).

A lei não leva em consideração qualquer tipo de compensação que não tenha caráter arbóreo, como coberturas verdes ou vegetação rasteira, que seriam relevantes dado o alto adensamento construtivo da cidade. A vegetação rasteira é abrigo para inúmeras aves, que têm seus habitats desprotegidos pela lei, tanto pelo fato da perda de vegetação rasteira não ser considerada dano ecológico, quanto por ela não poder ser ferramenta de compensação. A criação da possibilidade de áreas de coberturas e fachadas verdes terem alguma equivalência em mudas poderia ajudar a mitigar essa deficiência, abrindo-se até mesmo a possibilidade de esverdeamento fora do local do dano ambiental (ou seja, uma parede externa antiga poderia ser “adotada” por um empreendimento novo na região, por exemplo).

Ainda assim, a existência de tal lei já serviu para educação de construtoras, empreendedoras e profissionais quanto à mitigação e compensação de danos ambientais, mesmo que seja necessária a expansão na definição de dano e das medidas compensatórias.

Capítulo 9 – Aplicação

Os tetos verdes são uma solução polivalente, atingindo diversos problemas urbanos conforme visto nos capítulos anteriores. Porém, como visto, a incorporação nas respectivas políticas públicas esbarra na diversidade de instâncias (federal, estadual e municipal) e fragmentação das leis.

A eleição de apenas um tipo de política pública — como o manejo de águas pluviais — para simulação local contradiz a intenção do trabalho. Assim, buscou-se um modo de aplicação multifacetado e flexível, porém simples, que também mantivesse o poder de escolha do proprietário.

9.1 *Biotopflächenfaktor*

O índice alemão BFF (*Biotopflächenfaktor*, fator de superfícies de hábitat) é uma ferramenta fiscalizatória e normativa que concilia liberdade de escolha do proprietário com garantia de desempenho, através de uma maior gradação que o tradicional sistema binário permeável/impermeável, reconhecendo pesos intermediários de acordo com o “efetividade ecológica” de superfícies externas.

O BFF foi escolhido por sua flexibilidade em incorporar diferentes abordagens e soluções polivalentes em um único índice, aceitando facilmente o uso de tetos verdes. Ele é pioneiro e foi readaptado a inúmeras localidades, como Seattle, EUA.

Como estudo de caso, ele foi testado em quadras típicas de três tipologias da cidade de São Paulo: Bom Retiro (misto), Jurubatuba (industrial) e Moema (residencial).

O BFF é usado em Berlim desde 1984, quando a cidade ainda era dividida, e foi adotada por completo em 1991. O índice faz parte do Programa da Paisagem (LaPro), que por sua vez pertence aos Planos da Paisagem (*Landschaftsplann*). O BFF tem natureza legal e obrigatória, o que contribui para sua adoção (BECKER et al., 1990).

Um “índice de pesos” como o BFF é intermediário entre *simulação* (precisa) e a *tecnologia única* (prática). Um índice bem elaborado atinge precisão suficiente para a maioria dos casos.

Ele é calculado dividindo-se a “área ecologicamente efetiva” (AEE) pela área total do lote. A “efetividade ecológica” de uma superfície é o peso que ela tem para o hábitat e a ecologia local, baseada em cinco critérios:

- 1) alta eficiência evapotranspirativa;
- 2) retenção de poeira;
- 3) infiltração e capacidade de armazenamento de água de chuva;
- 4) garantia de longo prazo da conservação ou desenvolvimento de funções do solo relativas a filtragem, amortecimento e transformação de substâncias danosas;
- 5) disponibilidade como hábitat para plantas e animais.¹⁸⁸

O resultado, de zero a 1, é similar a fatores como índice de aproveitamento ou taxa de ocupação, o que facilita o treinamento de funcionários e fiscais (BECKER et al., 1990).

Porém, ao contrário de outros parâmetros, o BFF não leva em consideração apenas “áreas permeáveis”¹⁸⁹ ou “áreas vegetadas”,¹⁹⁰ como também soluções intermediárias: diversos tipos de cobertura do solo (jardins [1,0], pisos semipermeáveis vegetados [0,5]), paredes verdes [0,5], tetos verdes [0,7]¹⁹¹ e captação de água de

188 “The following criteria can be derived from the targets for the evaluation of individual types of areas: high evapotranspiration efficiency; binding dust; infiltration ability and storage of rainwater; long-term guarantee of the conservation or development of soil functions with regard to the filtering, buffering and transformation of hazardous substances; availability as a habitat for plants and animals”. (BECKER et al., 1990).

189 compare com a “impermeabilização máxima” de 85% em um lote

190 compare com a obrigação de deixar 15% de “área verde” em loteamentos; Lei Municipal nº 9413/81.

191 “Plantio sobre tetos. Peso: 0,7. Função para ecossistema e desenvolvimento de hábitat: alta eficiência evapotranspirativa e capacidade de capturar poeira, funções de solo limitadas, baixa a média capacidade de armazenamento de água, alta a muito alta significância como hábitat para plantas e animais (especialmente se forem extensivos). Não há diferenciação entre tetos verdes intensivos e extensivos. Geralmente, quando extensivamente plantados, assume-se alta significância em relação à qualidade de hábitat para plantas e animais, enquanto tetos verdes intensivos apresentam aumento nos efeitos ecológicos devido ao maior volume de solo.”

“Roof greening: 0.7. Function for ecosystem and biotope development: high evapotranspiration efficiency and capacity to bind dust, limited soil functions, low to medium storage capacity of rainwater, high to very high

chuva [0,2]. Esses pesos intermediários têm a vantagem de permitir diferentes combinações, mantendo a liberdade arquitetônica, sem desprezar as soluções “menos efetivas” — muitas vezes as únicas incorporáveis em um determinado lote.¹⁹²

Com base nos critérios, determinaram-se os pesos de diversas superfícies (BECKER et al., 1990):¹⁹³

Tipo	Peso	Descrição
Superfícies seladas	0,0	Superfície impermeável a ar e água e não possui crescimento vegetal (e.g. concreto, asfalto, lajotas com base sólida)
Superfície parcialmente selada	0,3	Superfície parcialmente permeável a ar e água; via de regra, sem crescimento vegetal (e.g. tijolo, mosaico, lajotas com base de areia)
Superfícies semiabertas	0,5	Superfície é permeável a ar e água; infiltração; crescimento vegetal (e.g. pedrisco gramado, pavimentação de blocos de madeira, “concregramas”)
Superfícies com vegetação desconectadas do solo abaixo	0,5	Superfícies com vegetação sobre lajes ou garagens subterrâneas, com menos de 80 cm de espessura
Superfícies com vegetação desconectadas do solo abaixo	0,7	Superfícies com vegetação sobre lajes ou garagens subterrâneas, com menos de 80 cm de espessura
Superfícies com vegetação conectadas ao solo	1,0	Vegetação conectada ao solo abaixo, disponível para flora e fauna.
Infiltração de água de chuva por m ² de área de cobertura	0,2	Infiltração de água de chuva para restauro dos lençóis freáticos; infiltração sobre superfícies com vegetação existente
Plantio vertical até altura de 10 m	0,5	Vegetação cobrindo muros e paredes externas sem janelas; a altura real, até 10 m, é levada em consideração
Vegetação sobre cobertura	0,7	Cobertura extensiva e intensiva

Tabela 6: Descrição e peso de cada tipo de superfície.

Fonte: Adaptado de BECKER et al. (1990).

significance as a habitat for plants and animals (especially when roofs are extensively greened). No differentiation is made in the significance between intensively and extensively greened roofs. Generally, when roofs are extensively greened, it may be assumed that there is a high significance with regard to the quality of the habitat for plants and animals, while in the case of intensively greened roofs an increase in the ecological effects may be expected due to the increase in the volume of soil.” (BECKER et al., 1990).

192 “A interferência na liberdade arquitetônica é relativamente baixa, havendo, porém, uma meta para o padrão mínimo necessário como melhoria da situação ambiental.”

“[The] interference in architectural freedom is relatively low while, however, still setting a benchmark for the necessary minimum standard as an improvement for the environmental situation.” (BECKER et al., 1990).

193 Cf. Anexo B - BFF (Biotopflächenfaktor), pág. 321.

9.1.1 Definição do BFF-alvo

O índice foi desenvolvido especialmente para áreas centrais já consolidadas, onde a saturação do espaço urbano obriga o aproveitamento da propriedade privada e das próprias edificações. Áreas ainda não ocupadas possuem outros instrumentos de regulação (BECKER et al., 1990).

Primeiramente, tenta-se estabelecer um índice mínimo para um uso de uma região: residencial, misto etc. Caso isso gere incompatibilidades com algumas edificações, pode se estabelecer índices para lotes individuais.

Muitas vezes será necessário lançar mão de tetos verdes para atingir o BFF-alvo. Porém, para áreas residenciais, isso deve ser evitado pelos custos mais elevados, reservando-se a solução apenas para áreas mais problemáticas.¹⁹⁴

Os alvos variam de:

- 0,3 para áreas comerciais e escolas;
- 0,45 no caso de reformas residenciais, de edifícios públicos e creches que estabelecem a taxa de ocupação entre 0,38 e 0,49;
- 0,6 para reformas residenciais, de edifícios públicos e creches que estabelecem a taxa de ocupação de até 0,37, ou edificações novas dos mesmos tipos.

9.1.2 Cálculo

Para o cálculo do BFF, somam-se as “áreas ecologicamente efetivas” com os devidos pesos (multiplicado por 0,7 no caso de coberturas verdes, por exemplo), e divide-se pela área total do lote.

$$BFF = \text{área ecologicamente efetiva (AEE)} / \text{área total do lote} \quad (4)$$

¹⁹⁴ “O BFF-alvo para ocupações residenciais deve ser formulado de tal modo a ser geralmente possível atingi-lo, fora de zonas adensadas, sem a necessidade de tetos verdes adicionais.” *“The target BAF for residential developments should be formulated in such a way that it will generally be possible to achieve this target outside dense block construction areas without additional roof greening.”* (BECKER et al., 1990).

Situação atual BFF = 0,06		Variação de projeto A BFF = 0,3		Variação de projeto B BFF = 0,3	
Superfície imperme. [0,0]	140,0 m ²	Vegetação [1,0]	115,0 m ²	Sup. de concreto [0,0]	21 m ²
Sup. semiaberta [0,5]	59,0 m ²	Piso de mosaico [0,3]	25,5 m ²	Vegetação [1,0]	79 m ²
Solo aberto [1,0]	1,0 m ²			Piso de mosaico [0,3]	100 m ²
				Paredes verdes [0,5]	10 m ²
				Tetos verdes [0,7]	41 m ²
AEE	30,5 m ²	AEE	122,6 m ²	AEE	137 m ²

Fig. 9 Exemplo de diferentes métodos de se atingir um BFF de 0,3.
 Neste exemplo, área do terreno é igual a 472 m², e grau de ocupação é de 0,59.
 Fonte: BECKER et al. (1990), p. 6.

Estudos de caso

Uma quadra típica foi escolhida em três tipologias urbanas, verificando-se a taxa de ocupação média e o BFF existente. Devido à resolução das fotos aéreas e sombras, não foi possível identificar com exatidão algumas superfícies. Assim, supuseram-se dois cenários: a impermeabilização e a permeabilização completa das áreas livres, de modo a estabelecer os limites mínimo e máximo de BFF. Foi calculada a quantidade necessária de três soluções para atingir-se o BFF-alvo [0,3 e 0,6]: tetos verdes [0,7], captação de água [0,2] e piso semipermeável vegetado (“concregrama”) [0,5], e a porcentagem necessária da respectiva superfície (cobertura ou piso).

9.2 Bom Retiro

Região de lazer no séc. XIX, passou a abrigar olarias que aproveitavam o barro. Com a São Paulo Railway, passou a atrair imigrantes que se instalaram nos loteamentos recentes, o que se manteve até o século XX, de diversas nacionalidades.

Dados cartográficos (anexos)	Localização da quadra (ruas limite em sentido horário a partir do norte)	R. Guarani, R. Prates, R. Três Rios, R. Correia de Melo	
	Unidade climática natural	IC1 - Várzeas e baixos terraços do Vale do Tietê	
	Propriedades e características fundamentais	Elevada estabilidade atmosférica noturna e matinal, com nevoeiros e acumulação de ar frio neste período. Ventos fracos, calmarias e inversões térmicas próximas do solo. Forte aquecimento diurno. Dispersão ruim de poluentes.	
	Unidade climática urbana	IB2A - Marginais - Indus./Armaz./Com./Term. Rodo./Marginal Tietê	
	% de áreas verdes	muito pequena	
	Temperatura média de superfície	31–31,5 °C (mín. 25 °C, máx. 32 °C)	
	Verticalização	mais de 50% de verticalização da quadra	
Dados cadastrais	Espaço livre intralote	até 30%	
	Área total da quadra (m²)	12.694,75	
	Área edificada (m²)	11.104,99	
	cobertura cerâmica	3.646,06	32,8%
	laje	741,30	6,7%
	fibrocimento	5.490,25	49,4%
	cobertura leve (metal)	401,80	3,6%
	desconhecido	825,54	7,4%
	Área não edificada (m²)	1 589,76	
	Taxa de ocupação média	87,48%	
Diagnóstico BFF	Índice de permeabilidade (estimado)	0,0 (tudo impermeável)	0,13 (tudo permeável)
	Área Ecologicamente Efetiva (m² ponderado)	125,17	1.714,93
	tetos verdes existentes (0,7)	178,81	178,81
	BFF existente	0,01	0,14
	BFF-alvo	0,3	0,3
	teto verde necessário (0,7)	5.261,80	2.990,71
	% das coberturas	47%	27%
	captação necessária (0,2)	18.416,29	10.467,49
	% das coberturas	166%	94%
	pavimento semi-perm. necessário (0,5)	7.366,52	-
	% do pavimento	463,37%	-

Tabela 7: Diagnóstico Bom Retiro

Mapa 1 Foto aérea Bom Retiro.
Percebe-se a grande quantidade de pavimentação e coberturas, pouca vegetação.

Mapa 4 Coberturas Bom Retiro.
Predomínio do fibrocimento, seguido das telhas cerâmicas. Laranja: cerâmico; azul claro: leve; azul: fibrocimento; roxo: laje; preto: desconhecido; branco: áreas livres

Mapa 2 Ocupação Bom Retiro.
Área extremamente ocupada, com poucos espaços livres. Preto: área edificada; branco: área livre. Taxa de ocupação média da quadra: 87,48%

Mapa 3 Áreas ecologicamente efetivas Bom Retiro.
Teto verde ao sul, e área ajardinada no meio da quadra. Foram consideradas apenas áreas claramente identificáveis. As áreas livres restantes pareciam pavimentadas.

9.3 Moema

Bairro predominantemente residencial e com presença de vegetação. Antiga Indianópolis, teve loteamento iniciado em 1915, sendo que sua população aumentou com a inauguração do Shopping Ibirapuera, no fim dos anos 1970.

Dados cartográficos (anexos)	Localização da quadra (ruas limite em sentido horário a partir do norte)	R. Mendes Pais, R. Leonardo Nardez, R. Bastos Pereira, R. Januário Cardoso	
	Unidade climática natural	IB2 - Colinas, patamares e rampas do Pinheiros	
	Propriedades e características fundamentais	Dispersão de poluentes razoável e drenagem noturna de ar frio.	
	Unidade climática urbana	IA2D - Res. Bairro Verde - Jardins/Moema	
	% de áreas verdes	grande	
	Temperatura média de superfície	29–29,5 °C (mín. 25 °C, máx. 32 °C)	
	Verticalização	de 10 a 50% de verticalização da quadra	
Dados cadastrais	Espaço livre intralote	de 30 a 50%	
	Área total da quadra (m²)	7.738,49	
	Área edificada (m²)	5.401,83	100,0%
	cobertura cerâmica	3.103,41	57,4%
	laje	826,37	15,3%
	fibrocimento	877,13	16,2%
	cobertura leve (metal)	273,82	5,1%
	desconhecido	321,10	5,9%
	Área não edificada (m²)	2.336,66	
	Taxa de ocupação média	69,80%	
Diagnóstico BFF	Índice de permeabilidade (estimado)	0,0 (tudo impermeável)	0,3 (tudo permeável)
	Área Ecologicamente Efetiva (m² ponderado)	0	2.336,66
	tetos verdes existentes (0,7)	0,00	0,00
	BFF existente	0,30	0,00
	BFF-alvo (residencial)	0,6	
	teto verde necessário (0,7)	6.632,99	3.294,91
	% das coberturas	123%	61%
	captação necessária (0,2)	23.215,46	11.532,17
	% das coberturas	430%	213%
	pavimento semi-perm. necessário (0,5)	9.286,18	4.612,87
	% do pavimento	397,41%	-
Tabela 8: Diagnóstico Moema

Mapa 5 Foto aérea Moema.
Percebe-se a quantidade de vegetação mais abundante.

Mapa 6 Coberturas Moema.
Forte predomínio das telhas cerâmicas.
Laranja: cerâmico; azul claro: leve; azul: fibrocimento; roxo: laje; preto: desconhecido; branco: áreas livres

Mapa 7 Ocupação Moema.
Quadra relativamente pouco ocupada.
Preto: área edificada; branco: área livre. Taxa de ocupação média da quadra: 69,80%

Mapa 8 Áreas ecologicamente efetivas Moema.
Toda área não construída, supondo haver abundância de jardins.

9.4 Jurubatuba

Zona de galpões industriais.

Dados cartográficos (anexos)	Localização da quadra (ruas limite em sentido horário a partir do norte)	R. Domingos Jorge, R. Sete de Julho, R. Ferreira Viana, R. Olinda	
	Unidade climática natural	IC3 - Várzeas e baixos terraços do Vale do Pinheiros	
	Propriedades e características fundamentais	Elevada estabilidade atmosférica noturna e matinal, com nevoeiros e acumulação de ar frio neste período. Ventos fracos, calmarias e inversões térmicas próximas do solo. Forte aquecimento diurno. Dispersão ruim de poluentes. Boa ventilação com ventos de SE e NW	
	Unidade climática urbana	IB4 - Indus. - Santo Amaro	
	% de áreas verdes	Pequena a média	
	Temperatura média de superfície	27 a 27,5 °C (mín. 25 °C, máx. 32 °C)	
	Verticalização	até 10% de verticalização da quadra	
Dados cadastrais	Espaço livre intralote	até 30%	
	Área total da quadra (m²)	18.643,83	
	Área edificada (m²)	15.756,71	100,0%
	cobertura cerâmica	1.035,19	6,7%
	laje	1.241,27	7,9%
	fibrocimento	465,11	2,9%
	cobertura leve (metal)	12.944,35	82,1%
	desconhecido	70,79	0,4%
	Área não edificada (m²)	2.887,12	
	Taxa de ocupação média	84,51%	
Diagnóstico BFF	Índice de permeabilidade (estimado)	0,0 (tudo impermeável)	0,15 (tudo permeável)
	Área Ecologicamente Efetiva (m² ponderado)	0,00	2.887,12
	tetos verdes existentes (0,7)	0,00	0,00
	BFF existente	0,00	0,15
	BFF-alvo	0,3	
	teto verde necessário (0,7)	7.990,21	3.865,76
	% das coberturas	51%	25%
	captação necessária (0,2)	27.965,75	13.530,15
	% das coberturas	177%	86%
	pavimento semi-perm. necessário (0,5)	11.186,30	-
	% do pavimento	387,46%	-
Tabela 9: Diagnóstico Jurubatuba

Mapa 9 Foto aérea Jurubatuba.
Percebe-se a extensão das coberturas.

Mapa 10 Coberturas Jurubatuba.
Grande presença de telhas leves. Laranja: cerâmico; azul claro: leve; azul: fibrocimento; roxo: laje; preto: desconhecido; branco: áreas livres

Mapa 11 Ocupação Jurubatuba.
Preto: área edificada; branco: área livre. Taxa de ocupação média da quadra: 84,51%

Mapa 12 Áreas ecologicamente efetivas Jurubatuba.
Pequena área com pedrisco.

Capítulo 10 – Análise de resultados

E relação à metodologia, houve dificuldade na identificação por fotos aéreas. A verificação visual de superfícies exige fotografias aéreas com maior resolução espacial, de preferência de vários ângulos e/ou horas do dia. A utilização de bandas do infravermelho próximo ajudaria a identificar maciços vegetais intralote, assim como superfícies vegetadas, de grande importância no índice. A diferenciação entre superfícies não-vegetadas exigiria outros métodos, não sendo descartada a visita local ou a suposição de impermeabilização até que o próprio proprietário peça o reconhecimento.

É necessário reavaliar os métodos de análise por fotos aéreas, de modo a acelerar e automatizar seu uso, como a “classificação supervisionada relacionada ao objeto”,¹⁹⁵ que utiliza de softwares capazes de classificar superfícies utilizando não apenas o píxel, mas também outros dados cartográficos, tornando o diagnóstico mais preciso.

Essas técnicas não dispensam a análise *in loco* das coberturas, caso venha a se considerar seu esverdeamento, de modo que sejam avaliadas a capacidade de carga e outros critérios para adaptação.

Na região do Bom Retiro, há um predomínio de telhas de fibrocimento, com quase 50% da superfície edificada. Isso significa que há um alto potencial de naturalização da região central, especialmente considerando que áreas centrais consolidadas carecem de parques e arborização viária.

Na região de Moema, há um predomínio de telhas cerâmicas, por ser a cobertura mais utilizada em construções residenciais. Isso, aliado ao fato de ser relativamente arborizado, apontam para um potencial relativamente baixo de naturalização, já que implicaria em reforma de toda a cobertura, ou em telhados leves e com menos benefícios ao ambiente.

¹⁹⁵ Cf. Silva Filho (2009).

Na região de Jurubatuba, predominantemente industrial, há um predomínio em área de coberturas leves, ideais para grandes vãos, mas que dificultam a instalação de tetos verdes. Deve-se considerar que áreas industriais estão sendo alvos de reurbanização e cedendo a pressões do mercado imobiliário, apontando para uma renovação urbana, sendo portanto a adaptação das telhas leves apenas factíveis caso a construção venha a se manter.

Assim, há um padrão de uso de telhas cerâmicas em áreas residenciais¹⁹⁶, e fibrocimento para edifícios de muitos pavimentos, e coberturas leves (metálicas) para extensas áreas, como edificações industriais. O esverdeamento não é limitado pelo revestimento existente da cobertura, havendo soluções tecnológicas para praticamente todos os tipos. Pode ser o caso até de uma cobertura metálica estar mais apta que uma laje nua para a colocação de um teto verde; os benefícios são, porém, multiplicados de acordo com a espessura do meio do meio de cultura, favorecendo as lajes.

Verifica-se grande presença de densas taxas de ocupação, um pouco menos em Moema. As áreas verdes intralotes são fragmentadas, raras, além de difíceis de se identificar.

Conforme explicado, houve dificuldade na identificação das áreas ecologicamente efetivas pela metodologia utilizada. Foram elaborados, portanto, dois cenários:

- toda área não edificada é vegetada (índice 1,0)
- toda área não edificada é pavimentada e impermeável (índice 0,0).

Esses dois limites abrangem a faixa de área ecologicamente efetiva possível de acordo com a taxa de ocupação.

Para cada cenário, foram testados três tipos de soluções que oferecem o menor grau de modificação do local. São elas:

196 Apesar de existirem em diversas cores, neste trabalho as telhas cerâmicas foram identificadas pela sua coloração alaranjada característica.

- telhados verdes, que mantém a edificação e com peso significativo (0,7) na classificação; porém, estima-se que apenas 80% da área de cobertura total pode ser naturada;
- captação e infiltração de água de chuva, considerando a cobertura existente, mas com peso pequeno (0,2)
- colocação de “concregrama” e pavimentos semipermeáveis, com peso mediano de 0,5.

Como resultado, para se atingir o BFF-alvo nas três tipologias, em dois cenários-limite, constatou-se que as coberturas verdes são as únicas que conseguem fazê-lo sozinhas:

- 27%–47% no Bom Retiro: aliado ao alto potencial de suporte de carga, possibilita a mitigação de diversos problemas ambientais nessas áreas muito consolidadas;
- 61%–123% em Moema: valor alto devido ao BFF mais rígido (0,6) para a região residencial; o cenário mais provável está mais próximo de 61%, já que há presença de jardins e quintais na região;
- 25%–51% em Jurubatuba; zonas industriais têm possibilidade de colocação de tetos verdes ou “brown roofs” extremamente leves.

As duas outras tecnologias se mostraram pouco eficientes; devido ao baixo peso, a captação exige grandes quantidades de cobertura, sendo uma medida no máximo complementar. Já a troca de pavimentação é prejudicada pela falta de áreas não edificadas, dadas as altas taxas de ocupação.

10.1 São Paulo: potencialidades e limitações

Como visto, a questão dos tetos verdes pode ser dividida entre a necessidade da tecnologia, e seu potencial de instalação.

O adensamento construtivo de São Paulo, associado aos inúmeros problemas ambientais, apontam para os tetos verdes como soluções complementares de importância variada. Há destaque para o uso como abrigo à avifauna e

limpeza das águas pluviais; a tecnologia tem papel menor no caso da poluição atmosférica, prevenção de inundações e mitigação do calor urbano. Em todos os casos, deve estar associada a outras soluções. A grande vantagem é o acúmulo de benefícios e o proveito de áreas subutilizadas.

Com relação ao potencial de adoção, existem tanto questões técnicas quanto sociais, ambas revisadas na Parte I do trabalho.

Tecnicamente, começam a surgir opções comerciais de tetos verdes, como Skygarden e Ecotelhado, que oferecem o conjunto completo. No caso da instalação não especializada, deve haver cuidado na impermeabilização, muitas vezes mal-feita; e na carga, que exige avaliação prévia de engenheiros.

O engajamento de uma municipalidade na questão dos tetos e fachadas verdes pode ter percursos diferentes de acordo com o local. Lawlor et al. (2006) identificam seis fases de adoção, descritas a seguir, que envolve a *introdução*, o *engajamento* da população, um *plano de ação*, a *pesquisa técnica*, o desenvolvimento de *programas* e finalmente o *aperfeiçoamento*.

Fase 1 – Introdução e conhecimento público: fase *exploratória*, quando a municipalidade estuda os benefícios das coberturas verdes. Pode envolver *workshops* sobre o assunto, enviar participantes para conferências, ou visitar um local onde exista política de incentivo.

Fase 2 – Engajamento da população: busca por métodos criativos de *divulgar* os tetos verdes: reuniões com líderes comunitários, prefeitos, arquitetos, paisagistas, proprietários, e grupos ambientais etc. O comitê identifica oportunidades, ameaças, pontos fortes e pontos fracos para o desenvolvimento de políticas locais.

Fase 3 – Desenvolvimento e implementação do plano de ação: A municipalidade pode estabelecer um *conselho* constituído de líderes comunitários. Um *projeto de demonstração* pode ser executado, com ou sem monitoramento científico, dependendo da necessidade de dados locais. Visitas a edifícios com diferentes tipologias, levando ao estabelecimento de um *banco de dados* ou

inventário. Uma avaliação de opções de políticas e ferramentas pode ser explorada nessa fase, identificando-se programas e oportunidades.

Fase 4 – Pesquisa técnica: Na fase técnica, pesquisam-se e quantificam-se os serviços dos tetos verdes. Preparam-se os dados coletados para apresentação em conferências internacionais, sendo o compartilhamento de dados parte importante do processo. Em alguns casos, inclui de projetos de demonstração em locais de destaque, como a sede da prefeitura de Chicago ou de Toronto.

Fase 5 – Desenvolvimento de programa e políticas: Tradução da pesquisa local em opções de política e ferramentas. Incentivos podem incluir subsídios, isenção de taxas, ou bônus de densidade.

Fase 6 – Melhorias contínuas: maturidade e familiaridade com a tecnologia de coberturas verdes. Avaliação da efetividade dos programas e políticas e decisão se continuará no mesmo caminho ou explorará alternativas.

A cidade de São Paulo parece estar na Fase 2 (engajamento da população), com alguma divulgação, mas carecendo de banco de dados ou projetos piloto, e com pesquisa técnica ainda em estado inicial, o que prejudica a elaboração de leis justas e eficientes.

Apesar de alguns legisladores afirmarem que o objetivo singular de um regulamento ambiental seja a proteção da qualidade do meio ambiente, a problemática decisória a ser encarada por eles é mais complexa, envolvendo conciliações entre diversos objetivos e restrições [...] efetividade, facilidade de implementação, equidade, necessidade de informação; capacidade e custos para fiscalização e aplicação; e clareza ao público¹⁹⁷ (HAHN; STAVINS, 1992, tradução nossa).

Notar que a fase de desenvolvimento de políticas e programas segue *após* a pesquisa técnica, que é fundamental para se chegar o melhor modo de

197 “Although some policymakers would claim that the singular objective of environmental regulation is to protect environmental quality, the decision problem actually faced by policy makers is more complex, involving tradeoffs among multiple objectives and real and frequently binding constraints. [...] Other considerations might include overall effectiveness, ease of implementation, equity, information requirements, monitoring and enforcement capability, political feasibility, and clarity to the general public.” (HAHN; STAVINS, 1992).

incentivar a tecnologia. Longe de ser simples, o desenvolvimento de políticas públicas, conforme descrito neste trabalho, envolve questões técnicas, sociais, econômicas, psicológicas, ecossistêmicas etc. Alguns exemplos de questões concretas que devem ser respondidas incluem:

- *Qual seria o desconto no IPTU para tetos verdes?* Como visto, isso é limitado pela verba disponível, podendo então ser instaurado simultaneamente à atualização da planta de valores, ou à taxas corretivas. Deve-se ter em mente que um terço das propriedades paulistanas já são isentas.
- *Haveria uma diferenciação entre intensivos e extensivos?* Deveria, já que intensivos concentram serviços hídricos e ecológicos; porém, demandam mais da construção, podendo ser adequados (até mesmo obrigatórios) a construções novas. O BFF não faz a diferenciação provavelmente por ser um índice para áreas já consolidadas.
- *É possível desenvolver um índice?* O desenvolvimento de um índice é vital para a unificação e flexibilização de soluções ambientais particulares.
- *Quais seriam outras frentes para o incentivo?* Projetos piloto em edifícios governamentais servem como modelos para a psicologia da imitação de comportamento, além de representarem considerável parcela no consumo energético do país e servirem de testes construtivos e científicos.
- *Como se encaixam na política de águas pluviais?* É importante que haja equivalência de tetos verdes (e outras soluções verdes) em relação às tradicionais piscininhas/índice de permeabilidade. Essa conciliação é facilmente atingida por um índice como o BFF.

Todas essas questões envolvem não só pesquisas de cunho técnico, como também sociológicos (opinião pública), econômicos e fiscais.

Além de legisladores, a falta de conhecimento afeta outros grupos envolvidos, e é uma das grandes barreiras identificadas por Peck et al. (1999, p. 41).

No caso de **profissionais**, eles necessitam de:

- *informações* sobre sementes, plantas, produtos e vendedores;
- *exemplos* de casos para mostrar para clientes em potencial;
- melhor conhecimento em relação a *dados, custo, financiamentos, desempenho* e outros parâmetros técnicos;
- melhor conhecimento sobre *economia de dinheiro* por parte de proprietários, custos em manutenção etc.

Nascimento (2008) elaborou um questionário para profissionais de Curitiba, demonstrando concepções errôneas e díspares sobre a tecnologia. Como exemplo:

[...] os benefícios ambientais proporcionados pelas CVs [coberturas verdes] são negados por 75% dos profissionais, demonstrando falta de conhecimento sobre o alcance das CVs no contexto ambiental (NASCIMENTO, 2008).

A falta de conhecimento por **pesquisadores** é outra barreira. Para Peck et al. (1999), eles necessitam estar atualizados de modo a contribuírem com informações detalhadas quanto à economia de energia, manejo de águas pluviais, serviços em grande escala (como redução dos gases de efeito estufa por mitigar o aquecimento urbano e escoamento superficial) etc.

No Brasil, já há um corpo de pesquisa razoável, mas que necessita de aplicações locais diretas de modo a haver conhecimento específico à realidade econômica, social e ambiental brasileira. Além disso, como já mencionado, representa menos de 2% da pesquisa mundial, dominada por Europa e EUA (66%) (BLANK et al., 2013).

Finalmente, maior conhecimento por parte do **público** em relação a benefícios econômicos e serviços ambientais geraria demanda por políticas públicas. Além dos já explorados no trabalho, também podem ser incluídos

espaço de recreação, produção de alimentos, oportunidades de empregos e benefícios estéticos e psicológicos.

Alguns receios devem ser combatidos, como a ideia que trepadeiras danificam a parede (o que só ocorre quando esta já está em estado precário), a aversão ao “mato”, medo de infiltrações etc. Experiências mal-sucedidas e apressadas podem arruinar a reputação da tecnologia.

As expectativas da população também são importantes. Peck et al. (1999) relata que clientes canadenses esperam resultados imediatos e valorizam a “estética”, enquanto na Europa os clientes são mais pacientes, valorizam o papel ecológico e toleram plantas espontâneas (“*weed*”).

No Brasil, há uma resistência natural quanto à colocação de vegetação em qualquer local, seja arborização urbana, de quintais etc. A noção de “mato” ainda é muito arraigada na mentalidade brasileira, sendo a cultura jardinística pequena em relação a países como Alemanha, Japão e Estados Unidos (LUTZENBERGER, 1985).

Além da falta de conhecimento, Peck et al. (1999) apontam a *falta de incentivos* como outra grande barreira. O desenvolvimento de uma indústria especializada na Alemanha se deve em grande parte a legislação implementada em 1989 obrigando a instalação de coberturas verdes em novos edifícios.

Os maiores apoios governamentais incluem pesquisa, projetos demonstrativos, incentivos mercadológicos como subsídios, e legislação normativa através de índices ou tecnologia.

Para Peck et al. (1999), motivos para a falta de incentivos por parte do governo incluem:

- carência de informação disponível em relação a benefícios das políticas, que justificariam seus custos públicos;
- benefícios são de longo prazo, enquanto custos são imediatos;
- muitos benefícios econômicos não são de natureza pública.

No Brasil, é necessário um reforço nas pesquisas: quanto mais dados quantitativos houver, mais fácil de persuadir legisladores e a população.

Peck et al. (1999) também destacam barreiras financeiras, como a falta de compreensão sobre benefícios, enquanto custos são superestimados. Além disso, a manutenção, além de exigir iniciativa do proprietário, pode ter sua verba cortada do orçamento original.

Finalmente, há barreiras técnicas relacionadas à incerteza e insegurança, por ser uma tecnologia relativamente nova.

A natureza multidisciplinar da tecnologia pode atrapalhar o acesso a fontes específicas de financiamento para pesquisas. A indústria da construção civil é a que menos investe em pesquisa comparada a sua contribuição trabalhista e verba (PECK et al., 1999).

Devido a falta de conhecimento no mercado, projetistas tem que sempre “reinventar a roda”, fazendo suposições quanto a cargas, e compatibilização entre elementos, como plantas e substrato. Isso dificulta o fornecimento de garantias desses produtos, que estão sendo utilizados em funções não previstas.

Outros problemas levantados por Peck et al. (1999) incluem:

- falta de **produtos especializados** no mercado e carência de exemplos construídos cria desconfiança dos clientes em relação ao projetista e à ideia;
- **custo** de produtos especializados, como meio de cultura preparado, pode ser proibitivo;
- apesar de a jardinagem ser um *hobby* popular na América do Norte, jardineiros têm **pouca experiência** com as técnicas especiais para jardins verticais e de cobertura, agravado com falta de sementes e mudas especializadas;

- consultores que projetam coberturas verdes podem não estar presentes após sua construção, causando preocupação entre clientes em relação à **garantia**;
- necessitam de manutenção especial principalmente durante a fase de estabelecimento;
- não há **padronização técnica** da indústria, não havendo assim normas nem garantias;
- desconhecimento em relação a:
 - risco de incêndio;
 - relação com outras edificações (sombreamento, vento, microclima etc.);
 - efeito de tetos verdes (pólen, folhas, terra) sobre instalações mecânicas;
 - efeito de jardins verticais sobre acabamentos;
 - necessidade e custos de manutenção.

Eles concluem que os problemas são típicos de tecnologias novas, e que boa parte das informações europeias relativas a técnica, políticas e mercado podem ser adaptadas à realidade canadense. Dificuldades relativas a custos e benefícios representam maior desafio, sendo difíceis de quantificar e garantir.

A situação brasileira é mais precária. Inexistem padrões técnicos industriais especializados às coberturas verdes. Existe a possibilidade da adaptação do guia da FLL (2002); porém, é uma tarefa trabalhosa que não parece ter prioridade.

Assim, a adoção plena dos tetos verdes exige um corpo de pesquisa técnico, ambiental, social e econômico que explore as potencialidades em nosso clima. Apenas após essa fase que se começa a propor leis e regulamentos que obriguem a sua instalação, com parâmetros guiados pela pesquisa. Em paralelo,

estudos de casos individuais e modelos em edifícios públicos complementam esses dados.

Deve haver consciência da melhor maneira de se elaborar as políticas públicas, de acordo com a situação. O corpo atual é dominado por soluções normativas.¹⁹⁸ Soluções mercadológicas parecem ser mais justas aos olhos dos proprietários, além de serem mais flexíveis; exigem, porém aparato fiscalizatório mais cuidadoso.

O Brasil possui um corpo legal ambiental em fase de desenvolvimento, sendo que os tetos verdes poderiam se encaixar em diversas legislações, em especial da compensação ambiental e das normas de desempenho térmico. Outros aspectos ainda são subdesenvolvidos, como a política de manejo de águas pluviais, que pede uma reforma para que enfatize soluções não estruturais, pulverizadas e de cunho privado. Também carece de atenção o clima urbano, apenas indiretamente resguardado legalmente por meio de políticas de vegetação urbana, mas que poderia ter maior respaldo.

198 Cf. Anexo C - Leis de incentivo a tetos verdes, pág. 325.

Capítulo 11 – Conclusão

Neste trabalho, teve-se a intenção de avaliar de modo generalizado a situação técnica, ambiental, econômica e social de incentivos aos tetos verdes no Brasil, em especial da cidade de São Paulo, comparando-se com alguns exemplos internacionais selecionados.

No quesito ambiental, foi descrito o comportamento hidrológico e térmico das coberturas verdes, que é radicalmente diferente das coberturas convencionais, emulando alguns aspectos do meio não-ocupado, o que justificaria sua adoção como mitigador de diversos problemas ambientais urbanos, em especial de inundações, aquecimento urbano, desconforto térmico interno e externo, e poluição. Tentou-se oferecer uma descrição física aprofundada, que conseguisse elucidar alguns aspectos que costumam ser excessivamente simplificados ou mal representados na literatura não-acadêmica; procurou-se explorá-los de modo mais completo e imparcial, que exigiu pesquisa bibliográfica extensa e conceitual, já que muitos aspectos físicos são vistos em disciplinas de arquitetura apenas de modo aplicado, sendo pouco satisfatória para uma tecnologia nova e inusitada, e outros (e.g. solos e vegetação) fugindo totalmente da grade curricular da formação.

Concluiu-se que muitos serviços são, sim, bem oferecidos por coberturas verdes, mesmo que a explicação do funcionamento seja errônea. Especificamente, devido à natureza porosa do meio de cultura, há uma retenção volumétrica (não superficial) de água pluvial; porém, ela é mais significativa em chuvas fracas, já que seu estoque é relativamente pequeno (especialmente coberturas verdes leves). Juntamente com a arborização urbana, teria um papel secundário na prevenção de inundações, sendo, porém valiosa para assegurar a qualidade da água. Assim, para que haja um resultado mais significativo, deve haver, ou uma adoção em massa, ou uma aplicação em conjunto com outras medidas de retenção (e.g. cisternas); de preferência ambas. Aqui começa a se delinear

um tema comum entre todos os serviços prestados por coberturas verdes, isto é, que ele raramente é suficiente para a resolução de problemas tão graves quanto aqueles trazidos pela urbanização, mas que consegue resolver vários de modo polivalente.

Em relação à questão climatológica, a colocação de coberturas verdes sobre edificações possui um papel combinado de varias estratégias que hoje estão sendo estudadas para redução do aquecimento urbano e do uso de condicionamento artificial. Especificamente, possui a evaporação fornecida por tetos porosos ou alagados (ou o calor latente explorado nos materiais de mudança de fase), assim como a inércia térmica, além da alta reflexão fornecida por tetos brancos ou revestimentos refletoras de NIR. Além disso, há o sombreamento ocasionado pela vegetação, já que a radiação incidente sobre a vegetação é pouco significativa para aquecimento da superfície do meio de cultura em si. Mesmo assim, coberturas verdes costumam ser mais caras que cada uma dessas soluções individuais, devendo ser considerada novamente pelo seu efeito polivalente.

Em relação à poluição, há uma retenção de material particulado, especialmente por deposição, mas a relação com a qualidade da água escoada é ambígua, já que muitas substancias são adicionadas à água pluvial, e não apenas filtrada. Especialmente, o uso de fertilizantes pode contribuir para carregamento de contaminantes.

O aspecto construtivo é importante e muito variado. Tentou-se levantar os pontos principais que poderiam revelar-se problemáticos para a situação brasileira. Em especial, o uso de meios de cultura específicos para tetos verdes ainda é um desafio, já que em muitos estudos brasileiros foi utilizada terra vegetal, pouco adequada por seu peso e compactação. Outro aspecto preocupante é a impermeabilização, que é frequentemente feita fora das normas (que exige um projeto específico), e que falha em testes de estanqueidade, havendo desperdício de material e prolongando a obra. É vital que mão de obra treinada

seja utilizada. Hoje em dia, existem inúmeras opções de impermeabilização para as mais diversas situações, mas carece conhecimento desses fabricantes em relação ao uso com tetos verdes.

A questão econômica é mais complexa, já que o custo varia enormemente com o projeto, sendo o maior empecilho para sua adoção. Buscou-se compreender os fundamentos da análise de custo-benefício, de acordo com o paradigma ambiental atual que é de levar em consideração também os efeitos coletivos (externalidades), e avaliar qual o papel do governo na questão, já que, a princípio, a cobertura das edificações é quase sempre um área particular.

Concluiu-se que por vezes a iniciativa privada não é a mais eficiente para atividades de benefício coletivo, incluindo a adoção de tetos verdes; mesmo os benefícios particulares são de longo prazo, o que dificulta que sejam considerados devido a comportamentos “irracionais”. Assim, o papel do governo (justificado pela eficácia dos serviços ambientais descritos anteriormente) é de incentivar a adoção privada da tecnologia. Para isso, uma pesquisa generalizada sobre o campo da Economia Ambiental foi realizada, identificando-se vários instrumentos utilizados em outras questões, e tentou-se aplicá-los de modo conceitual à questão dos tetos verdes. Soluções “*command-and-control*” são úteis para questões graves, como poluentes críticos, mas abusadas politicamente. Soluções de mercado são preferidas atualmente, e incluem subsídios, taxas e mercado de licenças, todos com extensa e dinâmica literatura. Além disso, estudaram-se também incentivos morais e sociais, com a conclusão que se deve evitar enfatizar a extensão do problema, e, em vez disso, focar no que está sendo feito, com destaque a projetos-piloto.

De acordo com o que foi postulado na base ambiental, os tetos verdes se encaixam em inúmeras políticas ambientais, como poluição aérea, economia de energia, incentivo à biodiversidade, com destaque à política hídrica; deve haver, porém, uma mudança de paradigma mais profunda neste caso, envolvendo outras soluções.

A análise da situação de São Paulo nos leva a uma breve aplicação, buscando quantificar a área de cobertura de diversas tipologias de ocupação na cidade. Conclui-se que as áreas centrais são as mais carentes de vegetação, e que não possuem espaços livres para um plantio convencional. Porém, a colocação em massa de tetos verdes exige cuidado técnico, já que as edificações são antigas.

Assim, conclui-se que os serviços ambientais prestados por tetos verdes são sólidos, mas extremamente complexos, necessitando de maiores pesquisas para determinar as especificidades climáticas de diversas regiões brasileiras.

Por conta desses serviços, há a necessidade da aplicação em massa, que deve ser incentivada pelo governo através de instrumentos de mandatórios, mercadológicos e sociais, já difundidos em outras questões ambientais no exterior e no Brasil. Aqui, porém, se manifestam empecilhos técnicos que demandam que esses incentivos sejam feitos de modo cauteloso, evitando-se acidentes e mantendo a boa imagem da tecnologia.

A tecnologia se mostra uma ferramenta flexível, adequada para uma multitude de questões ambientais, especialmente se associada a outras soluções. A abordagem multifacetada deste trabalho buscou refletir essa polivalência, inclusive em sua adoção em massa, que se beneficia de diversas estratégias e instrumentos.

Referências Bibliográficas

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6120**: Cargas para cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, nov 1980. 5 p.
- ____. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ____. **NBR 9575**: Impermeabilização - Seleção e Projeto. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- ACKERMAN, F. Pricing the Priceless (entrevista). [s.d.]. Disponível em: <<http://www.stayfreemagazine.org/archives/23/priceless.html>>. Acesso em: 1 dez. 2013.
- AGENDA 21 BRASILEIRA: ações prioritárias. Comissão de Políticas de Desenvolvimento Sustentável e da Agenda 21 Nacional. 2. ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2004.
- ALIVE STRUCTURES. Frequently Asked Questions. [s.d.] Disponível em: <http://alivestructures.com/FAQ/greenroof_faq/38>. Acesso em: 1 fev. 2013.
- ALVES, N. C. Impermeabilização, um bem necessário (entrevista). AECweb, [s.d.]. Disponível em: <http://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/impermeabilizacao-um-bem-necessario_2838>. Acesso em: 1 jan. 2014.
- AZEVEDO, T. R.; TARIFA, J. R. O ritmo semanal das atividades humanas eo clima na região metropolitana de São Paulo. Textos do Laboratório de Climatologia e Biogeografia – Departamento de Geografia, Série TA – Texto 008, 2001.
- BECK, D. A; JOHNSON, G. R.; SPOLEK, G. A. Amending greenroof soil with biochar to affect runoff water quantity and quality. In: **Environmental pollution** (Barking, Essex : 1987), v. 159, n. 8-9, p. 2111–8, 2011.
- BECKER, C. W. et al. **The Biotope Area Factor as an Ecological Parameter - Principles for its Determination and Identification of the Target**. Berlim: Landschaft Planen & Bauen, 1990. Disponível em: <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/landschaftsplanung/bff/download/Auszug_BFF_Gutachten_1990_eng.pdf>.

- BERNARDES, J. Poluição em SP é 2,5 vezes maior que limite da OMS. 26 set. 2013. Disponível em: <<http://www.usp.br/agen/?p=154303>>. Acesso em: 1 dez. 2013.
- BERNDTSSON, J. C. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. In: **Ecological Engineering**, v. 36, n. 4, p. 351–360, abr. 2010.
- BLANK, L. et al. Directions in green roof research: A bibliometric study. In: **Building and Environment**, v. 66, p. 23–28, ago. 2013.
- BONAN, G. B. **Ecological Climatology: Concepts and Applications**. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. 678 p.
- BRASIL. **Constituição** (1988). Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Senado, 1988.
- _____. Resolução CONAMA nº 03 – de 28 de junho de 1990. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. Brasília: Diário Oficial da União, 28 jun. 1990.
- _____. Lei Federal nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei no 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm>. Acesso em 1 fev. 2013.
- BRASIL. Ministério das Cidades. **Pacto pelo Saneamento Básico**: mais saúde, qualidade de vida e cidadania. Resolução Recomendada nº 62, de 3 de dezembro de 2008.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Eficiência Energética** : Premissas e Diretrizes Básicas. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2011. 156 p. Disponível em: <<http://www.biblioteca.presidencia.gov.br/publicacoes-oficiais-1/catalogo/conselhos/conselho-nacional-de-politica-energetica/plano-nacional-de-eficiencia-energetica-premissas-e-diretrizes-basicas/view>>. Acesso em: 1 fev. 2013.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Controle de Inundações**. [s.d.].

Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/aguas-urbanas/control-de-inunda%C3%A7%C3%B5es>>. Acesso em: 1 fev. 2013.

BRENNEISEN, S. Space for urban wildlife: Designing green roofs as habitats in Switzerland. In: **Urban Habitats**, v. 4, n. 1, p. 27–36, 2006. Disponível em: <http://www.urbanhabitats.org/v04n01/wildlife_pdf.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2013.

BUENO, A. D. **Transferência de Calor e Umidade em Telhas** : Simulação e Análise Experimental. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1994. 133 p.

BUTTSCHARDT, T. (2001). **Extensive Dachbegrünungen und Naturschutz** (Doctoral dissertation, Institut für Geographie und Geoökologie, Universität Karlsruhe, Germany, 2001). Karlsruher Schriften zur Geographie und Geoökologie, 13. 271 p.

BUGGE, H. C. Capítulo 21 - The polluter pays principle: dilemmas of justice in national and international contexts. In: EBBESSON, J.; OKOWA, P. (Eds.). *Environmental Law and Justice in Context*. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. v. 1, p. 411–428.

BUTLER, C.; BUTLER, E.; ORIAN, C. M. Native plant enthusiasm reaches new heights: Perceptions, evidence, and the future of green roofs. In: **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 11, n. 1, p. 1–10, jan. 2012.

CARTER, T. L.; BUTLER, C. Ecological impacts of replacing traditional roofs with green roofs in two urban areas. In: **Cities and the Environment**, v. 1, n. 2, p. 1–17, 2008.

CASTLETON, H. F. et al. Green roofs, building energy savings and the potential for retrofit. In: **Energy and Buildings**, n. 42, p. 1582–1591, 2010.

CAUCHON, D. Cities slap fees on storm runoff. In: USA Today, 28 mar. 2010. Disponível em: <http://usatoday30.usatoday.com/tech/news/2010-03-28-runoff-fees_N.htm>. Acesso em: 1 fev. 2013.

- CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Transporte Sustentável. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/ar/Emiss%C3%A3o-Ve%C3%ADcular/17-Transporte-Sustent%C3%A1vel>>. Acesso em: 1 fev. 2013.
- CIALDINI, R. B. Crafting normative messages to protect the environment. In: **Current Directions in Psychological Science**, v. 12, n. 4, p. 105–109, ago. 2003.
- COELHO, L. L. **Compensação ambiental**: uma alternativa para viabilização de espaços livres públicos para lazer e convívio na cidade de São Paulo. Dissertação (Mestrado - Área de Concentração: Paisagem e ambiente) - FAUUSP São Paulo: Universidade de São Paulo, 2008.
- COFFMAN, R. R. **Vegetated roof systems**: Design, productivity, retention, habitat, and sustainability in green roof and ecoroof technology. Dissertation presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy in the Graduate School of The Ohio State University. Columbus: The Ohio State University, 2007.
- COMIS, D. Glomalin: Hiding Place for a Third of the World's Stored Soil Carbon. In: **Agricultural Research**, set. 2002.
- COOK-PATTON, S. C.; BAUERLE, T. L. Potential benefits of plant diversity on vegetated roofs: A literature review. In: **Journal of Environmental Management**, v. 106, p. 85–92, set. 2012.
- CORBELLA, Oscar; YANNAS, Simos. **Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos** : conforto ambiental. Rio de Janeiro: Revan, 2003.
- CURRIE, B. A.; BASS, B. **Using Green Roofs to enhance Biodiversity in the City of Toronto** : A Discussion Paper. Toronto: Toronto City Planning, 2010.
- DOMINGUEZ et al. Control climatic en espacios abiertos – El proyecto Expo 92. Grupo de Termotecnia. Depto. De Ingeniería Energética y Mecánica de Fluidos. Sevilla: Universidad de Sevilla, 1992.

- DUARTE, D. H. S. A inclusão de questões relacionadas aos microclimas urbanos nas regulamentações municipais no Brasil. In: **Sinopses**, Especial Tecnologia, São Paulo, FAUUSP, out. 2001, p. 24-34.
- DUNNETT, N. et al. **Small Green Roofs: Low-Tech Options for Greener Living**. 1. ed. Portland: Timber Press, 2011.
- DUNNETT, N.; KINGSBURY, N. **Planting green roofs and living walls**. Portland: Timber Press, 2004. 254 p.
- EARTH PLEDGE. **Green Roofs: Ecological Design and Construction**. Atglen: Schiffer Publishing, 2005. 158 p.
- EUMORFOPOULOU, E.; ARAVANTINOS, D. The contribution of a planted roof to the thermal protection of buildings in Greece. In: **Energy and Buildings**, v. 27, n. 1, p. 29–36, fev. 1998.
- EPA - U.S. Environmental Protection Agency. **Economic Incentives for Pollution Control** : 3.2 Command and Control. Washington, D.C.: Environmental Law Institute, 1997. Disponível em: <<http://yosemite.epa.gov/ee/epa/eed.nsf/fa6512c6e51c4a208525766200639df2/9b6ed59f910a89ea85257746000aff58!OpenDocument>>. Acesso em: 1 dez. 2013.
- ____. Capítulo 2: **Green Landscaping**. In: Greenacres: A Source Book on Natural Landscaping for Public Officials, [2004?]. Disponível em: <<http://www.epa.gov/glnpo/greenacres/toolkit/chap2.html>>. Acesso em: 1 fev. 2013.
- ____. Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies - Green Roofs. [2008?]. 26 p. Disponível em: <<http://www.epa.gov/heatlands/resources/pdf/GreenRoofsCompendium.pdf>>.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). **Balanço Energético Nacional 2010** : Ano base 2009. Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro : EPE, 2010. 276 p.
- FERNANDES, C. Esgotos sanitários: Capítulo I - Sistemas de esgotos. [s.d.]. Disponível em: <http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/ES01_09.html>. Acesso em: 27 nov. 2012.

- FERRAZ, I. L. **O desempenho térmico de um sistema de cobertura verde em comparação ao sistema tradicional de cobertura com telha cerâmica.** Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- FIGUEIREDO, N. A rotulagem ambiental e a competitividade no mercado interno. In: Fórum da Construção. Disponível em: <<http://www.forumdaconstrucao.com.br/conteudo.php?a=23&Cod=750>>. Acesso em: 12 fev. 2014.
- FLL - FORSCHUNGSGESELLSCHAFT LANDSCHAFTSENTWICKLUNG LANDSCHAFTSBAU. **Guidelines for the Planning, Execution and Upkeep of Green-roof sites.** Bonn: FLL, 2002. 97 p.
- FONDATION LE CORBUSIER. Educational guide: The La Roche House. Paris: Fondation Le Corbusier, [200?]. 21 p. Disponível em: <http://www.fondationlecorbusier.fr/CorbuCache/2049_4186.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2013.
- FREITAS, L. Sistema de medição individual em condomínios ajuda a economizar água. Agência de Notícias. UFPE - Universidade Federal de Pernambuco. 12 maio 2012. Disponível em: <http://www.ufpe.br/agencia/index.php?option=com_content&view=article&id=43161:sistema-de-medicao-individual-em-condominios-ajuda-a-economizar-agua&catid=267&Itemid=77>. Acesso em: 1 fev. 2013.
- FRIEDRICH, C. Don't Call It Dirt! In: Greenroofs.com, In the news, jul. 2004. Disponível em: <http://www.greenroofs.com/archives/gf_jul04.htm>. Acesso em: 10 nov. 2013.
- FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de Conforto Térmico** : arquitetura, urbanismo. 5a. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.
- GAFFIN, S. et al. Energy balance modeling applied to a comparison of white and green roof cooling efficiency. In: Third Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference. Anais...2005, p.1-11.

- GATTO, C. M. **Coberturas Verdes**: a importância da estrutura e impermeabilização utilizadas. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído)- Universidade Federal de Juiz de Fora. Programa de Pós-Graduação – PROAC – Mestrado em Ambiente Construído. Faculdade de Engenharia. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2012.
- GEHR, F. Integrating green roofs into regulations and policy. In: Home Tips, tipsdiscover.com. 6 nov. 2013. Disponível em: <<http://home.tipsdiscover.com/integrating-green-roofs-regulations-policy/>>. Acesso em: 10 fev. 2014.
- GETTER, K. L. et al. Carbon sequestration potential of extensive green roofs. In: **Environmental Science & Technology**, v. 43, n. 19, p. 7564–7570, 2009.
- GETTER, K. L.; ROWE, D. B. The Role of Extensive Green Roofs in Sustainable Development. In: **Hortscience**, v. 41, n. 5, p. 1276–1285, 2006.
- GONÇALVES, J. C. S. DUARTE, D. H. S. Arquitetura sustentável: uma integração entre ambiente, projeto e tecnologia em experiências de pesquisa, prática e ensino. In: **Ambiente Construído**, v. 6, n. 4, p. 51–81, 2006.
- GOSS, M. Soil Aeration and Plant Growth. [s.d.]. Disponível em: <http://www.uoguelph.ca/~mgoss/five/410_N06.html>. Acesso em: 10 fev. 2014.
- GREATER LONDON AUTHORITY. **Living Roofs and Walls**: Technical Report: Supporting London Plan Policy. Londres: Greater London Authority, 2008.
- GREEN Roof Guide. [s.d.]. Disponível em: <www.greenroofguide.co.uk>. Acesso em: 1 fev. 2013.
- GREENROOFS.COM. Greenroofs101, [s.d.]. Disponível em: <<http://www.greenroofs.com/Greenroofs101/index.html>>. Acesso em: 1 fev. 2013.
- GRUZEN SAMTON ARCHITECTS. DDC Cool & Green Roofing Manual . Nova York: NYC Department of Design & Construction, 2007.
- HAHN, R.; STAVINS, R. Economic incentives for environmental protection: integrating theory and practice. In: **The American Economic Review**, p. 464–468, 1992.

- HE, J.; HOYANO, A. Experimental study of cooling effects of a passive evaporative cooling wall constructed of porous ceramics with high water soaking-up ability. In: **Building and Environment**, v. 45, n. 2, p. 461–472, fev. 2010.
- HOOVER, R. C. **An evaluation of an extensive green roof maintenance method**. Thesis in Horticulture. College of Agricultural Sciences. The Pennsylvania State University, 2010.
- HUBACEK, K.; KRONENBERG, J. Synthesizing different perspectives on the value of urban ecosystem services. In: **Landscape and Urban Planning**, v. 109, p. 1–6, nov. 2012.
- INSPEÇÃO veicular: é suficiente? 9 jan. 2013. Disponível em: <<http://www.ticketgestao.com.br/portal/ticketgestao/gestao-e-carreira/sustentabilidade/sociedade/inspecao-veicular--e-suficiente-.htm>>. Acesso em: 1 jan. 2014.
- INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia Normalização e Qualidade Industrial. **Orientações gerais para fabricantes e importadores sobre a Regulamentação de produtos no âmbito do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE)**. Rio de Janeiro: INMETRO, [s.d.]. Disponível em: <http://www2.inmetro.gov.br/pbe/pdf/programa_brasileiro_etiquetagem.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2013.
- IPCC. Climate Change—The IPCC Impacts Assessment. Australian Government Publishing Service, Canberra, Australia, 1990.
- JAFFAL, I.; OULDBOUKHITINE, S. E.; BELARBI, R. A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. In: **Renewable Energy**, v. 43, p. 157–164, jul. 2012.
- JOHNSTON, J.; NEWTON, J. **Building Green: A guide to using plants on roofs, walls and pavements**. Londres: Greater London Authority, 2004. 124 p.
- JONES, R. A. **Tecticolous Invertebrates: A preliminary investigation of the invertebrate fauna on green roofs in urban London**. Londres: English Nature, 2002.

- KADAS, G. Rare Invertebrates Colonizing Green Roofs in London. In: **Urban Habitats**, v. 4, n. 1, p. 66–86, 2006.
- KAMIN, B. Ten years of green roofs in Chicago: Mayor Daley's green thumb and iron fist have produced impressive gains, but the movement remains in its infancy. In: Cityscapes, Chicago Tribune, 20 abr. 2010. Disponível em: <<http://featuresblogs.chicagotribune.com/theskyline/2010/04/theres-been-so-much-hype-about-green-roofs-in-chicago-that-i-went-to-the-willis-tower-sky-deck-last-week-expecting-to-see.html>>. Acesso em: 1 fev. 2013.
- KELLY, M. **A comparative analysis of green roof designs including depth of media, drainage layer materials, and pollution control media**. Dissertação - Mestrado. College of Engineering and Computer Science. University of Central Florida, 2008. 360 p.
- KEPPKE, R. S. Repensando as anistias de uso e ocupação do solo em São Paulo. In: **Revista LABVERDE**, n. 6, 2013.
- KINOUCHI, T., Yoshinaka, T., Fukae, N., Kanda, M. Development of cool pavement with dark colored high albedo coating. Fifth Conference for the Urban Environment, Vancouver, Canada, 2004.
- KNOLL, M. A. Z. The Role of Behavioral Economics and Behavioral Decision Making in Americans' Retirement Savings Decisions. In: **Social Security Bulletin**, v. 70, n. 4, 2010.
- KÖHLER, M. et al. Photovoltaic-panels on greened roofs: positive interaction between two elements of sustainable architecture. In: RIO 02 - World Climate & Energy Event. Anais...2002
- KÖHLER, M. Long-Term Vegetation Research on Two Extensive Green Roofs in Berlin. In: **Applied Sciences**, v. 4, n. 1, p. 3–26, 2005.
- KÖLB, W. 1986. New Habitats on the Roof – Possibilities for the Provision of Extensive Verdure. Anthos 1, pp. 4-10

- KOSUTA, S.; HAMEL, C. The fate and mobility of copper from chemical root control barriers in soil and leachate. In: **Environmental Pollution**, v. 110, n. 1, p. 165–170, 2000.
- KOTSIRIS, G. et al. Dynamic U-value estimation and energy simulation for green roofs. In: **Energy and Buildings**, v. 45, p. 240–249, fev. 2012.
- LAWLOR, G. et al. **Green Roofs: A Resource Manual for Municipal Policy Makers**. Ottawa: Canadian Mortgage and Housing Corporation, 2006.
- LEVITT, S. Do This, Get That: Making Sense of Incentives (entrevista). In: Associations Now, 2005. Disponível em: <<https://www.asaecenter.org/Resources/ANowDetail.cfm?ItemNumber=12107>>. Acesso em: 1 fev. 2013.
- LIU, K. K. Y. Green, reflective, and photovoltaic roofs. In: **Construction Canada**, v. 48, n. 5, p. 44–46, 48–50, 52–54, 2006.
- LUNDHOLM, J. T. Green Roofs and Facades: A Habitat Template Approach. In: **Urban Habitats**, v. 4, n. 1, p. 87–101, 2004.
- LUTZENBERGER, J. Vale a pena ter um jardim? In: Ecologia, do jardim ao poder. Porto Alegre: L&PM Editores, 1985. Disponível em: <<http://www.fgaia.org.br/texts/t-jardim.html>>. Acesso em: 1 fev. 2003.
- MALLICK, R. B.; BHOWMICK, S. Rise in Pavement Temperature: Making Buildings Part of the Road Infrastructure, Capturing Energy – Solutions, Possibilities and Challenges. In: Sustain Magazine, n. 29, p. 36–46, 2014.
- MANKIW, N. Principles of Microeconomics. [s.l.] Cengage Learning, 2011. 528 p.
- MARTÍNEZ, A. **Habitar la cubierta**. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 2005. 207 p.
- MAUÁ. Lei Municipal nº 3528 de 29 de outubro de 2002. Dispõe sobre a obrigatoriedade da execução de reservatório para as águas pluviais coletadas em áreas impermeabilizadas superiores a 500 m² para novas edificações e dá outras providências. 2002.

- MEMON, R. A.; LEUNG, D. Y. C.; CHUNHO, L. A review on the generation, determination and mitigation of urban heat island. In: **Journal of environmental sciences (China)**, v. 20, n. 1, p. 120–8, jan. 2008.
- MENGEL, D. B. Fundamentals of Soil Cation Exchange Capacity (CEC). Disponível em: <<http://www.extension.purdue.edu/extmedia/ay/ay-238.html>>. Acesso em: 1 fev. 2013.
- MESTRE, A. P. O consumo de energia elétrica na periferia de São Paulo: uma variável tecnológica da urbanização brasileira. Lima: 13 Encuentro de Geografos de America Latina, 2013. Disponível em: <http://www.egal2013.pe/wp-content/uploads/2013/07/Tra_Ana-Paula-Mestre.pdf>.
- MIELKI, A. C. IPTU verde. In: **Infraestrutura Urbana** . 16. dez. 2011. Disponível em: <<http://infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/16/artigo260567-1.aspx>>. Acesso em: 16 fev. 2014.
- MILLER, C. Design Questions. [s.d.]. Disponível em: <<http://www.roofmeadow.com/contact-us/ask-charlie/design-questions/>>. Acesso em: 1 fev. 2013.
- MOODY, S. S.; SAILOR, D. J. Development and application of a building energy performance metric for green roof systems. In: **Energy and Buildings**, v. 60, p. 262–269, maio 2013.
- MOONEN, P. et al. Urban Physics: Effect of the micro-climate on comfort, health and energy demand. In: **Frontiers of Architectural Research**, v. 1, n. 3, p. 197–228, set. 2012.
- MORAIS, C. S. Comparação entre os desempenhos térmicos de cobertura ajardinada e laje comum em guaritas. In: ENCAC 2003 - VIII Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído e III Conferência Latinoamericana sobre Conforto e Desempenho Térmico de Edificações. Anais... Curitiba, 2003.
- MORAVEC, C. et al. The Living Soil. 2011. Disponível em: <<http://www.ext.colostate.edu/mg/Gardennotes/212.html>>. Acesso em: 16 fev. 2014.

- MORTIMER, R. G. *Physical Chemistry*. 2nd edition. San Diego: Academic Press, 2000. 1116 p.
- MUNBY, B. **Feasibility Study for the Retrofitting of Green Roofs** . CIV405 Final Report. The University of Sheffield Department of Civil and Structural Engineering. Sheffield: 2005. 75 p. Disponível em: <<http://livingroofs.org/images/stories/pdfs/retrofittingofgreenroofs.pdf>>. Acesso em: 1 fev. 2014
- NASCIMENTO, W. C. **Coberturas verdes no contexto da Região Metropolitana de Curitiba**: barreiras e potencialidades. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Programa de Pós-Graduação em Construção Civil - PPGCC - Universidade Federal do Paraná UFPR, Curitiba, 2008.
- NASCIMENTO, W. C. ; FREITAS, M. C. D.; SCHMID, A. Coberturas verdes - a renovação de uma idéia . In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Anais... 2008.
- NATICCHIA, B. et al. Energy performance evaluation of a novel evaporative cooling technique. In: **Energy and Buildings**, v. 42, n. 10, p. 1926–1938, out. 2010.
- NETO, D. P. **Comparativo do Desempenho Térmico do Telhado de Fibrocimento com o de Tetra Pak e o Telhado Verde, em Ambiente Controlado**. Monografia - Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Ambiental. Itajaí (SC): Universidade do Vale do Itajaí, 2009. 56 p.
- NGAN, G. **Green Roof Policies**: Tools for Encouraging Sustainable Design. Ottawa: Landscape Architecture Canada Foundation, 2004. 52 p. Disponível em: < <http://www.coolrooftoolkit.org/wp-content/uploads/2012/04/Green-Roof-Policy-report-Goya-Ngan.pdf>>
- NOPHADRAIN. **Extensive Green roofs**: Design and installation manual. Kerkrade : [20??]a. 25 p. Disponível em: < http://www.nophadrain.nl/EN/groendak_downloads.html>.

- ____. **Intensive green roofs**: Design and installation manual. Kerkrade : [20??]b. 22 p. Disponível em: < http://www.nophadrain.nl/EN/groendak_downloads.html>.
- NOWAK, D. J.; CRANE, D. E.; STEVENS, J. C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. In: **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 4, n. 3-4, p. 115–123, abr. 2006.
- OKE, T. R. *Boundary Layer Climates*. 2. ed. [s.l.] Psychology Press, 1987. 435 p.
- ONO, R. *Legislação edilícia como determinante do espaço edificado*, 2005. Disponível em: <http://www.planoauditoria.com.br/site/download/aut_0520_legislacao_edilicia.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2014.
- OTTELÉ, M.; BOHEMEN, H. D. VAN; FRAAIJ, A. L. A. Quantifying the deposition of particulate matter on climber vegetation on living walls. In: **Ecological Engineering**, v. 36, n. 2, p. 154–162, fev. 2010.
- PASUPATHY, A.; VELRAJ, R. Effect of double layer phase change material in building roof for year round thermal management. In: **Energy and Buildings**, v. 40, n. 3, p. 193–203, jan. 2008.
- PECK, S.; KUHN, M. **Design guidelines for green roofs** . Ontario: Canada Mortgage and Housing Corporation, 2003. 22 p. Disponível em: <<http://www.cmhc-schl.gc.ca/en/inpr/bude/himu/coedar/upload/Design-Guidelines-for-Green-Roofs.pdf>> Acesso em: 1 fev. 2013.
- PECK, S. W.; KUHN, M. E.; CALLAGHAN, C; BASS, B. **Greenbacks from green roofs** : Forging a New Industry in Canada - Status Report on Benefits, Barriers and Opportunities for Green Roof and Vertical Garden Technology Diffusion. Ontario: Canada Mortgage and Housing Corporation, 1999. 78 p. Disponível em: < <http://publications.gc.ca/site/eng/392071/publication.html>>.
- REMOTE Sensing and GIS in Agriculture: Supplement - Vegetation Spectral Signature. [s.d.]. Disponível em: <<http://www.seos-project.eu/modules/agriculture/agriculture-c01-s01.html>>. Acesso em: 1 fev. 2014.

- RUNSHENG, T.; ETZION, Y.; ERELL, E. Experimental studies on a novel roof pond configuration for the cooling of buildings. In: **Renewable Energy**, v. 28, n. 10, p. 1513–1522, ago. 2003.
- SAILOR, D. J. A green roof model for building energy simulation programs. In: **Energy and Buildings**, v. 40, n. 8, p. 1466–1478, jan. 2008.
- SAILOR, D. J.; HUTCHINSON, D.; BOKOVOY, L. Thermal property measurements for ecoroof soils common in the western U.S. In: **Energy and Buildings**, v. 40, n. 7, p. 1246–1251, jan. 2008.
- SANTAMOURIS, M.; KOLOKOTSA, D. Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art. In: **Energy and Buildings**, v. 57, p. 74–94, fev. 2013.
- SANTAMOURIS, M.; MIHALAKAKOU, G.; ASSIMAKOPOULOS, D. N. Use of the ground for heat dissipation. In: **Energy**, v. 19, n. 1, p. 17–25, 1994.
- SANTAMOURIS, M. Energy and climate in the urban built environment. Londres: James & James Ltd. 2001.
- SÃO PAULO (ESTADO). Lei n.º 12.526, de 2 de janeiro de 2007. Estabelece normas para a contenção de enchentes e destinação de águas pluviais, 2007.
- SÃO PAULO (MUNICÍPIO). Lei Orgânica do Município . 1990.
- ____. Atlas Ambiental do Município de São Paulo. 2002a.
- ____. Lei no 13.276, 04 de janeiro de 2002. Torna obrigatória a execução de reservatório para as águas coletadas por coberturas e pavimentos nos lotes, edificados ou não, que tenham área impermeabilizada superior a 500m² (“Lei das Piscininhas”), 2002b.
- ____. Decreto nº 47.145, de 29 de março de 2006 - Regulamenta o Termo de Compromisso Ambiental - TCA, 2006.
- ____. Relatório: ações locais para a biodiversidade da cidade de São Paulo. São Paulo: 2008.

- _____. Portaria nº 44 /SVMA.G/2010 (TCA), 2010.
- _____. Plano Municipal de Estratégias e Ações Locais Pela Biodiversidade - Cidade de São Paulo. 2011.
- SILVA FILHO, D. F. Videografia Aérea Multiespectral em Silvicultura Urbana. In: **Ambiência - Revista do Centro de Ciências Agrárias e Ambientais**, v. 2, Edição especial, p. 55–68, 2006.
- SILVA, L. S. DA. **Evolução dos sistemas de coberturas utilizados no Brasil**. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia Civil com ênfase Ambiental, São Paulo: Universidade Anhembí Morumbi, 2005. 109 p.
- SNODGRASS, E. C.; SNODGRASS, L. L. **Green Roof Plants: A Resource and Planting Guide**. Portland: Timber Press, 2006. 203p.
- SOJKA, R. E.; SCOTT, H. D. Aeration measurement. In: Encyclopedia of Soil Science, p. 27–29, 2002.
- SOMA, L. G. **Estudo do processo de impermeabilização de edifícios residenciais**. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia Civil, São Paulo: Universidade Anhembí Morumbi, 2009. 62 p.
- SOUZA, D. Z. DE. **A variação sazonal na concentração de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos e material particulado MP10 na atmosfera de São Paulo**. Dissertação - Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo: Universidade de São Paulo, 2006. 75 p.
- SPEAK, A F. et al. Metal and nutrient dynamics on an aged intensive green roof. In: Environmental pollution (Barking, Essex : 1987), v. 184C, n. 3, p. 33–43, 6 set. 2013.
- STUDIO SPROUT. Don't Call it Dirt! 2 set. 2008. Disponível em: <<http://sproutcast1.blogspot.com.br/2008/09/don-call-it-dirt.html>>. Acesso em: 1 fev. 2013.

- SYNNEFA, A.; SANTAMOURIS, M.; APOSTOLAKIS, K. On the development, optical properties and thermal performance of cool colored coatings for the urban environment. In: **Solar Energy**, v. 81, n. 4, p. 488–497, abr. 2007.
- TARIFA, J. R.; ARMANI, G. Atlas Ambiental do Município de São Paulo: FASE I: Diagnósticos e Bases para a Definição de Políticas Públicas para as áreas verdes no Município de São Paulo. Unidades Climáticas Urbanas da Cidade de São Paulo. 2000.
- THREE albino plants of *Cephalanthera damasonium*. In: Albiflora Blog, 18 jun. 2012. Disponível em: <<http://www.albiflora.eu/blog/?p=379>>. Acesso em: 4 fev. 2014.
- TORRES, S. L. S. **Investigating crumb rubber amendments for extensive green roof substrates**. Thesis (Masters in Science). Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, College Park: University of Maryland, 2010. 136 p.
- VAN HOOFF, J.; VAN DIJKEN, F. The historical turf farms of Iceland: Architecture, building technology and the indoor environment. In: **Building and Environment**, v. 43, n. 6, p. 1023–1030, jun. 2008.
- VECCHIA, F. Avaliação do comportamento térmico de coberturas verdes leves (CLV) aplicadas aos climas tropicais. p. 1–5, 1997.
- VELAZQUEZ, L. S. Organic greenroof architecture: Sustainable design for the new millennium. In: **Environmental Quality Management**, v. 14, n. 4, p. 73–85, jan. 2005.
- VINCE, Ö.; ZOLTÁN, M. Plant Physiology. 2011. Disponível em: <http://www.tankonyvtar.hu/en/tartalom/tamop425/0010_1A_Book_angol_01_novenyelettan/ch02.html>.
- WANPHEN, S.; NAGANO, K. Experimental study of the performance of porous materials to moderate the roof surface temperature by its evaporative cooling effect. In: **Building and Environment**, v. 44, n. 2, p. 338–351, fev. 2009.

- WARK, C. Cooler Than Cool Roofs: How Heat Doesn't Move Through a Green Roof, 2011. Disponível em: < <http://www.greenroofs.com/pdfs/EnergyEditor-GreenRoofEnergySeries2011.pdf>> Acesso em: 1 fev. 2013.
- WERTHMANN, C. Water and Green Roofs in Dry Climates: A Speculation. In: Expo Zaragoza. Anais...2008. Disponível em: < http://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/cajaAzul/24S6-P3-Christian_WerthmannACC.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2013.
- WINGFIELD, A. The Filter, Drain, and Water Holding Components of Green Roof Design . 2005. Greenroofs.com, In the news. Disponível em: <http://www.greenroofs.com/archives/gf_mar05.htm>. Acesso em: 23 fev. 2014.
- XIAO, Q.; MCPHERSON, E. Rainfall interception by Sacramento's urban forest. In: **Journal of Arboriculture**, v. 24, n. 4, p. 235–244, 1998.

Apêndice A - Impermeabilizações

Membranas asfálticas (moldadas *in loco*):

- a quente: asfalto oxidado fundido
- a frio: emulsão asfáltica, utilizado para e.g., baldrames e blocos de fundação, demandando cinco a sete demãos;
- solução asfáltica modificada com polímeros, aplicada geralmente a frio, necessitando três ou quatro demãos intercaladas com estruturantes.

Membranas poliméricas (moldadas *in loco*):

- elastoméricas (e.g. neoprene ou hypalon), aplicadas com desempenadeira de metal ou esfregão, com feltro asfáltico para resistência mecânica;
- acrílicas (emulsões estruturadas por telas de poliéster ou poliamida), aplicadas de modo semelhante às membranas asfálticas; pode ter adição de cimento, sendo nesse caso chamados de membrana acrílica impermeável (MAI) e, sendo semiflexíveis, são adequados a banheiros por aceitarem revestimentos cerâmicos diretamente sobre eles.
- manta PP, por serem compostas de um sanduíche de asfalto sobre fibra recoberto em ambos os lados por polietileno; necessitam de primer de emulsão asfáltica a frio sobre a regularização. Sua soldagem é a maçarico, desenrolando a manta, e deve subir 30 a 40 cm nos planos verticais;
- manta AA, igual à anterior, mas recoberta em ambos os lados por areia; necessita de *primer* e a emenda é feita com asfalto fundido a quente.

Mantas poliméricas (pré-fabricadas) têm enorme variedade:

- elastoméricas, o tipo mais utilizado sendo EPDM (monômero de etileno-propileno-dieno), uma borracha extremamente deformável (até 400% sem romper). O berço é feito de placas de poliuretano, e o *primer* constitui emulsão asfáltica com borracha. Ralos e encaixes têm peças pré-moldadas que facilitam a instalação. Elas são mais caras que mantas asfálticas, porém são mais duráveis.
- plásticas;
- o tipo mais utilizado é PVC (*poly(vinyl chloride)*), ou policloreto de polivinila), podendo ser aderidas ou não, com emendas por termofusão. Sua vida útil é o dobro da asfáltica, tendo alto desempenho, flexibilidade e resistência química e ao ultravioleta.
- Outro tipo de manta plástica é PEAD, que lembram lonas, adequadas a lagoas, aterros, canais, reservatórios etc.

Há também as impermeabilizações rígidas, com produtos misturados a argamassa, próprias para funções pouco deformáveis (e.g. pouca variação térmica), como banheiros ou reservatórios de água subterrâneos; normalmente são constituídos de aditivos colocados na argamassa, e não necessitam de outras camadas (i.e., dispensam regularização, proteção térmica ou mecânica). Não são adequadas para tetos verdes.

Apêndice B - Conceito do cálculo da carga de sistemas de tetos verdes

Aqui será apresentado o raciocínio que guia cálculo de carga de sistemas de tetos verdes.¹⁹⁹

Diferente de um material construtivo tradicional, que possui apenas um *peso específico* (D) (peso por volume, ou “densidade”), a densidade dos solos varia enormemente, dependendo de composição química, granulometria, compactação e especialmente umidade.

A *densidade de partículas* (D_p) é o peso específico da fase sólida (i.e. rocha-mãe), como se o solo tivesse uma porosidade de 0%. Em se tratando de solos naturais, um valor típico é de $2,65 \text{ g cm}^{-3}$, que é o peso específico do quartzo; há baixa variação desse valor para a maioria dos solos minerais naturais (BONAN, 2002). Porém, em um substrato preparado, utilizam-se materiais leves, como pedra-pomes, argila expandida (cinasita) etc., o que leva a uma densidade das partículas mais baixa. Matéria orgânica abundante também pode baixar esse valor.

Em curto prazo, o componente mais variável em um solo é a água. A *densidade aparente*²⁰⁰ (D_a) é medida, portanto, eliminando-se o componente aquoso, mas mantendo a porosidade original — ou seja, peso seco total do solo dividido pelo seu volume total. Valores típicos vão de $1,0$ a $1,6 \text{ g cm}^{-3}$. Um solo compactado tem maior densidade aparente que um solo não compactado de mesma composição — a densidade aparente aumenta com a profundidade do solo, já que o solo se compacta com a carga sobre ele.

$$D_a = D_p (1 - v) \quad (5)$$

¹⁹⁹ Cf. NBR 6120 Cargas para o cálculo de estruturas de edificações

²⁰⁰ *bulk density*, densidade bruta ou densidade do solo

Finalmente, a densidade utilizada no cálculo de carga leva em consideração o peso “saturado” da cobertura.

$$D_s = D_p (1 - v) + D_w \times v \quad (6)$$

Sendo:

- D_w = densidade da água (1 g/cm³ ou 1000 kg/m³)

O *peso saturado* (P_s) é aquele utilizado no cálculo de carga de tetos verdes. Este peso pode ser medido diretamente²⁰¹ ou pode ser calculado de acordo com a quantidade de poros. A carga total do substrato de uma cobertura verde deve ser calculada com uma saturação máxima, ou seja, com todos os poros preenchidos de água, situação que pode ocorrer eventualmente durante uma precipitação. Assim, a carga do substrato é:

$$P_s = [D_a + (v \times D_w)] \times e \quad (7)$$

Por exemplo, um substrato com espessura $e = 20$ cm e índice de vazios $v = 50\%$, com densidade das partículas $D_p = 2$ g cm⁻³ (2 000 kg m⁻³) seria de (convertido para metros):

$$P_s = [2000 \times (1 - 0,5) + 1 \times 500] \times 0,2$$

$$P_s = (1000 + 500) \times 0,2$$

$$P_s = 300 \text{ kg/m}^2$$

A carga total da cobertura verde (parcela sobre a laje) é:

²⁰¹ É importante enfatizar, porém, que o peso saturado supõe um completo preenchimento dos poros por água, que pode ser difícil de realizar empiricamente.

$$P_c = P_v + P_s + P_o \quad (8)$$

Sendo:

- P_c = carga cobertura
- P_v = carga vegetação
- P_s = carga solo
- P_o = carga outros componentes

A carga calculada para a laje é:

$$P_L = (P_c + P_a) \times i \quad (9)$$

Sendo:

- P_L = carga calculada para laje
- P_a = carga accidental
- i = índice de segurança

Apêndice C - Capacidade de troca de cátions (CTC)

Uma das principais características de um solo quanto à adequação como meio de cultura é sua *capacidade de troca de cátions* (CTC). Solos são formados por partículas em geral com carga negativa, que adsorvem (i.e. aderem à superfície) certos cátions (íons positivos), como os nutrientes *cálcio* (Ca^{++}), *magnésio* (Mg^{+}) e *potássio* (K^{+}) (formadores de base), e outros não nutrientes, como *hidrogênio* (H^{+}) e *alumínio* (Al^{+++}) (ambos cátions formadores de ácidos), como também *sódio* (Na^{+}) (básico). A CTC é, portanto o número de “vagas” negativas disponíveis no solo, medido em moles de hidrogênio equivalente por massa (meq/100 g).

A adsorção faz com que esses cátions fiquem fortemente presos, mesmo na presença de água. Para absorver os nutrientes positivos, as raízes liberam gás carbônico (fruto) de sua respiração, que reage com a água, formando ácido carbônico e consequentemente cátions de hidrogênio (H^{+}). Os cátions de hidrogênio são trocados com os cátions nutritivos do solo e assim os liberam, permitindo que estes sejam absorvidos pelas raízes.

Conhecer a capacidade de troca de cátions permite que solos sejam adubados de modo adequado, evitando, por exemplo, o carreamento excessivo de nutrientes pela água (*leaching*). A CTC também é importante para evitar a acidificação excessiva do solo (excesso de H^{+}) e manter suas características ideais de agregação e drenagem (e.g. excesso de magnésio torna o solo compactado e pouco drenante; solos ideais são predominados por cálcio).

Em geral, a CTC é potencializada por algumas argilas, matéria orgânica (especialmente húmus, colóide orgânico altamente processado), e a maioria dos agregados comuns aos tetos verdes, como vermiculita. Por outro lado, areia tem CTC baixa, dependendo da matéria orgânica para ser viável como meio de cultura.

Material	CTC (meq/100 g)
areias claras	3–5
areias escuras	10–20
lodos e lodos siltosos claros	10–20
lodos e lodos siltosos escuros	15–25
lodos argilosos siltosos e argilas siltosas escuras	30–40
solos orgânicos	50–100
vermiculita	100–150

Tabela 10: Valores de CTC para diversos materiais

Fonte: Mengel (s.d.), tradução nossa

Apêndice D - Irracionalidades

I INFORMAÇÃO

a) **Aversão à ambiguidade** (*ambiguity aversion*)

- tendência a evitar tomar decisões quando parte da informação relevante é desconhecida ou pouco clara. No caso dos tetos verdes, pode haver um desconhecimento ou insegurança quanto a riscos, benefícios ou custos, especialmente se for um assunto sobre o qual o agente se sinta incompetente, ou quando há sobrecarga de informação que pode paralisar a tomada de decisão. Assim, *o agente tenderá a escolher uma opção já conhecida e segura, como um telhado cerâmico*, mesmo que ele esteja consciente da economia que o teto verde trará, seja por falta ou “excesso” de conhecimento.²⁰²
 - “Não sei ao certo do que se trata esses tetos verdes. Acho que não vou colocar um.”

b) **Depoimentos informais** (*anedotal evidence*)

- há uma tendência a confiar em relatos de amigos em vez de profissionais (ou em narrativas pessoais em vez de estatísticas), que ocorre com frequência na escolha de tratamentos na Medicina. Por exemplo, o paciente tenderá a escolher um tratamento que um amigo já fez, mesmo indo contra o aconselhamento do médico. Do mesmo modo, o depoimento (negativo ou positivo) de pessoas que já têm um teto verde pode pesar mais que a indicação de profissionais (arquitetos, engenheiros, paisagistas etc.).²⁰³

202 Deve haver cuidado na hora de divulgar o assunto de modo a não “assustar” o público-alvo com informação excessiva.

203 o efeito é agravado quando o agente nem mesmo tem condições financeiras para contratá-los.

- “Meu amigo colocou uma cobertura verde e disse ser muito boa. Talvez o arquiteto esteja certo e eu deva colocar uma também.”

II TENDÊNCIAS

c) **Tendência para o status quo** (*status quo bias*)

- o agente tenderá a optar pela situação existente, e rejeitará mudanças. A reforma para uma cobertura verde implica na mudança do *status quo*, que torna-a mais difícil de ser escolhida. É mais fácil escolher não mudar que escolher mudar.
- “Minha cobertura funciona. Não vou mudar.”

d) **Efeitos da predefinição** (*default effects*)

- se uma opção for predefinida, ela será escolhida de modo desproporcional. Por exemplo, o número de doadores de órgãos é menor quando o sistema é de opção de inclusão (*opt in*) do que opção de exclusão (*opt out*). Ou seja, os indivíduos tenderão a manter a opção padrão, seja de doador ou não doador, por mais que, racionalmente, sua liberdade de escolha seja equivalente. Isso pode ser explorado com os tetos verdes, por exemplo, no caso da venda de residências em que a opção predefinida é a casa com teto verde, e o comprador pode optar por não ter tetos verdes se desejar.
- “O normal é ter teto verde? Pode ser, então.”

Ambos os efeitos do padrão quanto a tendência para o *status quo* constituem o “poder da inércia”.

e) **Heurística da disponibilidade** (*availability heuristic*)

- mesmo o contato incidental com informações influencia as decisões do agente. Por exemplo, caso saia nos noticiários que um teto verde desabou, isso influenciará a população de modo proporcio-

nal ao quanto isso foi divulgado, fazendo-os crer que “a probabilidade de um resultado negativo seja muito maior do que realmente é.” (KNOLL, 2010, tradução nossa).²⁰⁴

- *“É perigoso colocar um jardim sobre laje, eu vi no jornal que um desabou outro dia.”*

f) Efeito da validação (*validity effect*)

- a simples repetição de uma ideia (e.g. no noticiário) fará com que ela pareça mais válida. Isso pode ser aproveitado positivamente na divulgação dos tetos verdes, servindo para desarmar o ceticismo simplesmente por repetição.
 - *“Estão sempre falando do teto verde; talvez seja uma boa.”*

III EFEITOS INTERTEMPORAIS

- longe de manterem as mesmas prioridades ao longo do tempo, os agentes as alteram constantemente, em um conflito interno entre o “planejador clarividente” (*farsighted planner*) e o “agente míope” (*myopic doer*). Isso é fácil de ser visto em dietas, quando a falta de *auto-controle* significa que a recompensa distante (perda de peso) é menos importante que a recompensa próxima (refeição tentadora). Como a maioria dos benefícios dos tetos verdes são de longo prazo, isso pode ser problemático. Uma solução é “seduzir” o agente míope com prêmios imediatos e tangíveis,²⁰⁵ e evitar a dependência excessiva na retórica dos benefícios distantes.
 - *“Não tenho dinheiro para por um teto verde hoje, e ele só vai valer a pena daqui a dez anos. Ano que vem eu considero de novo.”*

²⁰⁴ “the probability of a negative outcome is far greater than it actually is” (KNOLL, 2010).

²⁰⁵ Knoll (2010) relata o sucesso de prêmios e rifas para aqueles que depositam o dinheiro da aposentadoria.

IV DEPENDÊNCIA DA REFERÊNCIA

g) **Aversão à perda** (*loss aversion*)

- *perder* lesa (psicologicamente) em dobro comparado a *deixar de ganhar*. No caso de políticas ambientais, a ameaça de perder algo (e.g. um benefício) que o agente *creia ter possuído* influenciará mais pesadamente em suas decisões. Como estratégia, pode ser mais persuasivo fornecer algo e depois ameaçar retirá-lo, que simplesmente promovê-lo.
 - “Acho que colocarei uma cobertura verde para não perder esse bônus ambiental que deram esse ano.”

h) **Escalonamento de escolhas** (*choice bracketing*)

- Tomar todo dia um café de 4 reais é um escalonamento *estreito* — apenas uma ação está afetando a decisão. Caso se perceba que o efeito cumulativo pode chegar a mais de mil reais por ano, há um escalonamento *amplo*, com impacto maior. Portanto, vendedores enfatizam o custo diário ou mensal de um produto (“apenas 24 parcelas de 30 reais por mês”), em vez do valor total (R\$ 720!). No caso dos tetos verdes, enfatizar a *economia de modo amplo* (“economia de R\$ 2 000 reais em 5 anos...”) e os *custos, de modo estreito* (“...gastando-se apenas R\$ 3 reais por dia”), ajudam a incentivar a tecnologia. Do mesmo modo, financiamentos para a construção podem ajudar a aliviar o impacto dos gastos iniciais (e.g. em vez de custar R\$ 100 por metro quadrado, custaria R\$ 10 por metro quadrado financiados durante um ano; mesmo racionalmente sendo mais caro (R\$ 120), é mais convincente).

i) Escolha de palavras

- Mesmo a escolha de palavras tem forte influência — um “bônus” será gasto mais facilmente que uma “restituição” (inglês “*rebate*”), que tenderá a ser poupada. Para os tetos verdes, talvez apresentar sua instalação como “equivalente a um ar condicionado” convença algumas pessoas, por exemplo.

Portanto, não há modo “neutro” de apresentar informações na arquitetura de decisões (“*choice architecture*”); toda encarnação possível afetará os resultados de algum modo; “tudo importa”.²⁰⁶

206 *everything matters*

Apêndice E - O clima da Região Metropolitana de São Paulo

Tão importante como o aquecimento urbano é a compreensão dos diversos meso- e microclimas presentes na RMSP. A posição como metrópole subtropical cercada de florestas, com bairros pobres de ocupação desordenada, fogem do modelo americano de centro-adensado–subúrbio-arborizado.

Tarifa e Armani (2000) descrevem como a localização geográfica da cidade afeta seu clima:

A Metrópole Paulistana está localizada a uma latitude aproximada de 23°21' e longitude de 46°44', junto ao trópico de Capricórnio, e implica em uma realidade climática de transição, entre os Climas Tropicais Úmidos de Altitude, com período seco definido, e aqueles subtropicais, permanentemente úmidos do Brasil meridional (TARIFA, ARMANI, 2000).

O clima local se caracteriza por duas estações bem definidas: de outubro a março, quente e chuvosa; de abril a setembro, fria e mais seca, “ao lado das variações bruscas do ritmo e da sucessão dos tipos de tempo. Pode-se ter situações meteorológicas (estados atmosféricos) de intensos aquecimentos bem como de intensos resfriamentos em segmentos temporais de curta duração (dias a semanas)” (TARIFA, ARMANI, 2000).

Topograficamente, a cidade se encontra em terras altas, entre 720 e 850 metros de altitude, o chamado Planalto Atlântico, a uma média de 45 km de distância do oceano, com feições locais variadas, como “planícies aluviais (várzeas), colinas, morros e serras e maciços com as mais variadas orientações”.

Tarifa e Armani (2000) separam as determinantes climáticas como naturais e antrópicas, desenvolvendo unidades climáticas baseadas em topografia e orientação para as naturais, e tipologias de ocupação para as antrópicas.

Unidades Climáticas Naturais

Os controles climáticos para as unidades naturais “foram o Oceano Atlântico, a altitude e o relevo, com suas diferentes formas e orientações”, chegando-se a cinco unidades:

I Clima Tropical Úmido de Altitude do Planalto Atlântico: onde iniciou-se a colonização de São Paulo, subdividido em:

(IA): “os topos mais elevados dos maciços, serras e altas colinas”, com “temperaturas são relativamente amenas pelo próprio efeito da altitude”, mas com maior índice pluviométrico devido à instabilidade causada pela topografia, o que agrava desmoronamentos. Há também maior ventilação, que ajuda na dispersão de poluentes.

(IB): as colinas intermediárias, morros baixos, terraços e patamares; são um pouco mais aquecidas, mas mantém as características pluviométricas da unidade IA.

(IC): as várzeas e baixos terraços, que “condiciona temperaturas relativamente elevadas, justamente por se tratarem de áreas mais baixas e planas”. Ao mesmo tempo, as temperaturas noturnas também são as mais baixas, devido ao acúmulo do ar frio nas partes inferiores. Pluviometricamente, recebem menos precipitação, porém são áreas receptoras da drenagem das outras unidades.

Outro grande problema destas unidades de várzeas (IC) é a elevada estabilidade atmosférica noturna e matinal. Por se tratarem de áreas rebaixadas e envolvidas por colinas, morros e serras há uma tendência de predomínio de calmaria e ventos muito fracos, possibilitando a ocorrência de inversões térmicas junto ao solo nos dias de sistemas atmosféricos estáveis. Durante o período noturno, o ar frio é drenado das áreas mais elevadas ao redor e acumulado nas áreas mais baixas dos fundos de vale (várzeas e terraços) formando ou intensificando as inversões térmicas (TARIFA, ARMANI, 2000).

Esse fator dificulta a dispersão de poluentes, agravado pelos eixos de transporte aí localizados.

II Clima Tropical Úmido Serrano da Cantareira – Jaraguá: Nesta unidade, “as altitudes variam de 800 a 1200 metros, o que indica uma condição térmica mais amena”, porém com maiores índices pluviométricos não só pela altitude, como também pela orientação leste-oeste do maciço, “praticamente perpendicular aos principais fluxos atmosféricos produtores de chuva”.

III Clima Tropical Úmido de Altitude do Alto Juquerí: “abrange uma área relativamente elevada, cujas altitudes variam entre 740 a 800 metros”, e compartilha características como alto índice pluviométrico e boa dispersão de poluentes com as outras unidades altas.

IV Clima Tropical Sub-oceânico Superúmido do Reverso do Planalto Atlântico: próximo ao oceano, sofre grande influência deste “a instabilidade e a proximidade com o oceano confere a esta unidade uma característica marcante: os nevoeiros e baixos estratos são muito frequentes”. A unidade também possui alto índice pluviométrico: “qualquer ocupação que se aventure por este clima local deverá ser adaptada a esse grande volume de água que precipita nestas áreas, podendo gerar movimentos de massa, deslizamentos e desmoronamentos.”

Clima Tropical Oceânico Super-úmido da fachada Oriental do Planalto Atlântico (V): também próximo ao oceano, tem características similares à unidade anterior.

Estes altos valores de precipitação, aliados às altas declividades da Serra do Mar necessitam de especial atenção quanto a qualquer tipo de uso que se faça destas áreas, porque elas têm um enorme potencial para ocorrência de movimentos de massa, deslizamentos e desmoronamentos, mesmo com a cobertura vegetal natural (Mata Atlântica) (TARIFA; ARMANI, 2000).

Mapa 13 Unidades climáticas naturais.

Nota-se a clara diferenciação entre colinas (IA, amarelo) e várzeas (IC, vermelho) na área central (I).

Fonte: Atlas Ambiental de São Paulo

Unidades Climáticas Urbanas

O uso do solo determina Unidades Climáticas Urbanas, entre as quais destacam-se:

I - Unidade Climática Urbana Central

Abrigando “o sistema de colinas e o espigão central, ocupado pelos principais corredores de trânsito, interligando os bairros verdes e os centros do poder econômico, industrial, comercial e de serviços da metrópole, concentrados nos canyons urbanos da Paulista e Faria Lima.”

Mapa 14 Unidade Climática Urbana Central (I)

IA - Núcleo

Mapa 15 Unidade Climática Urbana IA - Núcleo

Abrange “o centro histórico, a verticalização densa e contínua que se estende para a Zona Sul, passando pela Liberdade, Vila Mariana, até as proximidades com o Parque do Estado”, e caracterizado por “alta densidade de edificações, pessoas, veículos e atividades”, e recebendo poluentes também do ABCD.

Há ainda subdivisões mais detalhadas:

sub-unidade IA1 - áreas verticalizadas do centro. Tarifa e Armani (2000) comentam sobre o aquecimento urbano:

A clássica idéia de que as áreas centrais (Downtown ou City Center) das grandes cidades e metrópoles são ilhas de calor talvez necessitem de algumas reformulações conceituais. A verticalização na zona do “núcleo central” da metrópole

paulistana parece exercer um **efeito de atenuar a temperatura**, pois são áreas fortemente sombreadas com outras de forte absorção e reflexão da luz solar. No seu conjunto ou totalidade maior, e no horário (10:00 horas aproximadamente em que as imagens de satélites foram tomadas) as áreas verticalizadas parecem se aquecer 1 a 2 graus a menos do que outras áreas planas e de uso residencial baixo e com a mesma proporção de vegetação (TARIFA; ARMANI, 2000, grifo nosso).

Porém, a avaliação se mostra complexa:

A distância entre os blocos, a altura de cada edifício (rugosidade da superfície topológica), bem como a combinação com áreas verdes e diferentes altitudes possibilitam enormes diferenças de aquecimento e na emissividade térmica destas unidades (TARIFA; ARMANI, 2000).

sub-unidade IA2 (verde abacate)- bairros verdes:

(Pacaembú, Alto da Lapa, Pinheiros, Jardins e Brooklin) se constituem em unidades topoclimáticas com relativa homogeneidade no processo de transformação da energia solar, bem como na proteção exercida pelo verde nos ambientes microclimáticos [...] mantém uma relativa homogeneidade advinda de lotes grandes com amplas áreas verdes, tanto nos quintais como nas ruas arborizadas. Sua forma é percebida, tanto no real, quanto na representação esquemática do campo térmico pelo satélite, onde geralmente indicam superfícies 3 a 4 °C menos aquecidas que os bairros pobres das favelas e autoconstruções quase sem áreas verdes da Zona Leste por exemplo (TARIFA; ARMANI, 2000).

sub-unidade IA3 (roxo, centro)- A área comercial e industrial da Lapa, que “aparece nas imagens infravermelho como um espaço urbano 2 a 3 °C mais aquecido que o seu entorno”.

sub-unidade IA4 (vermelho, centro)- unidade climática intermediária: entre os bairros verdes e os áridos, “bairro residencial baixo, com pequena porcentagem de área verde”.

sub-unidade IA5 (magenta, centro)- área urbana do Aeroporto, que “apesar da existência de gramados e alguns jardins, a forte pavimentação e

densidade de pavilhões e prédios com cobertura escura forneceu, tanto em setembro como em abril, valores térmicos de superfície entre 30 e 32 °C”.

As outras áreas vão além das mais centrais, e as mais importantes serão descritas de modo breve.

O conjunto das áreas urbanas que envolvem o núcleo da Unidade Climática Central apresentam algumas semelhanças e diferenças em relação à área central. A principal diferença pode ser traduzida na densidade e intensidade da urbanização, mesmo que dentro de cada uma destas sub-unidades possam existir núcleos tão adensados quanto a área central; no geral passa-se para um padrão de menor intensidade. Um dos fatos que evidencia esta diminuição de intensidade é a verticalização. Ela passa a seguir um padrão mais fragmentado e com dimensões espaciais muito menores que aquelas existentes no ‘núcleo central’. No entanto, fica claro que os mesmos tipos de problemas topo e micro climáticos existentes se repetem também nestas unidades. Um dos fenômenos que deve ser da mesma magnitude e intensidade é aquele referente à poluição do ar. As poucas estações telemétricas da rede de monitoramento (Tatuapé, Cambuci, Penha, Lapa) não permitem uma análise espacial do problema, no entanto seus dados de material particulado e ozônio (medido somente na Mooca) mostram gravidade semelhante àquela do ‘núcleo central’ (TARIFA; ARMANI, 2000).

IB - Marginais

Mapa 16 Unidade Climática Urbana IB - Marginais

Unidade IB1 - Tamanduateí: Antigos galpões que demonstram alto aquecimento.

As velhas fábricas do Brás, Belém, Bom Retiro e o eixo antigo da ligação com Santos através da Av. do Estado até hoje ainda se constituem em uma unidade urbana e obviamente, também, climatológica. As imagens de satélite dão a esta realidade um forte aquecimento, resultado do vale plano, rebaixado e com telhados e superfícies (das avenidas, radiais, ferrovias) que absorvem muito a radiação solar. Grande parte desta confluência, Tamanduateí-Tietê, indica temperaturas superiores a 32°C às 10:00 horas da manhã [...] nas margens das grandes avenidas e corredores e nos centros antigos degradados são comuns cortiços e favelas (TARIFA; ARMANI, 2000).

Unidade IB2 - Várzeas do Tietê, incluindo a marginal, mais aquecida e poluída.

As várzeas do Tietê que se estendem até os limites com a Vila Maria, Guarulhos e o Parque Ecológico do Tietê evidencia hoje uma unidade climática marcada pelas pontes, viadutos e circulação. Contém os terminais rodoviários do Tietê, da Barra Funda, o Campo de Marte, o Parque Anhembi, a Lapa de Baixo (ligada à ferrovia e à indústria) fechando um anel até a vila Leopoldina, Jaguaré e o Ceasa. Esta descrição pouco dá conta de quantos fluxos e movimentos circundam neste território. Este movimento deixa um alto custo, e uma parte está associada à degradação ambiental através da progressiva perda da qualidade do ar. O campo térmico da superfície do solo mostra ser também uma área das mais aquecidas da metrópole, variando entre 29 a 32°C (TARIFA; ARMANI, 2000).

Unidade IB3 - Marginal Pinheiros, clima mais ameno devido ao verde:

[...] as maiores diferenças entre as unidades anteriores (Tietê e Tamanduateí) está ligado à ocupação e uso do solo do seu entorno próximo. São áreas predominantemente comerciais e residenciais de médio e alto padrão com porcentagem média a alta de áreas verdes, incluindo aí, neste entorno próximo, o Campus da USP. Este fato faz com que, à exceção da área industrial de Santo Amaro (Unidade IB4), esta área fique inserida num meio que absorve menos a radiação solar.” “o enorme fluxo pesado de veículos, transforma a Marginal Pinheiros em um ambiente topoclimático muito semelhante aquele da Marginal Tietê e do vale do Tamanduateí. Além deste fato, deve receber volumes consideráveis da poluição do ar emitida em Santo Amaro, pelas indústrias e veículos (TARIFA; ARMANI, 2000).

unidade IB4 - Zona Industrial de Santo Amaro: “aparece nitidamente como uma área urbana fortemente aquecida pela radiação solar.”

IC – Caminho do Mar

Mapa 17 Unidade Climática Urbana IC - Caminho do Mar

Caracterizada pelo uso residencial baixo:

Unidade Climática IC1 ligação da Vergueiro com a Anchieta (antigo Caminho do Mar) passando por parte do Jabaquara, Saúde, Ipiranga até os limites com o Parque do Estado e São Caetano do Sul predomínio do residencial baixo (aqui considerado como casas ou edificações de 1 a 2 andares de classe média ou média baixa geralmente com cobertura de telhas de cerâmica de cor avermelhada) [...] O uso residencial baixo (Unidade IC1) indica uma variação entre 29 a 32°C, dependendo de cada condição específica da superfície, ligadas principalmente à densidade e altura das áreas verdes (arborização das ruas e quintais). [...] O tipo de uso do solo predominante neste trecho da Bacia do Ipiranga corresponde à Unidade IC4. A ocupação do solo existente cria bolsões ou manchas diferenciadas de verticalização, cuja identidade e descrição dos atributos climáticos urbanos corresponde aos da Unidade IC3 (TARIFA; ARMANI, 2000).

ID - Além Pinheiros

Mapa 18 Unidade Climática Urbana ID - Além Pinheiros

É caracterizada pelos bairros jardins: “A travessia do Rio Pinheiros a caminho da Zona Oeste [...] uma unidade climática privilegiada pelo verde [...] dos Bairros Cidade Jardim e Morumbi.” (TARIFA; ARMANI, 2000).

IE - Santo Amaro

Mapa 19 Unidade Climática Urbana IE - Santo Amaro

É o bairro de Santo Amaro.

IF – Além Tamanduateí

Mapa 20 Unidade Climática Urbana IF - Além Tamanduateí

Está localizada na Zona Leste, com urbanização desordenada e árida:

A expansão urbana para o além Tamanduateí produziu bairros (Mooca, Tatuapé, Água Rasa, Carrão, Vila Formosa, Penha, Vila Matilde) com altíssima densidade de pessoas e porcentagem muito pequena de áreas verdes. A aridez reflete temperaturas altas nas superfícies edificadas (30 a 33°C). A forma urbana mostra uma homogeneidade considerável, tanto no forte aquecimento, na ausência do verde e na poluição atmosférica elevada, caracterizando um espaço urbano muito homogêneo nas transformações climáticas pelas práticas espaciais e sócio-econômicas. Assim, todo este território entre rios, cuja identidade já desapareceu, a metrópole determina novas leis, onde a produção e reprodução do espaço das pessoas e do clima é determinado pelo econômico, pelo valor de mercado e não de uso do território. Por isto, praticamente inexistem hoje parques, jardins, áreas verdes, campos de futebol, onde as mínimas necessidades fisiológicas ou vitais do corpo e da cultura possam ser alcançados (TARIFA; ARMANI, 2000).

IG - Além Tietê

Mapa 21 Unidade Climática Urbana IG - Além Tietê

Abrange a Zona Norte:

[...] constitui climatologicamente em uma extensa faixa urbana com orientação Leste-Oeste. Alinhada estruturalmente pelo vale do Tietê, recebe permanentemente influências dos maciços serranos da Cantareira e do Jaraguá. Este extenso divisor de águas das bacias do Tietê – Juquerí (900 a 1.000 metros), e seu bloco de terras elevadas melhora a dispersão dos poluentes e altera os fluxos atmosféricos nos transportes verticais e horizontais na proximidade do solo (camada limite planetária). A ocupação urbana, historicamente muito antiga (núcleos de Santana, Taipas, Pirituba) era pontual e acompanhava caminhos, vias, estradas de ferro (ingleses da ligação Santos - Jundiaí) e mais recentemente tem muita influência do Sistema Anhanguera-Bandeirantes, Fernão Dias e da própria linha Norte do metrô paulistano. Assim, esta franja entre o Tietê e a Cantareira-Jaraguá hoje é um grande

universo urbano, que certamente já criou inúmeros núcleos e sub-núcleos de diversos “climas urbanos”. Os próprios nomes de alguns dos principais bairros da Zona Norte, tais como São Domingos, Jaraguá-Pirituba, Freguesia do Ó, Limão, Casa Verde, Santana, Vila Guilherme, Vila Maria, Tucuruvi, Jacanã, Tremembé, identifica lugares ontem (passado recente até a década de 1940- 1960) associados às várzeas ou serras, hoje se identificam os nomes das pontes ou com a qualidade do ar dos bairros mais elevados, onde já se vende um clima com qualidade melhor. Existe aí também uma relativa homogeneidade de ser uma área com tendência à um predomínio de casas residenciais de até 2 pavimentos (residencial baixo ou intermediário) intercalados por áreas com centros comerciais e de verticalização muito intensa (TARIFA; ARMANI, 2000).

Unidades Periféricas (II, III, IV e V)

Quanto às unidades mais periféricas, “o processo de favelização, com amontoamento de casebres e seres humanos, quase sem as mínimas condições ambientais para a reprodução da vida foi o principal critério adotado para a delimitação destas unidades.” (TARIFA; ARMANI, 2000).

De modo resumido:

[...] Zona Leste (Unidade IIA) compreende de forma geral a maior área de extensão urbana periférica da cidade de São Paulo, bem como alguns de seus bairros, possuem densidades iguais ou superiores ao núcleo central. [...] As favelas e casebres baixos, grudados e abarrotados da Zona Leste são ambientes microclimáticos de alta absorção e transmissão de calor, sendo verdadeiros fornos quando faz muito calor e sol durante o dia (máximos à tarde) e verdadeiras “geladeiras” nas noites frias do inverno paulistano.

[...] A Unidade Climática Urbana Periférica da Zona Norte (Unidade IIB) envolve diretamente o contato com a área ocupada pelos Parques da Cantareira (IIB4), Jaraguá (IIB5) e Anhanguera (IIB6).

[...] No extremo Oeste do Município, nos limites com Osasco e Taboão da Serra, acompanhando o eixo da Rodovia Raposo Tavares, se configura uma outra unidade climática (IIC) onde predomina o residencial baixo com favelas e

abrange os bairros do Rio Pequeno e Jaguaré. Utilizando-se dos dados da estação de monitoramento do Taboão da Serra, percebe-se que o valor médio de material particulado (inalável) para o ano de 1999 foi $55\mu\text{g}/\text{m}^3$, ultrapassando o padrão primário que é de $50\mu\text{g}/\text{m}^3$.

[...] A unidade IID, abrangendo principalmente os Bairros do Campo Limpo, Capão Redondo, Jardim São Luís e Jardim Ângela envolve uma realidade urbana muito fragmentada. Nota-se, além das favelas, um número muito grande de verticalização de baixo padrão (tipo Cohab) (TARIFA; ARMANI, 2000).

Já nas unidades III e IV há gradual diminuição da urbanização:

[...] O espaço ocupado por esta unidade (III) mostra uma transição para o rural.

[...] a ocupação [na área IV] é praticamente inexistente [...] Esta unidade climática ocupa a mesma área da Unidade Climática Natural V (TARIFA; ARMANI, 2000).

Percebe-se, portanto, enorme variedade de subclimas pela mancha urbana da metrópole, determinados tanto por fatores naturais (topografia, altitude, proximidade ao oceano), quanto fatores antrópicos, nos quais destacam-se a verticalização e a presença ou ausência de vegetação. O mosaico de subclimas desafia generalizações, podendo ser analisado com detalhamento infinito, dependendo da escala desejada. Destacam-se, porém, as áreas centrais verticalizadas, os bairros-jardim, as zonas industriais como algumas tipologias marcantes da paisagem de São Paulo.

Mapa 22 Mapa de temperatura aparente da superfície.

Nota-se o intenso aquecimento superficial do Além Tamanduatéi.

"[...] foram utilizadas as imagens do satélite Landsat-7, datadas de 03/09/1999 [...] Métodos utilizados [...] Para elaboração deste mapa, foram executados o mosaico das cenas 219/76 e 219/77 e o recorte da imagem resultante (correspondendo à área de abrangência do município de São Paulo), com o uso do software Spring 3.5.1 (INPE)". Fonte: Atlas Ambiental

Anexo A - Mapas

Mapa 23 Cobertura vegetal.
Fonte: Atlas Ambiental de São Paulo

LEGENDA**UNIDADES CLIMÁTICAS NATURAIS**

Unidades Climáticas		Controles Climáticos		Atributos Climáticos					Propriedades e Características Fundamentais		
Climas Locais	Mesoclimas Topoclimas	Altitude (m)	Relevo		Temperatura (°C) ¹			Pluviosidade (mm)			
			Forma	Orientação	Média	Máx.	Min.	Totais Anuais			Máx. Diários
I - Clima Tropical Úmido de Altitude do Planalto Paulista	A1	800 - 950	Maciços, serras e morros do Alto Aricanduva e Itaquera	SE-NW/N-S	19,3 - 18,7	24,9 - 24,3	15,5 - 14,9	1400 - 1450	100 - 150	Média e alta declividade. Boa ventilação e dispersão de poluentes. Temperaturas amenas.	
	A2	800 - 820	Altas colinas e cumeadas planas do Espigão Central (Paulista)	N-S/SE-NW	19,3 - 19,2	24,9 - 24,8	15,5 - 15,4	1350 - 1450	120 - 160	Topos planos, bem ventilados e com boa dispersão de poluentes. Temperaturas amenas.	
	A3	800 - 850	Serras e altos espigões do Pirajussara - Embu - Colô	SW-NE	19,3 - 19,1	24,9 - 24,7	15,5 - 15,3	1250 - 1450	150 - 175	Média e alta declividade. Boa ventilação e dispersão de poluentes. Temperaturas amenas.	
	B1	740 - 800	Colinas intermediárias e morros baixos do Além Tietê	S	19,6 - 19,3	25,2 - 24,9	15,8 - 15,5	1350 - 1580	150 - 200	Impactos pluviométricos médios a altos, razoável dispersão de poluentes, forte drenagem e acumulação noturna de ar frio.	
	B2		Colinas, patamares e rampas dos Pinheiros	W				1300 - 1400	120 - 175	Dispersão de poluentes razoável e drenagem noturna de ar frio.	
	B3		Colinas, patamares e rampas da face Leste do Espigão Central	NNE				1350 - 1450	110 - 150	Dispersão de poluentes razoável e drenagem noturna de ar frio.	
	B4		Terraços, colinas e patamares do Tamanduaí e Aricanduva	NW				1400 - 1480	100 - 125	Forte aquecimento diurno nos terraços e patamares planos a sub-planos. Dispersão de poluentes razoável a ruim. Boa ventilação com ventos de Leste e Sudeste.	
	B5		Terraços, colinas e patamares do Itaquera	N				1350 - 1450	100 - 125	Forte aquecimento diurno nos terraços e patamares planos a sub-planos. Dispersão de poluentes razoável a ruim. Boa ventilação com ventos de Leste e Sudeste.	
	B6a		Colinas, morros e espigões divisores do Médio Pinheiros e Embu-Guaçu (Billings e Guarapiranga)	Variável				1250 - 1400	150 - 200	Médios a altos impactos pluviométricos, boa ventilação e dispersão de poluentes. Frequentes nevoeiros e névoas úmidas matinais.	
	B6b	740	Represa Billings e Guarapiranga	—	19,4 - 19,3	25,0 - 24,9	15,6 - 15,5	1250 - 1400	150 - 200	Médios a altos impactos pluviométricos, boa ventilação e dispersão de poluentes. Frequentes nevoeiros e névoas úmidas matinais.	
	C1	720 - 740	Várzeas e baixos terraços do Vale do Tietê	E-W	19,7 - 19,6	25,3 - 25,2	15,9 - 15,8	1320 - 1480	110 - 150	Elevada estabilidade atmosférica noturna e matinal, com nevoeiros e acumulação de ar frio neste período. Ventos fracos, calmarias e inversões térmicas próximas do solo. Forte aquecimento diurno. Dispersão ruim de poluentes.	
	C2		Várzeas e baixos terraços do Vale do Tamanduaí	SE-NW				1350 - 1470	100 - 150	Elevada estabilidade atmosférica noturna e matinal, com nevoeiros e acumulação de ar frio neste período. Ventos fracos, calmarias e inversões térmicas próximas do solo. Forte aquecimento diurno. Dispersão ruim de poluentes. Boa ventilação com ventos de SE e NW.	
	C3		Várzeas e baixos terraços do Vale dos Pinheiros	SE-NW				1240 - 1460	120 - 175	Elevada estabilidade atmosférica noturna e matinal, com nevoeiros e acumulação de ar frio neste período. Ventos fracos, calmarias e inversões térmicas próximas do solo. Forte aquecimento diurno. Dispersão ruim de poluentes. Boa ventilação com ventos de SE e NW.	
	C4		Várzeas e baixos terraços do Vale do Aricanduva	SE-NW				1450 - 1470	110 - 125	Elevada estabilidade atmosférica noturna e matinal, com nevoeiros e acumulação de ar frio neste período. Ventos fracos, calmarias e inversões térmicas próximas do solo. Forte aquecimento diurno. Dispersão ruim de poluentes. Boa ventilação com ventos de SE e NW.	
	C5		Várzeas e baixos terraços dos Vales do Itaquera e do Lajeado	N-S				1350 - 1400	110 - 125	Elevada estabilidade atmosférica noturna e matinal, com nevoeiros e acumulação de ar frio neste período. Ventos fracos, calmarias e inversões térmicas próximas do solo. Forte aquecimento diurno. Dispersão ruim de poluentes. Boa ventilação com ventos de componente Norte e Sul.	
	C6		Várzeas e baixos terraços do Vale do Cabuçu de Cima	N-S				1560 - 1500	125 - 150	Elevada estabilidade atmosférica noturna e matinal, com nevoeiros e acumulação de ar frio neste período. Ventos fracos, calmarias e inversões térmicas próximas do solo. Forte aquecimento diurno. Dispersão ruim de poluentes. Boa ventilação com ventos de componente Norte e Sul.	
II - Clima Tropical Úmido Serrano da Cantareira - Jaraguá	A1	800 - 1200	Maciços e Serras da face meridional da Cantareira e Jaraguá	E-W/SW-NE	19,3 - 17,7	24,9 - 23,3	15,5 - 13,9	1400 - 1590	150 - 220	Elevados impactos pluviométricos, boa ventilação e dispersão dos poluentes, aumento da instabilidade e elevação da camada de mistura por efeito topográfico. Forte amenização térmica nas áreas serranas e drenagem noturna de ar frio. Parques florestais da Cantareira e Jaraguá	
	A2	800 - 1200	Maciços e Serras da face setentrional da Cantareira e Jaraguá	E-W				1420 - 1520	150 - 220		
III - Clima Tropical Úmido de Altitude do Alto Juqueri	A	740 - 780	Morros e espigões do Juqueri - Tietê	N	19,6 - 19,3	25,2 - 24,9	15,8 - 15,5	1400 - 1500	150 - 200	Elevados impactos pluviométricos, boa ventilação e dispersão dos poluentes, aumento da instabilidade e elevação da camada de mistura por efeito topográfico. Forte amenização térmica nas áreas serranas e drenagem noturna de ar frio	
	B	720 - 740	Terraços e várzeas do Vale do Juqueri	E-W	19,7 - 19,6	25,3 - 25,2	15,9 - 15,8	1400 - 1450	150 - 200	Diminuição da altura da camada de mistura, aumento local da estabilidade atmosférica. Frequentes nevoeiros matinais. Diminuição da velocidade do vento e aumento de calmarias.	
IV - Clima Tropical Sub-estacional Super-úmido do Reverso do Planalto Atlântico	A	800 - 850	Morros e espigões elevados do Alto Pinheiros e Embu-Guaçu	N-S/E-W	19,3 - 19,1	24,9 - 24,7	15,5 - 15,3	1400 - 1800	200 - 300	Grande influência oceânica, impactos pluviométricos elevados, elevada instabilidade e boa ventilação e dispersão dos poluentes. Nevoeiros e baixos estratos frequentes. Capoeiras e maciços florestais isolados.	
	B1	740 - 800	Morros e nascentes do Alto Pinheiros e Embu-Guaçu	E/W/N	19,6 - 19,3	25,2 - 24,9	15,8 - 15,5	1400 - 1800	200 - 400		
	B2	740	Represa Billings	—	19,4 - 19,3	25,0 - 24,9	15,6 - 15,5	1400 - 1800	200 - 300		
V - Clima Tropical Oceânico Super-úmido da Fachada Oriental do Planalto Atlântico (Serra do Mar)	A	800 - 850	Serras e altos espigões da Fachada Oriental do Planalto Atlântico	N-S/E-W	19,3 - 19,1	24,9 - 24,7	15,5 - 15,3	1600 - 2100	300 - 400	Máxima influência oceânica, elevada instabilidade e impactos pluviométricos muito altos. Boa ventilação e dispersão de poluentes. Nevoeiros e baixos estratos muito frequentes. Capoeiras e maciços florestais.	
	B	740 - 800	Morros, serras e escarpas do Alto Capivari-Morros	Variável	19,6 - 19,3	25,2 - 24,9	15,8 - 15,5	1600 - 2100	300 - 400		
	C	50 - 740	Escarpa Oriental do Planalto Atlântico (Serra do Mar)	S/SE	22,4 - 19,6	28,0 - 25,2	18,6 - 15,8	1800 - 2210	300 - 400

Mapa 25 Unidades Climáticas Urbanas.
Fonte: Atlas Ambiental de São Paulo

LEGENDA																			
UNIDADES CLIMÁTICAS URBANAS																			
Unidades Climáticas				Atributos Climáticos															
Local/Município	Município	Macro/Tipo	Topo/Micro	Controles Climáticos		Poluição							Temperatura Aparente da Superfície (Ativo)						
				Uso do Solo Predominante	% de Áreas Verdes	Mat. Part. (µg/m³)		NO (µg/m³)	O3 (µg/m³)	SO2 (µg/m³)	Fumaça (µg/m³)		CO (ppm)	Estimada Pelo Processamento da Banda Termal do Satélite LANDSAT 7 (°C)					
						Média Anual	Máx.(24h)	Máx.horário	Máx.(1h)	Média Anual	Máx.(24h)	Média Anual	Máx.(24h)	Máx.(8h)	Temperatura Predominante (°C)	Faixa de Variação de Temperatura (°C)	Temperatura Predominante (°C)	Faixa de Variação de Temperatura (°C)	
I - Unidade Climática Urbana Central	A - Núcleo	1	a	Verticalizado/Administrativo (Centro)	Inexistente	54	185	651	249	17	63	61	163	10,4	28	28-32	28	28-31	
			b	Vert. Liberdade/Vergueiro	Pequena	-	-	-	-	23	102	40	152	-	30	27-32	29	28-31	
			c	Vert. Consolação/Paulista	Pequena	44	192	436	-	15	53	55	140	8,1	28	27-30	28	27-30	
			d	Vert. Santa Cecília	Pequena	45	131	929	-	17	105	-	-	13,6	28	27-30	28	27-31	
			e	Vert. Perdizes/Espigão Central	Pequena	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29	27-30	29	28-31	
			f	Vert. Vila Mariana/Jabaquara	Muito pequena	-	-	-	-	-	-	-	-	-	32	29-31	29	28-31	
			g	Vert. Largo da Batata	Muito pequena	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29	28-31	30	29-31	
			h	Vert. Faria Lima/Moema	Pequena	-	-	-	-	17	53	43	189	-	28	27-30	28	27-31	
		2	a	Res. Bairro Verde - Pacaembu	Grande	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28	27-30	28	28-30	
			b	Res. Bairro Verde - Alto da Lapa	Grande	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29	28-30	29	29-31	
			c	Res. Bairro Verde - Pinheiros	Grande	41	76	1163	247	17	66	38	182	-	28	28-31	29	28-31	
			d	Res. Bairro Verde - Jardim Moema	Grande	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28	28-30	28	28-30	
			e	Parque Ibirapuera	Grande	43	128	922	322	10	77	-	-	9,6	28	26-29	26	26-29	
			f	Res. Bairro Verde - Brooklyn	Média	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	29-31	30	29-31	
			g	Com.Indus. - Lapa	Pequena	40	109	1123	264	-	-	-	-	8,3	32	29-32	31	29-32	
			h	Res. Baixo	Pequena	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	29-32	30	29-31	
	3	a	Aeroporto - Congonhas	Pequena	48	126	1156	130	22	56	-	-	120	32	30-32	32	30-32		
		b	Indus./Armaz./Com.Marginal/Tamanduateí	Muito pequena	44	153	836	306	14	50	-	-	13,8	33	31-33	32	30-32		
		c	Indus./Armaz./Com.Term.Rodo/Marginal Tietê	Muito pequena	-	-	-	-	-	-	-	-	-	33	29-33	32	29-32		
		d	Aeroporto - Campo de Marte	Médio a Grande	55	112	-	335	-	-	-	-	-	32	28-32	32	28-32		
	B - Marginais	3	a	Marginal Pinheiros	Pequena	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29	27-31	29	28-30	
			b	Indus. - Santo Amaro	Pequena a média	44	196	-	-	-	-	-	-	6,9	31	28-32	32	28-32	
			c	Res. Baixo - Ipiranga	Pequena	45	147	-	-	-	-	-	-	-	31	29-32	30	29-32	
		2	a	Parque do Estado	Dominante	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26	25-28	23	23-28	
			b	Vert.	Muito pequena	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29	28-31	29	28-31	
			c	Indus. - Anchieta	Muito Pequena	-	-	-	-	-	-	-	-	-	32	30-32	31	30-32	
		C - O Caminho do Mar	1	a	Res. Bairro Verde - Morumbi	Grande	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28	27-29	28	27-30
				b	Vert. - Morumbi	Grande	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27	26-28	27	26-28
				c	Res. Baixo - Favela	Muito Pequena	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29	29-31	31	28-31
			4	a	Res. Baixo - Butantã	Média	53	172	-	-	-	-	-	-	-	30	28-31	30	28-31
				b	USP	Grande	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	27-31	30	26-31
				c	Res. Bairro Verde - Chác. Sto. Antônio	Grande	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28	27-29	27	27-30
	D - Além Pinheiros	2	a	Vert. - Berrini/Brooklin	Pequena	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29	27-31	29	27-32	
			b	Res. Baixo - Santo Amaro	Pequena	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31	29-31	31	29-32	
			c	Res. Baixo - Mooca/Tatuapé	Muito pequena	53	162	-	321	22	69	45	174	-	32	29-33	30	29-32	
		3	a	Vert. Anália Franco	Pequena	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28	27-31	28	27-31	
			b	Cemitério Vila Formosa	Média	-	-	-	-	-	-	-	-	-	32	29-32	28	28-30	
			c	Res. Baixo - Penha/Vila Madalé	Muito pequena	40	137	-	-	-	-	-	-	-	31	29-32	29	29-31	
		E - Santo Amaro	1	a	Vert. - Bandeirantes	Grande	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28	27-29	28	27-30
				b	Res. Baixo - São Domingos/Pirituba	Média	46	108	-	-	-	-	-	-	-	29	29-31	31	27-32
c				Res. Baixo - Limão/Casa Verde	Pequena	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	29-32	31	29-32	
3			a	Vert. - Santana	Pequena	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29	28-30	28	28-30	
			b	Res. Baixo - Vila Maria/Vila Guilherme	Muito pequena	64	270	-	-	-	-	-	-	-	32	29-33	30	29-32	
			c	Res. Baixo - Tucuruvi	Média a grande	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28	26-30	29	26-31	
II - Unidade Climática Urbana Periférica	A - Dz. Zona Leste	1	a	Res. Baixo/Favelas - São Miguel Paulista	Muito pequena	52	186	-	261	-	-	-	-	-	29	29-32	29	28-31	
			b	Vert. Coruj. Hab.	Muito pequena	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	29-32	28	28-30	
			c	Res. Baixo/Favelas - Cidade Líder	Pequena	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29	28-32	28	26-30	
			d	Indus.	Média a grande	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28	28-31	38	26-29	
			e	Res. Baixo/Favelas - Sapporêma/São Mateus	Muito pequena	-	-	-	-	-	-	-	-	-	32	29-32	29	26-31	
			f	Res. Baixo/Favelas - Cidade Tridentes/Guaianases	Média	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28	28-31	28	26-29	
			g	Parque do Carmo	Dominante	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26	25-29	23	23-29	
			h	Parque Ecológico do Tietê	Dominante	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23	25-29	23	23-29	
	B - Dz. Zona Norte	1	a	Res. Baixo - Favelas	Pequena	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	29-32	30	28-32	
			b	Res. Baixo - Favelas	Média	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28	25-31	28	25-31	
			c	Indus.	Média	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29	25-31	28	25-31	
		2	a	Res. Baixo/Favelas - Perus	Grande	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28	26-32	28	25-30	
			b	Res. Baixo/Favelas - Alto Tremembé	Média	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28	26-30	28	27-30	
			c	Parque da Cantareira	Dominante	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23	23-28	23	23-28	
			d	Parque do Jaraguá	Dominante	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26	23-30	23	23-28	
			e	Parque Anhanguera	Dominante	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26	23-30	23	23-28	
C - Dz. Zona Oeste	1	a	Res. Baixo/Favelas - Rio Pequeno	Pequena a média	55	142	675	186	16	43	-	-	8,3	30	28-31	30	27-31		
		b	Com.Indus. - Raposo Tavares	Pequena a média	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	28-31	29	27-31		
	2	a	Vert.	Pequena	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31	28-31	30	29-32		
		b	Res. Baixo/Favelas - Capão Redondo	Muito pequena	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	29-31	30	28-31		
		c	Res. Baixo/Favelas - Capão Redondo	Pequena	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29	28-30	29	28-30		
	3	a	Res. Bairro Verde	Grande	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28	26-29	23	23-29		
		b	Vert. Coruj. Hab.	Muito pequena	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	28-32	29	27-31		
		c	Res. Baixo/Favelas - Pedreira	Pequena	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29	27-30	28	27-30		
D - Do Extremo Sul	2	a	Res. Baixo/Favelas - Cidade Ademar	Muito pequena	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31	29-32	30	29-32		
		b	Res. Baixo - Socorro/Cd. Dutra	Média a grande	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	28-31	30	25-31		
		c	Vert.	Pequena	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28	28-30	28	28-31		
	3	a	Res. Baixo/Favelas - Grajaú	Média	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29	26-30	29	26-30		
		b	Represa	Inexistente	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23	23-24	23	23-24		
		c	Res. Baixo	Grande	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28	25-29	28	23-29		
	4	a	Rural (não urbano)	Dominante	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26	23-28	23	23-28		
		b	Represa	Inexistente	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23	23-24	23	23-24		
E - Unidade Climática Urbana Não Urbana	1	A	Não urbano (florestal)	Dominante	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23	23-28	23	23-28

Mapa 28 Cobertura vegetal (m²) por habitante por distrito - 1999
 Fontes: SMMA/Atlas Ambiental e IBGE

Anexo B - BFF (Biotopflächenfaktor)

Áreas seladas (sem penetração de água e ar, sem crescimento vegetal)

Peso: 0,0

Exemplos: Concreto, asfalto, cerâmicas, azulejo, pavimentação com junta ou sub-base selada, acabamentos plásticos impermeáveis.

Função para ecossistema e desenvolvimento de hábitat: Baixa eficiência evapotranspiração, sem infiltração, sem função do solo, irrelevante como hábitat para plantas e animais.

Áreas parcialmente seladas (com superfícies semipermeáveis à água e ao ar, sem crescimento vegetal em geral)

Peso: 0,3

Exemplos: pavimentação de pedras (grandes e pequenas), mosaico, madeira, intertravados de concreto e azulejo (com juntas de areia, sub-base de areia ou brita), áreas de areia, pedrisco, acabamento resistente à água, solo altamente compactado, acabamentos plásticos permeáveis, concregramas (sem crescimento vegetal devido ao alto pisoteamento ou passagem de veículos: estacionamentos, ruas de acesso).

Função para ecossistema e desenvolvimento de hábitat: eficiência de evapotranspiração limitada, baixa infiltração e armazenamento de água superficial, funções de solo limitadas assim como baixa relevância como hábitat para fauna e flora.

Áreas semi-fechadas (com acabamentos permeáveis à água e ar, permitindo boa infiltração e crescimento vegetal)

Peso: 0,5

Exemplos: brita com junta em grama, pisadas de madeira com alta porcentagem de juntas, pavimentação com juntas gramadas, concregramas (com grama razoavelmente desenvolvida devido ao baixo uso: acesso de bombeiros),

Função para ecossistema e desenvolvimento de hábitat: eficiência de evapotranspiração limitada, média infiltração e armazenamento de água da superfície, média eficiência de funções do solo devido à atividade biológica e razoável significância como hábitat para plantas e animais (habitantes das rachaduras do piso).

Superfície vegetal não conectada com solo adjacente

Peso: 0,5

Exemplos: superfícies vegetadas sobre pavimentos de subsolos ou garagens subterrâneas (menos de 80 cm de solo), floreiras, canteiros.

Função para ecossistema e desenvolvimento de hábitat: média a alta eficiência evapotranspirativa, poeira capturada por vegetação, baixa eficiência de infiltração, função de solo limitada, média significância como hábitat para plantas e animais. O fator de 0,5 se refere a superfícies vegetadas. Devido à baixa capacidade de infiltração e armazenamento do solo, áreas semi-fechadas recebem apenas peso 0,3. 0,3 ainda é determinado para áreas parcialmente seladas, pois, para esse tipo de área, infiltração e armazenamento no solo têm papel diminuído.

Superfície vegetal não conectada com solo adjacente

Peso: 0,7

Superfícies vegetadas sobre garagens subterrâneas (mais de 80 cm de solo)

Função para ecossistema e desenvolvimento de hábitat: eficiência evapotranspirativa e captura de poeira que pode ser comparada a superfície vegetal conectada ao solo adjacente. Baixa a média infiltração e armazenamento de águas pluviais, baixa a média eficiência de função de solo, média a alta significância como hábitat de plantas e animais. O maior peso em relação à categoria anterior é justificado pelo maior crescimento arbóreo em solos com mais de 80 cm de profundidade. O peso de 0,7 se refere a superfícies vegetadas, sendo que aquelas semi-fechadas recebem peso de

0,3 devido à baixa capacidade de infiltração no solo. O valor de 80 cm é médio, podendo haver áreas com menor ou maior espessura (por exemplo, onde há árvores plantadas).

Superfície vegetada conectada ao solo adjacente

Peso: 1,0

Disponibilidade como local de desenvolvimento da vegetação sem avaliação de sua qualidade.

Função para ecossistema e desenvolvimento de hábitat: alta a muito alta eficiência evapotranspirativa, potencial de captura de poeira através da vegetação, alta taxa de infiltração e capacidade de armazenamento do solo, alta eficiência nas funções do solo, alta adequação como hábitat de animais e plantas. Diferenciação na qualidade da vegetação ou cálculo do volume de espaços verdes livres não é realizada. Assim, a qualidade deste tipo de área pode variar significativamente em relação à sua relevância ecológica. A simples disponibilidade de vegetação é o critério determinante para o peso 1,0.

Infiltração de águas pluviais

Peso: 0,2

Cada metro quadrado de área de telhado ou cobertura onde a água da chuva é drenada para uma superfície vegetal que sirva como infiltração de águas pluviais pode ser considerada com um peso de 0,2.

Função para ecossistema e desenvolvimento de hábitat: Recuperação de lençol freático alta a muito alta.

Áreas verdes verticais sobre paredes externas sem janelas e muros

Peso: 0,5

Determinada para colocação de vegetação sobre paredes.

Função para ecossistema e desenvolvimento de hábitat: alta eficiência transpirativa, alta captação de poeira, alta significância como hábitat para animais. Determinada para áreas verdes verticais principalmente sobre paredes externas sem janela (paredes de incêndio) e muros. É considerado plantio até uma altura de 10 m. Isso corresponde a aproximadamente à área que será coberta em 10 anos com trepadeiras auto-fixadoras. Utilizando-se apoios, considera-se a altura máxima do apoio, até um limite de 10 m de altura. Determinado a locais que obtiveram melhorias após essas medidas. O plantio em fachadas não está incluído no BFF, pois os efeitos positivos em paredes sem obstruções são bem maiores que aqueles em fachadas. Além disso, há maiores limitações na vitalidade da vegetação plantada em fachadas frente às ruas.

Plantio sobre tetos

Peso: 0,7

Função para ecossistema e desenvolvimento de hábitat: alta eficiência evapotranspirativa e capacidade de capturar poeira, funções de solo limitadas, baixa a média capacidade de armazenamento de água, alta a muito alta significância como hábitat para plantas e animais (especialmente se forem extensivos). Não há diferenciação entre tetos verdes intensivos e extensivos. Geralmente, quando extensivamente plantados, assume-se alta significância em relação à qualidade de hábitat para plantas e animais, enquanto tetos verdes intensivos apresentam aumento nos efeitos ecológicos devido ao maior volume de solo.

Adaptado e traduzido de BECKER et al., 1990.

Anexo C - Leis de incentivo a tetos verdes

Projeto de lei Nº 4887 de 2009 (Federal do Brasil)

(Do sr. Jorge Tadeu Mudalen)

Dispõe sobre o desconto no pagamento anual de IPTU (Imposto Predial e Territorial Urbano) na adoção de telhados verdes em imóveis em cidades com população superior a quinhentos mil habitantes.

O Congresso Nacional decreta :

Art. 1º Esta Lei estabelece medidas destinadas a estimular a construção de telhados verdes nas residências e edifícios em cidades brasileiras

§ 1º Considera-se telhado-verde, para os efeitos desta Lei, a aplicação e uso de vegetação sobre a cobertura de edificações com impermeabilização e drenagem adequadas, proporcionando melhorias nas condições de conforto termoacústico e paisagismo das edificações, reduzindo a poluição ambiental comum em grandes centros urbanos.

Art. 2º Os proprietários de imóveis residenciais ou comerciais em cidades com mais de quinhentos mil habitantes que implantem telhados verdes em pelo menos 50% de suas coberturas, terão desconto de 5% no valor bruto do Imposto Predial e Territorial Urbano.

JUSTIFICATIVA

O telhado verde - ou telhado vivo, como alguns costumam chamar esse tipo de cobertura que leva terra e plantas no lugar de telhas, constitui-se como um

excelente aliado na melhoria da qualidade de vida das pessoas, na valorização dos empreendimentos residenciais e comerciais, assim como no combate aos efeitos das mudanças climáticas.

Conforto térmico e acústico, proteção do prédio, ambientação arquitetônica, espaços de lazer e produção de alimentos. Estes são alguns dos inúmeros benefícios que esta tecnologia traz ao homem e à sociedade.

Com o crescente desenvolvimento das cidades e de áreas rurais, espécies vegetais e animais têm sido expulsas de seu habitat natural. A cobertura vegetal ou telhado de grama é ferramenta fundamental para a sobrevivência e continuidade da manutenção da vida no conceito urbano que se forma a partir de agora. Também devemos considerar a melhoria da qualidade do ar através da fotossíntese e da aderência dos poluentes ao substrato, pois os telhados verdes agem como purificadores do ar urbano. Assim podemos entender que o telhado ecológico é a solução para cidade moderna. Ele também diminui a reverberação ao absorver e isolar ruídos, diminuindo também significativamente a necessidade de energia para climatização de ambientes, contribuindo assim para a diminuição de emissão de CO₂ e de suas conseqüências.

Outra ação é proporcionar excelente conforto ambiental, pois além do isolamento térmico, ele age por evapo-transpiração, perdendo a energia de evaporação da água por ele retida. O telhado vivo tam-

bém consome energia pela fotossíntese. Pela evapotranspiração auxilia no arrefecimento de centros urbanos. A continuidade dos telhados ecológicos na cidade influi muito significativamente para o conforto ambiental das áreas mais urbanizadas.

A cobertura verde pode ser aproveitada para horticultura com grandes vantagens principalmente no caso de projetos de casas populares. A produção de alimentos próxima ao consumo, tem sido apontada com elemento de sustentabilidade na idealização da cidade do futuro. Para quem pensa em captar a água da chuva (medida extremamente importante para conter o problema da falta de água), as plantas e a terra do telhado verde funcionam como um filtro natural da água, que pode ser armazenada ainda mais limpa, para depois ser usada na irrigação do jardim, nas bacias sanitárias, no chuveiro e, em regiões mais áridas, até para cozinhar e beber. Sem falar que um telhado em forma de jardim deixa a casa mais bonita, convidativa.

Além disso, devemos considerar que o telhado verde faz uma compensação da parte do solo que foi coberta com a construção. Aí se inserem as qualidades ambientais do telhado verde, que crescem à medida que aumentam a incidência e a escala desses telhados. Pensemos numa cidade como São Paulo, por exemplo, onde as construções impermeabilizaram boa parte do solo. Onde tem telhado verde, a água da chuva escorre mais devagar, já que precisará atravessar a camada de terra antes de atingir o solo. Isso ajuda a com-

bater as enchentes, especialmente aquelas causadas por chuvas fortes e de curta duração.

O telhado verde também combate as ilhas de calor que se formam nas cidades grandes por causa da falta de áreas verdes e excesso de áreas com solo impermeabilizado.

A regra da escala que vale para o problema das enchentes também vale para as ilhas de calor: um telhado verde não faz milagres, mas um conjunto de telhados-jardins pode ajudar a reduzir a temperatura em áreas densamente construídas. Assim, devemos pensar como seria um telhado verde num Shopping Center, numa universidade ou numa indústria. Os benefícios que seriam conquistados. Nos Estados Unidos, uma das fábricas da Ford tem o título de maior telhado verde do mundo.

Existe ainda outra grande vantagem do telhado verde nas cidades: a reabilitação de habitats para pássaros e outros bichos pequenos (borboletas, besouros, grilos, gafanhotos, abelhas e por aí vai). Em Londres, os telhados-verdes ganharam fama depois do sucesso do trabalho de um observador de pássaros que começou a reproduzir nos telhados da cidade o ambiente natural de um pássaro que estava em extinção. Aos poucos, os animais conseguiram aumentar sua população, com espaço para viver e se reproduzir. E, claro, a cidade ficou mais bonita e saudável também.

Recentemente dois pesquisadores da Universidade Cardiff, no País de Gales, realizaram um estudo

provando que o uso do telhado-verde faz com que a temperatura das grandes cidade reduza consideravelmente. Phillip Jones, diretor da Escola Welsh de Arquitetura, e a arquiteta Eleftheria Alexandri simularam no computador os efeitos em 9 metrópoles caso elas cobrissem o teto de todos os seus edifícios com vegetação. Eles perceberam que, dependendo do lugar, a temperatura local poderia cair de 3,6 a 11,3 graus.

Quanto mais quente a cidade, maior o efeito refrescante. Isso acontece por dois motivos. Em primeiro lugar, a vegetação absorve menos calor do que o concreto. Superfícies quentes aquecem o ar à sua volta e têm uma grande influência sobre a temperatura local, constatou o pesquisador Phillip Jones. Além disso, a transpiração das árvores aumenta a umidade do ar, e, dessa forma, também reduz a temperatura. Muros verdes também produzem um efeito parecido, mas telhados são mais eficientes, já que cobrem uma área de exposição ao sol bem maior. Além de reduzir o calor, em regiões quentes as coberturas verdes diminuem consideravelmente o consumo de energia com o uso de ar-condicionado.

Esta é também uma constatação do trabalho. E consumo menor de energia significa menos poluição, principalmente nos países que usam usinas termoelétricas.

Essa medida visa atender as necessidades pelas quais a sociedade vem passando, como o aquecimento global e as mudanças climáticas. Também pretende melhorar o conforto térmico, acústico e ambiental

dos imóveis. Dessa forma, encaminho a solicitação da elaboração de um PL que aplique um desconto no pagamento anual de IPTU (Imposto Predial e Territorial Urbano) para os proprietários de imóveis que adotem telhados verdes em residências ou edifícios comerciais em cidades com população superior a quinhentos mil habitantes.

Sala das Sessões em, de de 2009

Jorge Tadeu Mudalen

Deputado Federal - DEM/SP

Situação: Devolvida ao Autor na Mesa Diretora da Câmara dos Deputados (MESA)

17/02/2011 Mesa Diretora da Câmara dos Deputados
(MESA)

Indeferido o pedido de desarquivamento desta proposição constante do REQ-271/2011 em virtude de a(s) proposição(ões) ter(em) sido arquivada(s) definitivamente. Inteiro teor

Lei nº 14.243, de 11 de dezembro de 2007 (Estado de Santa Catarina)

Procedência: Dep. Professor Grando

Natureza: PL. 170/07

DO: 18.265 de 11/12/07

Fonte - ALESC/Coord. Documentação

Dispõe sobre a implementação de sistemas de natu-
ração através da criação de telhados verdes em espa-
ços urbanos de Santa Catarina.

O GOVERNADOR DO ESTADO DE SANTA CATARINA,

Faço saber a todos os habitantes deste Estado que a Assembléia Legislativa decreta e eu sanciono a seguinte Lei:

Art. 1º Fica criado no âmbito do Estado de Santa Catarina o Programa Estadual de Incentivo a Adoção de Telhados Verdes em espaços urbanos densamente povoados objetivando:

- I - minimizar as chamadas ilhas de calor;
- II - minimizar a poluição atmosférica;
- III - criar corredores verdes;
- IV - reduzir o consumo de energia elétrica;
- V - atuar como isolantes térmicos; e
- VI - promover o desenvolvimento sustentável.

Art. 2º São considerados telhados verdes os jardins implantados em telhados ou terraços das edificações nos espaços urbanos, adaptados à realidade biotecnológica do Estado de Santa Catarina.

Parágrafo único. A área utilizada para a implantação dos telhados verdes não poderá ser inferior a 40% (quarenta por cento) da área total.

Art. 3º Fica o Poder Executivo autorizado a criar parcerias, incentivos fiscais e financeiros aos municípios partícipes do Programa.

Art. 4º O credenciamento de imóveis urbanos, públicos ou privados, ao Programa, deverá obedecer aos critérios previstos em lei, no Plano Diretor Municipal, no Código de Posturas e no Alvará do Corpo de Bombeiros.

Art. 5º O Poder Executivo regulamentará a presente Lei no prazo de 120 (cento e vinte) dias.

Art. 6º As despesas com a execução desta Lei correrão por conta de dotações orçamentárias próprias, suplementadas se necessário.

Art. 7º Esta Lei entra em vigor na data de sua publicação.

Florianópolis, 11 de dezembro de 2007

LUIZ HENRIQUE DA SILVEIRA

Governador do Estado

Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano Ambiental de Porto Alegre (2011)

Lei Complementar nº 434, de 1º de dezembro de 1999, atualizada e compilada até a Lei Complementar nº 667, de 3 de janeiro de 2011, incluindo a Lei Complementar 646, de 22 de julho de 2010.

[...]

Art. 96. Na aprovação e licenciamento de projetos de edificação e parcelamento do solo, serão observadas as limitações específicas relativas ao subsolo, à superfície e ao espaço aéreo definidas por legislação específica.

[...]

§ 7º Nos terrenos de área inferior a 1.500m² (mil e quinhentos metros quadrados), a AL deverá ser de, no mínimo, 70% (setenta por cento) da área remanescente

da TO, conforme disposto na tabela abaixo, ressalvado o disposto no art. 113 desta Lei Complementar:

TO (%)	Área remanescente da TO (%)	AL (%)
90	10	7
75	25	17
66,6	33,4	23
50	50	35
20	80	56

§ 8º Em terrenos com área superior a 1.500m² (mil e quinhentos metros quadrados) e com TO de até 75% (setenta e cinco por cento), deverá ser atendido o percentual de AL de, no mínimo, 20% (vinte por cento). (Incluído pela L.C. nº 646, de 22 de julho de 2010).

§ 9º Quando a TO do terreno for de 90% (noventa por cento), aplicar-se-ão as medidas alternativas previstas no § 11 deste artigo como compensações à parcela restante, até completar os 20% (vinte por cento) exigidos no § 8º deste artigo. (Incluído pela L.C. nº 646, de 22 de julho de 2010).

§ 10. Serão admitidas medidas alternativas para compensar, sob a coordenação da SMAM, a AL exigida e que não puder ser executada no lote, de acordo com as seguintes proporções:

I - nos terrenos com até 1.500m² (mil e quinhentos metros quadrados), serão admitidas medidas alternativas para compensar, no máximo, 50% (cinquenta por cento) de sua AL; (Incluído pela L.C. nº 646, de 22 de julho de 2010).

II - nos terrenos com área entre 1.500m² (mil e quinhentos metros quadrados) e 3.000m² (três mil metros quadrados), serão admitidas medidas alternativas para compensar, no máximo, 40% (quarenta por cento) de sua AL; e (Incluído pela L.C. n° 646, de 22 de julho de 2010).

III nos terrenos com área superior a 3.000m² (três mil metros quadrados), serão admitidas medidas alternativas para compensar, no máximo, 30% (trinta por cento) de sua AL. (Incluído pela L.C. n° 646, de 22 de julho de 2010).

§ 11. Constituem medidas alternativas para a AL: (Incluído pela L.C. n° 646, de 22 de julho de 2010).

I - terraços e coberturas vegetados - área descoberta, em estrutura permanente e fixa, totalmente vegetada, com uma camada de substrato - terra -, sendo que a área de terraço ou cobertura vegetados deverá ser de, no mínimo, o dobro da AL não atendida no terreno; (Incluído pela L.C. n° 646, de 22 de julho de 2010).

[...]

Art. 112. O regime volumétrico das edificações é o conjunto das especificações que definem os limites de ocupação, a altura e os recuos que a edificação deve respeitar.

§ 1° O regime volumétrico será definido pelos seguintes elementos: (Parágrafo Único renomeado pela L.C. n° 646, de 22 de julho de 2010).

[...]

VI - Área Livre Permeável (ALP) - parcela de terreno mantida sem acréscimo de qualquer pavimentação ou elemento construtivo impermeável, vegetada, não podendo estar sob a projeção da edificação ou sobre o subsolo, destinada a assegurar a valorização da paisagem urbana, a qualificação do microclima, a recarga do aquífero e a redução da contribuição superficial de água da chuva. (Incluído pela L.C. n° 646, de 22 de julho de 2010).

§ 2º O primeiro elemento que incide sobre o cômputo do regime volumétrico das edificações é a ALP. (NR)(Incluído pela L.C. n° 646, de 22 de julho de 2010).

Projeto de lei 01-0622/2008 do Vereador Natalini (PSDB) (Município de São Paulo)

Pesquisa por: PL 622/08

Projeto de Lei n° 622/2008 de 29/10/2008

DISPÕE SOBRE A CONCESSÃO DE ISENÇÃO PARCIAL DE IMPOSTOS PREDIAL E TERRITORIAL URBANO - IPTU - INCIDENTES SOBRE IMÓVEIS QUE SEJAM CONSTRUÍDOS OU ADAPTADOS COM AS MEDIDAS DE PROTEÇÃO AMBIENTAL QUE ESPECIFICA, INSTITUI O PROGRAMA EDIFICAÇÃO ECOLÓGICA, E DÁ OUTRAS PROVIDÊNCIAS.

Autor(es): NATALINI

Fase da tramitação: Envio-> Área: URB Data: 03/03/2010 | Recebimento-> Área: SGP21 Data: 03/03/2010

Texto na íntegra:

PL : 622/08

Autor : NATALINI

Sessão : 411-SO

D.O.M. de : 30/10/2008

“ Dispõe sobre a concessão de isenção parcial de Impostos Predial e Territorial Urbano - IPTU - incidentes sobre imóveis que sejam construídos ou adaptados com as medidas de proteção ambiental que especifica, institui o programa “Edificação Ecológica” -, e dá outras providências.”

A Câmara Municipal de São Paulo decreta:

Art. 1º. Fica concedida isenção parcial no valor correspondente a até 30% (trinta por cento) do valor total dos Impostos Predial e Territorial Urbano - IPTU - incidentes sobre imóveis que sejam construídos ou adaptados com as seguintes medidas de proteção ambiental:

I - utilização de tijolo ecológico, conforme definido no § 1º deste artigo, na totalidade da parte da edificação construída em alvenaria: isenção de 10% (dez por cento) do valor total do IPTU devido;

II - instalação de telhado verde, também conhecido como telhado vivo ou ecotelhado, conforme definido no § 2º deste artigo, em todos os telhados disponíveis no imóvel para esse tipo de cobertura: isenção de 15% (quinze por cento) do valor total do IPTU devido;

III- plantio de árvore na calçada defronte ao imóvel, escolhida entre os tipos adequados à arborização de vias públicas, ou preservação de árvore já

existente, observando-se a manutenção de área suficiente para sua irrigação: isenção de 5% (cinco por cento) do valor do IPTU devido.

§1º. Define-se como tijolo ecológico, para fins fixados nesta lei, o tijolo destinado a uso na construção civil cuja fabricação empregue matérias primas diversas das tradicionais, tenha custo final mais barato para o consumidor em decorrência da utilização em sua fabricação de solo, cimento, cal, resíduos de pedreiras ou pó-de-pedra, entulho oriundo de demolições e construções e resíduos industriais, siderúrgicos ou petroquímicos, exija, exclusivamente, água para endurecer e prescindir de cozimento em fornos, sendo o produto final auto-encaixável e capaz de permitir a dispensa de acabamento.

§2º. Define-se como telhado verde, telhado vivo ou ecotelhado a cobertura de edificações na qual é plantada vegetação compatível, com impermeabilização e drenagem adequadas e que proporcione melhorias em termos paisagístico e termo-acústico e redução da poluição ambiental.

§3º. Os benefícios de que tratam os incisos I, II e III do artigo 1º desta Lei poderão ser concedidos separadamente ou cumulativamente até limite máximo de 30% (trinta por cento) do total do IPTU devido.

Art. 2º. Para obtenção da isenção de que tratam os incisos I e II do artigo 1º desta lei, o proprietário deverá apresentar, junto do pedido de isenção, além de outras eventuais exigências estabelecidas em

lei, documento assinado por engenheiro devidamente inscrito em seu órgão de classe que ateste o cumprimento das condições necessárias para a concessão das isenções de que tratam aqueles dispositivos.

Parágrafo Único - O beneficiário será responsável, em todas as hipóteses desta lei, pela veracidade das informações prestadas, sob pena de perder o direito de isenção ora instituído.

Art. 3º. Os beneficiários desta lei estendem-se aos compromissários dos imóveis, desde que devidamente documentados, e aos possuidores a qualquer título, desde que deles seja a responsabilidade pelo pagamento dos Impostos Predial e Territorial Urbano - IPTU-, conforme estabelecido em contrato ou termo de cessão.

Art. 4º. O Poder Público municipal instituirá programa denominado "Edificação Ecológica" voltado para a difusão da importância e das vantagens da utilização do tijolo ecológico, da adoção de telhados verdes e do plantio de árvores nas calçadas das vias públicas municipais.

Art. 5º. O Poder Público municipal poderá firmar convênios e parcerias com universidades, instituições de pesquisa, órgãos de outras esferas de governo e empresas e entidades particulares para o aperfeiçoamento do tijolo ecológico e do telhado verde, assim como para a difusão de seu emprego.

Art. 6º. As despesas decorrentes da execução desta Lei correrão por conta das dotações orçamentárias próprias, suplementadas, se necessário.

Art. 7º. Esta lei será regulamentada, pelo Poder Executivo, no que couber, no prazo máximo de 60 (sessenta) dias.

Art. 8º. Esta Lei entrará em vigor na data de sua publicação, gerando efeitos a partir do ano seguinte, revogadas as disposições em contrário.

Sala das Sessões, de outubro de 2008 Às Comissões competentes."

Proposição nº 005.00139.2009 (Município de Curitiba)

Câmara Municipal de Curitiba

PROPOSIÇÃO Nº 005.00139.2009

O Vereador infra-assinado, no uso de suas Professor Galdino atribuições legais, submete à apreciação da Câmara Municipal de Curitiba a seguinte proposição:

Projeto de Lei Ordinária

EMENTA

Autoriza o Poder Executivo a criar mecanismos de incentivo a implantação de sistemas de naturezação, chamados "telhados verdes", nas coberturas de edificações no município de Curitiba.

Art. 1º. Fica autorizado o Poder Executivo a realizar ações de incentivo a implantação de "telhados verdes" nas coberturas de edificações do município de Curitiba.

§ 1º. Considera-se telhado verde, para os efeitos dessa Lei, coberturas amplas de vegetação, implantadas sobre lajes impermeabilizadas, com sistema de drenagem e que proporcionem melhorias paisagísticas, termoacústicas e redução da poluição ambiental e das ilhas de calor nos espaços urbanos.

§ 2º. Os telhados verdes poderão ter vegetação intensiva ou extensiva, preferencialmente nativa, e que exija pouca quantidade de água.

Art. 2º. Com a finalidade de tornar públicos os modos de aplicação e os benefícios do telhado verde e de incentivar a sua aplicação nas edificações urbanas, fica autorizado o Poder Executivo a:

I - realizar estudos junto a organizações públicas ou privadas para a definição de padrões estruturais para implantação de telhados verdes no município;

II - organizar cursos e palestras informativos abertos à comunidade;

III - conceder incentivos fiscais e financeiros aos proprietários das edificações que adotarem telhados verdes em conformidade com padrões técnicos especificados pelo Poder Executivo.

Art. 3º. Ulterior disposição regulamentar desta Lei definirá o detalhamento técnico de sua execução.

Art. 4º. Os impactos orçamentários serão devidamente observados com o fim de cumprir a lei de responsabilidade fiscal e constarão do orçamento no ano seguinte à aprovação da presente lei.

Art. 5°. Esta Lei entra em vigor na data de sua publicação.

Palácio Rio Branco, 30 de julho de 2009

Professor Galdino

Vereador

Justificativa

O presente projeto de lei tem como objetivo incentivar a expansão do uso de telhados verdes no município de Curitiba.

Os telhados verdes modificam o local onde se situam e oferecem diversos benefícios ao meio ambiente, que merecem efetivação no âmbito municipal, tais como: redução da poluição do ar e das ilhas de calor nos centros urbanos, diminuição do consumo de energia elétrica em edificações que utilizam sistemas de ar-condicionado, melhoria paisagística, entre outros.

O uso de telhados verdes é notório em países como Canadá, Estados Unidos, Itália, França, Inglaterra, Alemanha, Áustria, Japão, entre outros. O Brasil também já começa a fazer parte desta tendência. Em São Paulo, diversas edificações implantaram telhados verdes, e algumas empresas já comercializam as coberturas para todo o país.

Conforme artigo 225 da Constituição Federal: "Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações."

A Constituição Federal também impõe ao Poder Público o dever de combater a poluição em qualquer de suas formas:

“Art. 23. É competência comum da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios:

VI - proteger o meio ambiente e combater a poluição em qualquer de suas formas;”

Sobre os benefícios dos telhados verdes:

Diminuição da poluição do ar

As plantas atraem e absorvem grandes quantidades de poluição e poeira na superfície das folhas, contribuindo assim para tornar o ar mais limpo e saudável, beneficiando as pessoas que moram próximas. Estudos apontam que um telhado verde extensivo (com plantas suculentas de porte baixo) chega a armazenar 50 toneladas de carbono fixado por hectare – o que também insere os telhados verdes entre as iniciativas que contribuem para a diminuição do efeito estufa.

Redução das “Ilhas de calor”

“Ilhas de calor” ocorrem quando o ar em determinado local de uma cidade é mais quente e seco que o ar dos seus arredores. São causadas principalmente devido ao processo de urbanização e impermeabilização de superfícies antes cobertas com vegetação e solo e contribuem para o aumento dos níveis de poluição.

As plantas ajudam a resfriar o ar através da evapotranspiração, além de absorver parte da energia da luz solar evitando a produção de calor. Esses processos reduzem a necessidade de uso de equipamentos

resfriadores de ambiente, e conseqüentemente reduzem o consumo de energia elétrica.

Redução da poluição sonora

Telhados verdes podem atuar como um instrumento de isolamento acústico, através da ação conjunta do substrato (que bloqueia sons de baixa frequência) e das plantas (que filtram sons de alta frequência). Experimentos demonstram que um telhado verde com 12 centímetros de substrato pode reduzir a transmissão de sons em até 40 decibéis.

Diminuição do risco de enchentes

A terra e as plantas presentes nos telhados verdes funcionam como uma esponja, que liberam a água em quantidade bem mais lenta do que uma superfície lisa. Com a implantação de telhados verdes, o escoamento de chuva das edificações pode tornar-se nulo ou mais demorado.

Economia de água

Nas edificações com telhados verdes, em que possam ser instalados reservatórios, é possível a retenção da água de chuva. Uma vez filtrada pelo telhado verde, a água pode ser utilizada para a rega, lavagem de áreas das edificações, lavagem de automóveis, uso doméstico, etc.

Redução de consumo de energia elétrica

A camada de substrato e as plantas das coberturas verdes atuam como barreiras contra a incidência de radiação solar e evitam o alto aquecimento da edificação.

Com isso, pode ser reduzido o uso de equipamentos que resfriam o ambiente que, de maneira geral, gastam quantidades consideráveis de energia.

Além disso, as coberturas verdes ajudam a manter a temperatura do interior mais amena em dias frios, ao dificultar a passagem de baixas temperaturas para o interior da edificação. Estudos mostram que telhados verdes podem reduzir em até 70% o consumo de energia elétrica, dependendo do clima, materiais usados, posicionamento e design da construção.

Melhoria estética da cidade

A melhoria da estética urbana é o benefício mais claro de um telhado verde. Mesmo as coberturas verdes inacessíveis podem apresentar valor estético, especialmente quando observados de prédios vizinhos ou de meios de transporte aéreos. Os benefícios também podem se refletir como forma de impulso ao turismo.

Aumento da área útil da cidade e produção

Os telhados e terraços existentes hoje em Curitiba, no Brasil, e em grande parte das edificações do mundo, são grandes áreas improdutivas. Com a implantação de telhados verdes, abre-se a possibilidade para utilização das áreas como espaços de convivência e lazer no topo de edificações. A produção de alimentos sobre telhados também é tecnicamente possível. Em edifícios habitacionais, espaços verdes podem ser utilizados como hortas para os moradores. Restaurantes podem utilizar os telhados verdes para plantação de hortaliças que serão utilizados no próprio local.

Aumento da vida útil de telhados

Telhados verdes protegem a cobertura ou telhado contra impactos físicos de chuva e granizo, bloqueiam parte da radiação ultravioleta além de proteger contra flutuações extremas de temperatura. Experiências bem sucedidas na Europa demonstram que a vida útil de um telhado verde é, no mínimo, duas vezes maior do que um telhado convencional, reduzindo investimentos em reforma, e conseqüentemente, em geração de resíduos de construção civil.

http://www.profgaldino.com/arquivos/doc_consiliux.pdf

(GALDINO, 2009)

Projeto de lei 116/09 (Município de São Paulo)

SUBSTITUTIVO DA COMISSÃO DE POLÍTICA URBANA, METROPOLITANA E MEIO AMBIENTE SOBRE O PROJETO DE LEI 115/09.

Dispõe sobre a obrigatoriedade da instalação do “Telhado Verde” nos locais que especifica e dá outras providências.

A Câmara Municipal de São Paulo DECRETA:

Art. 1º Os projetos de edificações novas, de três ou mais pavimentos, submetidos ao órgão competente para aprovação junto à Prefeitura deverão prever a construção de “Telhado Verde”, a partir da data da promulgação da presente lei.

§ 1º Para os fins desta Lei considerar-se-á “Telhado Verde” a cobertura de vegetação implantada

sobre a laje de concreto ou cobertura, providos de impermeabilização, sistema de drenagem e tratamento paisagístico, capaz de absorver o escoamento superficial das águas, contribuir para a redução da demanda de ar condicionado e das ilhas de calor e melhorar o microclima com a transformação do dióxido de carbono (CO₂) em oxigênio (O₂) através da fotossíntese.

Art. 2º O “telhado Verde” devera ser constituído por vegetação compatível com o local de plantio, de preferência com espécies nativas que exijam pouca manutenção e dispensem irrigação intensiva, alem de não permitir o acúmulo de água, de modo a não servir de habitat de mosquitos.

Art. 3º A área correspondente ao “Telhado Verde” será considerada reservatório de retenção e acumulação das águas pluviais para garantir as condições naturais de absorção das águas pluviais no lote, nos termos da Lei 11.228/92 e do Decreto 32.329/92.

Art. 4º O Poder Executivo deverá envidar todos os esforços para que seja possível a realização de cursos e palestras para a divulgação das técnicas imprescindíveis à elaboração do projeto contemplando o “Telhado Verde”, abordando aspectos como estrutura, tipos de vegetação e substrato.

Art. 5º Ulterior a disposição regulamentar desta Lei definirá o detalhamento técnico da execução do “Telhado Verde”, em especial quanto ao tipo de vegetação a ser utilizada.

Art. 6º As despesas decorrentes da execução desta Lei correrão à conta de dotações orçamentárias próprias, suplementes, se necessário.

Art. 7º Esta Lei entra em vigor na data de sua publicação, revogadas das disposições em contrário.