

**Reutilización de aguas grises para combatir la isla de calor
OASIS URBANOS: espacios semi-exteriores climatizados
CAROLINA GONZALEZ VIVES, doctor arquitecto.**

El agua es el gas de efecto invernadero con mayor presencia en la atmósfera. La concentración de vapor fluctúa entre el 1 y el 4%, es muy superior en comparación a la proporción de 0,0383% de CO₂¹ y su incidencia esencial como termorregulador. En los ecosistemas con suficiente agua, Gran parte de la energía solar se disipa embebida en forma de **calor latente**, y se traslada con el movimiento de las partículas de vapor hacia las zonas altas y frías de la atmósfera². La repetición de este proceso convierte al vapor atmosférico en un gran almacén de energía térmica. En ecosistemas que carecen de agua, la energía solar se traduce en calor sensible, elevando las temperaturas durante el día. La ausencia de condensación no permite compensar las pérdidas por radiación de onda larga y el aire se enfría mucho más durante la noche, lo que conduce en las áreas desérticas a oscilaciones diarias de hasta 50°C.

Junto a la temperatura del aire que influye en el intercambio por conducción, el confort está condicionado por las temperaturas radiantes de las superficies y la humedad y velocidad del aire, que interfieren en la disipación de calor por la transpiración de la piel³. La carta bioclimática de Olgiay marca las condiciones de confort en espacios exteriores para cada localización y su posible extensión mediante refrigeración adiabática y ventilación⁴.

Bajo las nubes, La **CUBIERTA FORESTAL** forma una segunda cubierta de protección acuática frente a la radiación. Su funcionamiento es clave para la eficiencia de un paisaje, entendida como su capacidad para reciclar materia y gestionar los balances de energía. *En los ecosistemas de bosque se retiene el agua* en un ciclo hidrológico muy local. la vegetación funciona como una válvula reguladora de la transferencia de humedad entre el suelo y el aire, a través de la transpiración y la sombra que altera balances hidrológicos

¹ En "Land Mosaics", Richard Forman describe las transferencias de materia y agua entre ecosistemas mediante los grandes movimientos de masas de aire, que están trabajando como "coveyor belt".

² El calor latente de vaporización, varía con la temperatura y la presión, pero a 25°C y a 100kpa supone que la evaporación de 1kg de agua es equivalente a la disipación de 2243,7 kJ sin que se modifique la temperatura. Con la condensación se disipa la misma cantidad.

³ El concepto de **temperatura fisiológica equivalente**, resultante de combinar la temperatura del aire, la del suelo, la humedad y el viento, da idea del confort térmico real percibido en los espacios.

⁴ <http://habitat.aq.upm.es/boletin/n32/i1nehig.html>

y energéticos. Observando un entorno pequeño, un único árbol por ejemplo, se puede parametrizar su funcionamiento:

“...A standing tree with a crown of about 10 meters in diameter: On the crown of this tree, which has a surface area of 80m^2 , falls each day about 450 kWh of solar energy ($4\text{-}6\text{ kWh/m}^2$). Part of the solar energy is reflected, part is absorbed by the soil and part is converted into heat. If such a tree is well stocked with water, it evaporates (transpires) some 400 liters of water each day. For the transformation of water from a liquid state into water vapor, 280 kWh is consumed. This amount of energy thus represents the difference between the shadow of a tree and the shadow of a parasol with the same diameter. In the course of a sunny day, such a tree cools with a power equal to 20-30 kW, power comparable to more than 10 air-conditioning units. The tree is at the same time “fuelled” only by solar energy, is made of recyclable materials, requires a minimal amount of maintenance and emits water vapor that is regulated by millions of stomata which respond to the heat and humidity of the surroundings. The main thing is that the solar energy bound up in water vapor is carried away and is released upon its condensation in cool locations. It thus balances temperature in time and space, unlike a refrigerator or air-conditioner, which release heat into its nearby surroundings. A tree, unlike a refrigerator or air-conditioner, is also completely noiseless, absorbs noise and dust and binds CO_2 .”⁵

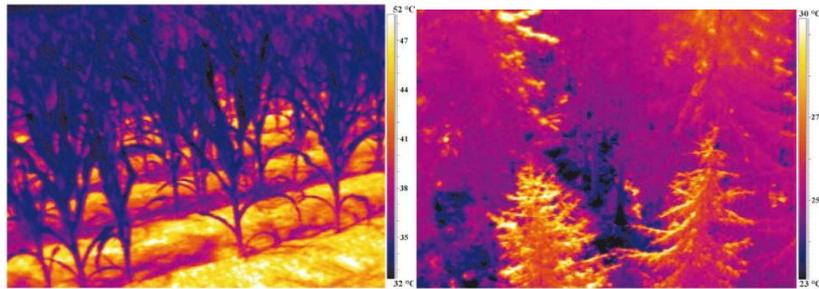


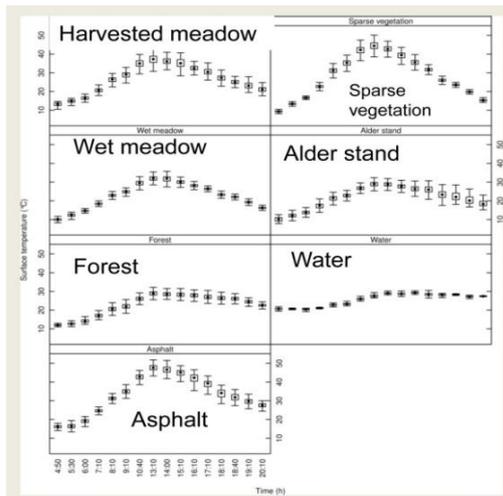
Fig. 4. Maize field and its surface temperature as seen by thermovision camera on 16 July 10 at 14:19 GMT+1 in the vicinity of the town of Třebon, Czech Republic. Fig. 5. Surface temperature of forest canopy as seen by thermovision camera on 13 July 2010 at 14:15 GMT+1 in Novohradské hory, Czech Republic.

3c Termografías de un cultivo de maíz y de un bosque de coníferas.

Su sección vertical está organizada en estratos múltiples según la penetración de la radiación, las temperaturas y humedades diferentes. Las capas superiores de vegetación xérica con albedos reducidos y temperaturas altas durante el día, frenan la radiación y contienen espacios profundos donde se producen efectos de **inversión térmica** que controlan el movimiento convectivo del aire y del vapor dentro y fuera de su espesor. Durante la noche, su enfriamiento rápido funciona como una *bomba biótica*, atractora de humedad, condensación y precipitaciones, que quedan almacenadas en su espesor. En estructuras vegetales simples, sin estratificación de sombra y sin inversión térmica, el suelo carece de protección frente a la radiación, se calienta y transmite el calor a la capa de aire próximo. Por convección el aire se eleva y arrastra hacia arriba el vapor, que emigra hacia ecosistemas más fríos. Esta es la diferencia fundamental entre campos de golf, cultivos agrícolas y ecosistemas vegetales autóctonos. La eliminación de la cubierta vegetal con su estructura vertical compleja, con espesores, altera los ciclos de agua cerrados a nivel local y las temperaturas, del aire y de las superficies. La pérdida porcentual de evaporación favorece la percolación y la escorrentía, lo que aumenta las pérdidas de materia orgánica y de agua.

⁵ KRAVCIK, Michal, (op. cit.)

Frente al comportamiento extensivo de la cubierta forestal en los paisajes húmedos, la **VEGETACIÓN DE RIBERA** concentra su operatividad hidráulica en líneas dentro de los paisajes secos. Además la especial localización de la evapotranspiración de las riberas en relación a la posición del agua, a los patrones de viento y a la topografía es clave para el funcionamiento espontáneo y el impacto de su efecto refrigerador.



2c? Jan Pokorny. Evolución diaria de las temperaturas de distintos materiales.

La influencia del agua en las relaciones entre materia y energía se puede analizar con más detalle a través de estudios realizados por [Jan Pokorný](#), que monitorizan la evolución diaria de temperaturas de superficies con distintas proporciones de humedad (agua, bosque, pradera húmeda, césped, suelos desnudos con poca vegetación y asfalto) y la del aire que tienen sobre ellas.⁶ Según sus datos el agua es la superficie más estable, mantiene su temperatura bastante constante a lo largo del día. Es la más fresca en los momentos de mayor calor del día porque tiene la máxima capacidad de evaporación. El bosque es también un espacio estable en cuanto a temperaturas, sin embargo la transpiración regula de otra forma las pérdidas de agua: al ser más limitadas durante el día su superficie se calienta más, sin embargo presenta mínimos más fríos en la noche, lo que lo convierte en superficie condensadora que recupera el agua perdida durante el día. Los espacios más despejados con poca o ninguna vegetación se calientan mucho más durante el día, pues toda la radiación se transforma en calor sensible. El asfalto, con albedo mínimo y totalmente deshidratado, presenta siempre las temperaturas máximas durante todo el ciclo diario. Estas curvas de evolución de temperaturas muestran las diferencias en el comportamiento de agua azul y agua verde, de evaporación y transpiración, en relación a la gestión de energía. El comportamiento de

⁶ HURYNNA, H. y Jan Pokorný, “Comparison of reflected solar radiation, air temperature and relative humidity in different ecosystems (from fish pond and wet meadows to concrete surface)”, en VYMAZA, J.(ed.) *Water and Nutrient Management in Natural and Constructed Wetlands*, Springer – Science Business Media pg. 308 – 326. 2010. También en POKORNY, Jan y Petra Hesslerová “Water and plants regulate temperature and local climate – a case studies from Třeboň Biosphere Reserve and Mau Forest in Kenya”

las dos praderas también pone de relevancia no solo la influencia de la disponibilidad de agua, sino también el espesor, que aporta sombra sobre el suelo y capas de aire con inversión térmica en el interior.

Mezclada con sólidos porosos, como en los **SUELOS HÚMEDOS**, aumenta la conductividad y la estabilidad térmica. El calentamiento del suelo depende de la radiación neta que llegue a la superficie, según factores materiales y de forma como el albedo, la orientación, la pendiente, la compacidad etc. Cuanto más densos y húmedos, mejor es la conducción del calor, mayor la profundidad que recibe energía y la inercia térmica, y menores las oscilaciones de temperatura, tanto de su masa como la del aire que está por encima. Durante los meses estivales, en los paisajes áridos la capa superficial pierde totalmente la humedad. Se calientan mucho en superficie y poco en profundidad, y pierde fácilmente su calor durante la noche, reduciendo su papel estabilizador. A profundidades superiores a 7m, la temperatura del suelo ya es estable a lo largo de todo el año, próxima a 14°C en latitudes como la peninsular, lo que permite utilizar su inercia térmica para absorber calor exterior. A partir de este punto las isopleas dibujan un incremento de temperatura perpendicular a la superficie, con gradiente geotérmico promedio de 33°C/Km. y un aumento de 1°C cada 30,3 metros de descenso, lo que sustenta el aprovechamiento de energía geotérmica e hidrogeotérmica. La temperatura del agua subterránea suele responder también a este gradiente. En acuíferos someros, la temperatura del agua es inferior a la de los cauces superficiales y más estable. Las aguas localizadas a más profundidad tienen temperaturas más elevadas.

El conocimiento de estos procesos termodinámicos contribuye a tener una perspectiva más completa de las interferencias de la edificación y la urbanización sobre la hidrología y del potencial de un proyecto que las controle con precisión. Favorecer paisajes humidificadores mediante la reforestación o como nuevos ensamblajes materiales tecnificados, requiere un análisis preciso de la termodinámica urbana y referencias e instrumentos de proyecto diferentes. La escasez supone siempre un desarrollo limitado: cuanto mayor la aridez, más localizada la humedad y el frescor.

El diseño del aire desde la influencia del agua forma parte de la búsqueda de nuevos equilibrios en las relaciones que la arquitectura establece con el binomio masa-energía. Acciones como la formación de espesores de sombra, efectos de inversión térmica, geometrías de confinamiento, superficies frías condensadoras o la incorporación de materiales húmedos, pueden introducir cambios en los ecosistemas urbanos para afinar su funcionamiento hídrico y energético. La intención inicial es aproximarse a una ligereza eficiente a través de la inercia térmica de las masas de agua, de su capacidad para almacenar calor y de gestionar energía con los cambios de estado. Estas condiciones físicas convierten a las instalaciones hidráulicas en un material de construcción interesante, capaz de sustituir a otros al tiempo que realiza sus funciones iniciales en ciclos lo más cerrados posibles.

La climatización de los oasis históricos y otros espacios básicos de control de la evaporación.

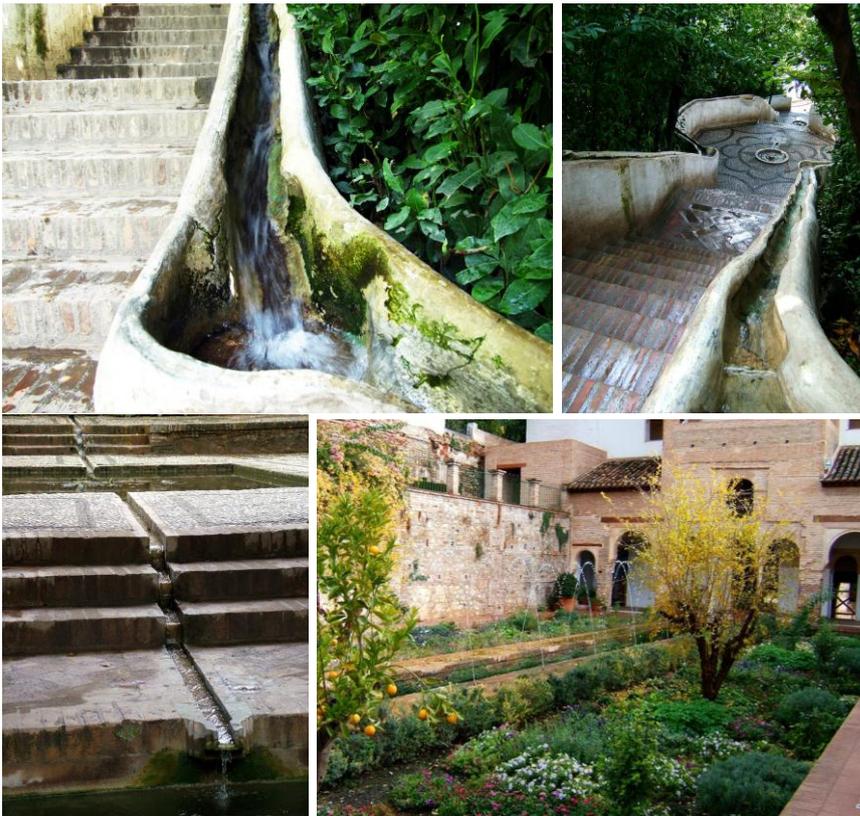


3c Oasis en el desierto de Sahara, protegido por una duna artificial. Imagen de la atmósfera interior del palmeral de Elche.

La gestión cuidadosa de la evaporación y de la humedad ha sido esencial para la subsistencia de las culturas áridas tradicionales. Acciones sencillas sobre el paisaje, basadas en el conocimiento intuitivo de principios de dinámica de fluidos y de termodinámica, han conformado espacios climatizados exteriores o semi-exteriores, aptos para la vida de plantas y de personas. Los **OASIS** tradicionales de las áreas desérticas son soluciones con el mínimo consumo de agua y de energía, en condiciones de partida de extrema escasez. Son ecosistemas artificiales formados como síntesis de mecanismos de condensación y drenaje cuya **climatización sin energía** tiene que ver con la forma, con el comportamiento termodinámico de los materiales, principalmente el agua, y con la integración de sistemas vivos como máquinas que funcionan con energía solar para realizar un trabajo. El diseño de la forma se centra en el control de la radiación y de la exposición al movimiento del aire a través del confinamiento, que permiten mantener atmósferas localizadas con mayor humedad y menor temperatura que su contexto próximo. La construcción de paramentos horizontales o verticales, minerales o vegetales, sobre los mecanismos de concentración de humedad y agua en el suelo completa el proyecto de este paisaje agrícola con las calidades del aire. La aridez es interrumpida por situaciones singulares que desencadenan dinámicas favorables, ecosistemas autopoieticos capaces de auto producirse y perpetuarse en contextos hostiles. La propia palmera proporciona su protección frente al sol, concentra el vapor de agua debajo y produce la materia orgánica de la que se nutre el suelo. La cubierta que crea el palmeral facilita las condiciones ambientales y la creación de suelo necesario para la agricultura y la supervivencia en el desierto de otras especies más frágiles, reproduce la inversión térmica de los ecosistemas de bosque, que retiene el aire fresco interior bajo la capa superior xérica y caliente. Las dinámicas de formación de dunas o la excavación y el modelado del suelo se incorporan también como elementos de proyecto. Por sus

geometrías cóncavas además de funcionar como formas de convergencia de escorrentía, son elementos de confinamiento, protegen el agua de la evaporación al limitar la entrada de viento y aportar sombra.

Los oasis urbanos de *Al Ain*, de *Shybam* o de *Elche* completan su gestión hídrica de concentración de agua con estas envolventes discontinuas y permeables que controlan el intercambio y las calidades del aire. En Elche por ejemplo, la disposición de las palmeras es perimetral en torno a las pequeñas parcelas, formando al mismo tiempo una semi-sombra y un parapeto frente al viento, que define también los límites de propiedad del suelo. El patrón de formas rectangulares definida por las plantaciones se superpone a los trazados de las redes de acequias que parten del Vinalopó buscando la pendiente mínima. En Al Ain la posición central y rehundida de los palmerales, forma una cubierta horizontal más densa y continua, con una diferencia de temperatura muy notable con el resto de la ciudad, que se convierte en un nodo distribuidor de aire fresco y húmedo. Mediante conducciones soterradas activadas por chimeneas solares, el aire del oasis se succiona hacia el interior de las viviendas.



Cuidado que están recortadas..2c todo el pack junto Suelos húmedos en la Alhambra. Granada.

El **PATIO-JARDÍN ISLÁMICO** es una evolución sofisticada del paisaje agrícola del oasis a escala de edificación. Se sirve de estas técnicas proyectuales para formular un espacio

de estancia cuyo papel primordial se centra en las calidades térmicas, formando un foco de frescor que ordena a su alrededor el programa de habitación⁷. Esta posición como centro climatizador, similar al del fuego y de la chimenea para los climas fríos, tiene una penetración muy profunda en la cultura, con un papel simbólico que enlaza el oasis con el referente último del paraíso. En esta solución son fundamentalmente los paramentos verticales perimetrales, los que acotan el espacio y aíslan este patio frondoso del contexto árido circundante. El recinto fortificado de la *Alhambra* en *Granada* culmina el proceso de perfeccionamiento tipológico del patio jardín para un paisaje semiárido. Su interior se organiza por adición, formando un conjunto con variaciones en el formato, la escala y las posiciones relativas. Como una malla tridimensional se va deformando desde la cota más alta hacia los laterales: más cerrados y pequeños en la parte central, se abren paulatinamente hacia un sistema de terrazas a medida que los desniveles de la ladera empiezan a acentuarse. Las formas y materiales de los patios y sus relaciones espaciales son muy variadas, con calidades y densidades de humedad y sombra específicas. Una conducción lineal de abastecimiento formado por acueductos y sifones traslada agua hasta las albercas de almacenaje en parte superior. El deslizamiento por gravedad organiza la disposición de las piezas, atravesando patios abiertos y cerrados y sus distintas atmosferas interiores y exteriores. El plano del suelo, diseñado con una topografía tridimensional propia que canaliza el agua, adquiere un espesor a veces de agua, a veces de vegetación, que forma una alfombra húmeda y evaporadora. La sombra y el confinamiento se confían a los perímetros construidos y a la presencia de algunos árboles⁸.

Estas soluciones espaciales han sido el punto de partida para proyectos recientes como la *Expo '92 de Sevilla* o *Masdar city* en *Abu Dabi*. Oasis y patios-jardín son tipos hidráulicos sencillos cuyas relaciones entre inercia térmica, sombra, humedad y confinamiento han ido adoptando distintas configuraciones en la urbanización de los paisajes áridos. Son un punto de partida útil para un proyecto alternativo de climatización urbana.

⁷ Lisa Heschong describe la génesis espacial de este tipo en su libro "Thermal Delight in Architecture"

⁸ La bibliografía específica sobre la Alhambra es muy extensa y aborda un estudio en profundidad desde distintos puntos de vista. Ver por ejemplo el trabajo de Antonio Malpica y Leopoldo Torres Balbás.

Isla de Calor y aridez ambiental: interferencias del balance hidrológico en la termodinámica urbana.

En la ciudad las transformaciones ambientales completan una versión particular del fenómeno de desertización del paisaje. Las características materiales y la geometría específicas de la edificación, la utilización masiva de combustibles fósiles, la sustitución de la evaporación por climatización mecánica y la disipación del aire viciado de forma caótica han impedido los vínculos favorables entre materia y energía, agua y aire y han resultado ser herramientas desconocidas pero eficaces para construir una nueva atmósfera. La adición sistemática de acciones pequeñas produce grandes cúpulas de aire alterado, que flotan ancladas sobre los ámbitos metropolitanos. La escala de arquitectura ha ido a la vez construyendo objeto y contexto, interior y exterior.

El ámbito de influencia de las **ISLAS DE CALOR URBANAS**, cuya disposición concéntrica de isotermas se corresponde con la formación de las cúpulas de aire caliente, con valores crecientes de temperatura a medida que nos introducimos en las áreas más centrales y densas, con diferencias máximas de hasta 8°C. .

En el interior de estas islas la relación entre aire y agua sigue patrones especiales. Aunque la ausencia de vegetación y agua superficial se ve parcialmente compensada por la evaporación de parte del abastecimiento en la transpiración de cuerpos y máquinas, el borrado casi total del agua y de sus espacios produce entornos con niveles de humedad mas bajos. Las isotermas crecientes suponen un aumento en los valores de evapotranspiración potencial que establecen una correlación negativa entre intensidad de la isla y humedad relativa. La reducción de la evapotranspiración real⁹ y de calor específico del soporte mineral traduce la radiación en la formación de atmósferas calientes y secas.¹⁰ Además, la emisión de onda larga produce corrientes de aire caliente ascendente que facilitan las pérdidas de vapor, e inhiben la condensación y la atracción de frentes atmosféricos de aire húmedo. El incremento en las temperaturas tiene un gran impacto en el consumo de energía destinado a refrigeración¹¹ y en la contaminación del aire, tanto por el aumento de emisiones de las centrales de energía, en forma de dióxidos de sulfuros, monóxido de carbono, los Nox y las partículas volátiles, como por la modificación de las concentraciones y distribución de contaminantes debidas a la

⁹La evaporación se reduce un 19% cuando el 25% del suelo es impermeable, un 50% cuando la superficie es del 38% y cerca del 75% cuando es del 59%. Si hay vegetación, como resultado del mecanismo de transpiración de las hojas, el flujo de agua-vapor sigue siendo alto a pesar de que los suelos carezcan de humedad.

¹⁰En los ecosistemas rurales, con suelos no sellados y húmedos, el **flujo turbulento** que suma los calores sensible y latente, es proporcionalmente más reducido respecto a la radiación neta, por la capacidad de absorción de energía de la tierra. El **índice de Bowen**, que refleja la relación entre calor sensible y calor latente, para áreas templadas oscila en torno al 0,4-0,8. En los ecosistemas urbanos densos los valores son mucho más elevados.

¹¹En los estudios realizados en diferentes ciudades se documenta que el aumento de temperatura debido a la ICU provoca un aumento de consumo de 1,5-2% por cada grado Fahrenheit. Ver para el caso de Madrid el estudio de MARTILLI, Alberto, donde se especifica que el aire acondicionado supone una subida de 2°C en la temperatura general.

aceleración de las reacciones químicas que provoca el calor, con elevadas concentraciones de ozono troposférico O₃¹² y del *smog fotoquímico* como consecuencia. La desertización del perímetro suburbano, formado por descampados sin vegetación, aporta gran cantidad de polvo y partículas suspendidas en el aire, que se suman a los aerosoles de origen antropogénico. No hay certezas sobre el comportamiento exacto de estos componentes, si están funcionando como núcleos de condensación para la formación de las gotitas de lluvia, o por el contrario dificultan la precipitación sobre las áreas urbanas.¹³

Al superponer la cartografía higrótérmica de las islas sobre mapas de hidrología superficial y de patrones de viento se visualizan asociaciones directas entre ellos que deforman la geometría cupulada a nivel mesoescalar. El tamaño, pero sobre todo la localización respecto a la topografía, la dirección del viento y la forma urbana determinan el impacto de las masas evaporadoras en el mapa de isoterma. El ámbito de influencia del aire enfriado (*Park Cool Island*) en condiciones inestables puede tener un radio de acción de 500m. En atmósferas nocturnas más estables, la sombra de los ecosistemas fuente toma formas más estrechas y alargadas, alcanzando hasta 2000m.¹⁴ Los **CAUCES SUPERFICIALES** de primer y segundo orden amplifican el alcance de estas transferencias gracias a las formas del relieve topográfico, que conectan el ámbito urbano con el paisaje regional donde se localizan las grandes áreas forestales. El aire fresco y frío se canaliza a través de la masa construida gracias a su sección de canuto, recorriendo distancias muchos mayores e incorporando además la transpiración que se produce a lo largo de la línea. Por este motivo la vegetación de ribera siempre es más eficiente que cualquier otro tipo de parque, donde la penetración del frescor está generalmente más obstaculizada por la edificación próxima. La integración de la transpiración con la fábrica urbana, formando **TEJIDOS CON ARBOLADO** extensivo y tipologías edificatorias con ocupación en planta y densidades menores, es otra fórmula que altera la temperatura a gran escala, creando áreas con atmósferas más húmedas y frías.

La capa de *dosel urbano* bajo la línea de cornisa tiene su propio campo de flujos, determinados por la interacción con los accidentes locales, que incluye un número ilimitado de microclimas en diferentes configuraciones urbanas.

Los patrones de distribución de la **humedad ambiental** establecen en climas secos una relación inversa con las temperaturas. A medida que avanza el día, o el verano, o la

¹² SANTAMOURIS, Mat. (ed.) "Energy and Climate in the urban built Environment" Ed James&James. London, 2001

¹³ En el mapa de evapotranspiraciones reales elaborado por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, aparece dibujada la huella de la ciudad y todo su ámbito metropolitano como zona que apenas alcanza valores mínimos http://servicios2.magrama.es/sia/indicadores/mapa_indic.jsp

¹⁴ ERELL, y otros, (op. cit.)

proximidad al centro de la isla, el aire calentado por la tierra asciende arrastrando el vapor hacia arriba, incrementando la sequedad. También dependen de la exposición a radiación y a viento, del grado de impermeabilidad y del nivel de cobertura vegetal. En la ciudad compacta el núcleo básico de frescor es el **PATIO**. Protegido por la sombra propia de la edificación y por su perímetro cerrado, aparece en las termografías urbanas como una superficie claramente más fría que las cubiertas y pavimentos exteriores.

El confinamiento de los **CAÑONES**, con radiación y movimiento de aire reducidos, genera otro tipo de espacios potencialmente frescos en ausencia de tráfico rodado. La orientación, proporciones y materialidad marcan patrones para interferencia del agua y del vapor.

El desarrollo de **modelos** para representar fenómenos termodinámicos y meteorológicos ha permitido explicar mejor la complejidad de los procesos y cambiar la forma de imaginar la ciudad, que se aparta de metáforas maquínicas y de criterios exclusivamente formales, para entenderse a través de flujos y parámetros, ecológicos, hidrológicos, económicos, etc. Para las mediciones generales de la *Urban Boundary Layer* se emplean sensores colocados en edificios altos, medidores de altura con globos y observaciones aéreas, como radiosondas, sistemas Sodar, Rass Lidar o radiómetros de microondas. Para interpretar y completar la información recogida de forma más precisa se utilizan modelos meteorológicos mesoescalares (MMs) acoplados a parametrizaciones detalladas de la *Urban Canopy Layer*. Estas descripciones de la capa bajo rasante se obtienen a través de modelos de energía de edificios (BEM)¹⁵. La coordinación entre modelos de edificación, cañones y atmósfera urbana general permite cuantificar el impacto de las acciones sobre el espacio público y la edificación en la isla de calor y el clima general de la ciudad. Mediante estos acoplamientos de modelos se puede medir por ejemplo la influencia de los sistemas de aire acondicionado en la temperatura general, las relaciones que existen entre el consumo de energía y las condiciones meteorológicas o la eficacia de cambios en el albedo de las cubiertas y otras medidas para reducir la intensidad de la isla. Este método se ha utilizado sobre Madrid con condiciones atmosféricas favorables para una intensidad de isla elevada (5-6°C). Los datos numéricos de los modelos se comparan con las mediciones meteorológicas y sobre las diferencias se concluye que el flujo de calor producido por los aparatos de aire acondicionado es responsable del incremento de temperatura de hasta 2°C, y que los cambios de albedo y de materiales de cubierta pueden reducir el consumo de energía en un 4,8% y 3,6% respectivamente, con la correspondiente reducción en las isothermas. Este tipo de estudios no considera la relación entre balance hidrológico y balance de energía a ninguna escala, mediante evaporación o transpiración, excepto en el propio funcionamiento del aire acondicionado o en las grandes zonas verdes, donde el modelo climático WRF¹⁶ funciona acoplado al modelo *Noah land surface*, que incluye la humedad del suelo y el agua almacenada en la cubierta vegetal. Sí que existen sin embargo otros sistemas para anticipar estas interferencias en ciudades del oeste americano y en Australia, que se describen en el epígrafe siguiente y se toman como puntos de partida para establecer criterios de diseño.

La descripción de las condiciones del balance hidrológico y energético a escala de cañón y microescala se realizan mediciones in situ y modelos físicos y digitales. Los modelos CFO, *computational fluid dynamics*, tienen resolución muy alta, del orden de un metro y cubren dominios de 1km² como máximo. Describen las interacciones termodinámicas y fluidodinámicas entre superficies minerales, plantas y aire: el movimiento del aire en y alrededor de los edificios, la dispersión de contaminantes, efectos de viento en la lluvia y el de la vegetación en microclimas. La dificultad de estos modelos está en describir con exactitud las condiciones de contorno y los flujos, para lo que se utilizan cuadrículas

¹⁵ Ver por ejemplo el trabajo de Alberto Martilli en el CIEMAT.

¹⁶ *Weather Research and Forecasting (WRF) model*.

tridimensionales. En los estudios de dispersión de contaminantes elaborados con CFO¹⁷, las partículas contaminantes son trazadores útiles para describir el movimiento de aire, la permanencia del vapor de agua dentro de los cañones y la mezcla de aire con la UBL, en un área definida para diferentes condiciones de viento.

Las lecturas de las dinámicas físicas y ecológicas, centradas en procesos de transformación de materia y flujos de energía, pasan por encima de las clasificaciones habituales centradas en el grado de artificiosidad, en la tipología de trazados y construcciones o en el programa. Sus parámetros son válidos para entender de forma integral la totalidad del territorio. Estos modelos hacen posible diseñar las calidades higrotérmicas de interiores y exteriores desde las condiciones de forma y materialidad de la arquitectura. Sin embargo, adaptar las herramientas y protocolos disciplinares para trabajar sobre fenómenos dinámicos es un esfuerzo enorme todavía pendiente, ligado a la propia concepción de la arquitectura como algo estático y permanente, pensado y representado mayoritariamente a través de dibujos fijos.

Es necesario un esfuerzo de aproximación de las disciplinas de diseño hacia la complejidad de los fenómenos, con el objetivo de elaborar una **cartografía dinámica**, basada en la geolocalización de parámetros de agua y energía térmica. Sobre el plano mineral, de topografía y edificación, las dinámicas del agua líquida, los patrones de evapotranspiración y condensación y los movimientos de aire: vientos dominantes regionales, corrientes locales y brisas de campo apoyándose en los cauces y las líneas de ribera, condicionan el balance energético, las temperaturas del aire y de las superficies y marcan las condiciones de partida para el diseño de la refrigeración adiabática urbana.

¹⁷ SANTIAGO, Jose Luis, y otros "A Computational Fluid Dynamic modelling approach to assess the representativeness of urban monitoring stations" P. 61–72 en *Science of The Total Environment*, Volumes 454–455, 1 June 2013,

El estudio parte de la modelización RANS-CFD (computational fluid dynamics simulations based on Reynolds-Averaged Navier–Stokes equations) basada en mediciones a lo largo de 7 meses para valorar la representatividad de los datos de las estaciones urbanas de medición de contaminantes, y complementar su información. Se realizan varias simulaciones según las condiciones de viento más frecuentes, incorporando información sobre tráfico habitual, etc. Como resultado se obtienen mapas de concentración media de contaminantes con buena resolución para diferentes intervalos de tiempo. Los mapas permiten visualizar con precisión la localización de las partículas, que como trazadores dibujan el movimiento del aire en relación a la forma de la edificación para dos espacios concretos de las ciudades de Madrid y Pamplona con dimensiones de varios cientos de metros. Las diferencias entre espacios próximos en las concentraciones eran muy elevadas, resultado de las turbulencias del aire y los distintos grados de renovación.

Antecedentes en el proyecto de arquitectura.



2c Palmtree Island (Oasis). Nueva York, 1971. Haus Rucker Co.

Las atmosferas que proponen en arquitectura desde la modernidad están construidas con un aire muy luminoso, generalmente soleado, transparente y totalmente seco, acordes con los principios de desconfianza hacia el agua, la humedad y la sombra que caracterizan al Movimiento Moderno. La tecnología de extracción y renovación se suma a la transparencia de las envolventes y a la consistencia satinada e hidrófuga de los espacios, incorporando un movimiento continuo y la deshidratación del aire para asegurar el ambiente considerado óptimo para la salud. En las últimas décadas el interés por cuestiones medioambientales ha llenado los planos de proyecto de flechas y vectores que describen los fenómenos termodinámicos y fluidodinámicos, trasladando esta fascinación por la visibilidad y por lo atmosférico al ámbito de lo cuantificable y de lo útil.

Envolventes transparentes, interiores ilimitados y nubes densas, forman un patrimonio proyectual interesado directamente por el aire, que contribuyen a trascender la eficiencia técnica para involucrarse en la producción cultural y política a través de la arquitectura. Pero sus atmosferas luminosas y secas están ideadas para otros climas. El proyecto ambiental de los paisajes áridos necesita además sumar otros referentes, que proceden de culturas tecnológicas más distantes en el tiempo, pero más próximas a la observación e integración del paisaje. La idea de **lo umbrío** por ejemplo, habla de aires densos que surgen de combinar humedad y sombra. Es el aire de los interiores forestales o de los espacios formados en el espesor del suelo, que ha sido parte integrante de la historia de la arquitectura hasta la modernidad. En la ciudad hidrófuga se corresponde con errores del sistema, espacios subterráneos, sótanos y alcantarillas, percibidos como situaciones extrañas, incómodas y consideradas partes indeseables del espacio urbano. Sin embargo el escenario de calentamiento y desertización requiere asociaciones de imágenes diferentes. El **OASIS** histórico de las tierras áridas enlaza con la tradición constructiva de tipos que como el umbráculo forman parte de una segunda forma de operar, basada en la escasez de recursos y en alianzas con el paisaje. Con el paraíso como su referente último, se suma a las soluciones tecnificadas y ligeras para aportar un funcionamiento menos intenso en energía, integrado en las dinámicas ecológicas próximas,

constituyendo un marco de partida más completo y útil para el proyecto. A diferencia de las fachadas estancas, su envolvente es un espesor discontinuo de masa vegetal y tierra permeable a los flujos ecológicos que forma un espacio exterior aunque confinado y controlado térmicamente, cuya climatización sin energía responde a criterios formales y materiales con la integración de sistemas vivos. La asociación espontánea entre lo público y el espacio exterior propia de los climas templados requiere un esfuerzo mayor en estos paisajes calientes: el inmenso placer de la vida al aire libre y la mayor libertad de acción que conllevan los exteriores se hacen posible a través de la gestión de los ciclos de aire y agua, de forma similar al papel que ha jugado el aire acondicionado en el protagonismo de los grandes interiores comerciales

Los epígrafes siguientes desarrollan el proyecto para el caso de paisajes semiáridos con atmósferas secas, similares a las ciudades del interior peninsular basándose en la reutilización de las aguas locales.

Se propone un escenario diversificado definido por la hidrología y la contaminación aérea, con líneas de máxima ventilación sobre las cubreras, canales preferentes de entrada y distribución de aire fresco en las vaguadas y zonas protegidas como islas donde desarrollar microclimas controlados. La recuperación de los vacíos lineales, con acuíferos subálveos y agua en superficie para regar vegetación de ribera tiene un gran impacto sobre el clima. Su forma y localización amplifica al máximo la sombra de frescor, que se suma a la entrada de aire fresco exterior. Esta **RED DE CANALES** de agua y aire frío sobre las cuencas locales define un nuevo tablero de juego, basado en la organización espontánea de la humedad. El aporte de las aguas grises resuelve la reducción de caudal debida al estiaje y mantiene los niveles de evaporación cuando la refrigeración es necesaria. La forma y localización de estos canales en relación a los movimientos de aire de carácter orográfico, la jerarquización paulatina del tráfico rodado y la definición de canales de renovación y ventilación máximos preferentemente asociados a las cubreras, cuentan con antecedentes actuales, como los propuestos en Stuttgart¹⁸. Situada en un valle, esta ciudad ha tenido tradicionalmente problemas de polución ambiental derivados de la intensa actividad industrial. Con el objetivo de acelerar la dispersión de contaminantes se han trazado sobre la ciudad vacíos lineales como corredores metropolitanos de aire limpio sobre los que ni si quiera se permite vegetación alta, con cambios en las mediciones de calidad del aire muy importantes.

La jerarquización del viario y la disipación ordenada de aires viciados desde el plano de cubierta posibilita formar un conjunto de **ISLAS** con poca contaminación con un clima más estático, divididas por líneas de ventilación máxima en cubreras y conectadas por los movimientos de aire frío de vaguadas. Cuando la trama urbana es densa, con cañones y patios profundos, la sombra propia es muy favorable. Cuando la edificación es aislada, con menor densidad como áreas de bloque abierto o piezas pequeñas, la construcción de una marquesina verde, discontinua y regulable a distintas condiciones, protege el suelo y la arquitectura y genera la inversión térmica necesaria para preservar el frescor. Cuanto más árido sea el ámbito de partida, más cerradas aparecerán las envolventes.

¹⁸ KAZMIERCZAK, A. y Carter, J "Stuttgart: Combating Heat Island and poor air quality with green aeration corridors". En *Adaptation to Climate Change using green and blue infrastructure. A database of case studies*. 2010.

Criterios que provienen de mediciones y modelos.

Esta propuesta y los criterios posteriores sobre formas espaciales y posiciones relativas del agua se apoyan en mediciones de experiencias previas y en modelos y simulaciones digitales que anticipan situaciones nuevas, de los que se citan aquí solo los más relevantes. Aunque los resultados de estos estudios están ligados a las condiciones específicas de cada localización, por su claridad y su coincidencia se consideran válidos para identificar criterios de diseño generales.

Un estudio realizado en *Beijing, China*¹⁹ analiza una serie de masas de agua superficiales para establecer relaciones entre las dimensiones de la superficie, la posición relativa en la ciudad, la intensidad de la refrigeración y su área de influencia. La ciudad tiene un clima continental con inviernos fríos y secos y veranos calurosos, caracterizados por las lluvias monzónicas. Por el grado de humedad relativa estival, la evaporación tiene menos recorrido que en climas secos. Las curvas de isoterma que resultan de las monitorizaciones siguen un patrón aproximadamente concéntrico alrededor del agua, con un punto de inflexión que en la mayoría se encuentran a menos de 1km de distancia, a partir del cual el efecto es menor o desaparece. Los valores de descenso de temperatura oscilan entre 1 y 3°C. Según el estudio, los factores que influyen en la intensidad y en la expansión de la sombra del agua son la dimensión y la regularidad de la forma, la proximidad al centro de la ciudad que se traduce en un mayor grado de aridez ambiental, y la permeabilidad al aire de la fábrica urbana próxima que marcará la penetración del frescor en el interior de los cañones. El estudio demuestra con números la eficiencia de refrigeración de las masas de agua, y concluye con la propuesta de masas de escala reducida y distribuida en la ciudad. Es especialmente interesante observar que a mayor aridez y más elevadas temperaturas, más eficiente el rendimiento.

Tel Aviv, en Israel, con un clima árido próximo a la costa, tiene temperaturas y humedad relativa elevadas. En su área urbana se han analizado de manera pormenorizada los procesos de refrigeración y sus variaciones a lo largo del día, según cambian los ratios de evaporación y transpiración, la humedad ambiental y las temperaturas del agua verde y azul. Las conclusiones de las monitorizaciones ratifican las diferencias entre evaporación y transpiración: A diferencia de los parques cuyo efecto sobre todo es de enfriamiento nocturno, el frescor de las masas de agua es más pronunciado durante el día. Por su inercia térmica mantienen temperaturas muy constantes a lo largo del ciclo diario, aumentando la diferencia con las superficies próximas durante las horas de sol, con radiación de onda larga y flujo de calor sensible comparativamente menores. Por su capacidad calorífica, la absorción de energía puede alcanzar el 80% de la radiación, a costa de la reducción del flujo total de calor, sin alterar significativamente la temperatura del agua, si la profundidad es suficiente. En láminas más superficiales, el uso de surtidores y chorros (gruesos) y la sombra contribuye a mantenerla estable. Durante la noche, la superficie del agua está más caliente que el aire sobre ella, pero por la evaporación sigue enfriando. Sin embargo el aumento de humedad relativa puede elevar

¹⁹ SUN, Ranhao "How can Urban Water Bodies be Designed for climate adaptation?" p.27–33 en *Landscape and Urban Planning Volume 105, Issues 1–2, 30 Marzo 2012, ed. ELSEVIER.*

el nivel de stress térmico, aunque este posible efecto es siempre mucho menos probable cuanto más seco es el clima.²⁰

El efecto refrigerador de la gestión de escorrentía mediante SUDS ha sido monitorizado en localizaciones áridas como *Monash*, en Australia. Las líneas de agua, los sistemas filtrantes y depuradores construidos en barrios residenciales además de su función principal tienen también un efecto refrigerador por la evaporación, que se han cuantificado en un 30% del volumen de agua.²¹

El comportamiento termodinámico de la cubierta se estudia en un experimento realizado en *Ben Gurion University of the Negev*²², en Israel, donde se monitorizan seis configuraciones espaciales diferentes en un patio, con dos tipos de suelo: pradera verde y superficie pavimentada y tres tipos de cubierta: abierto, toldo textil o cubierta arbolada. Las condiciones climáticas y paisajísticas son las propias de una región árida y seca, con temperaturas elevadas y pluviometría y humedad relativa muy bajas. Se miden temperaturas del aire, temperaturas de las superficies y humedades relativas obtenidas dentro de los patios para cada combinación, aportando valores del rendimiento, según el impacto del consumo de agua en la sensación de confort. Las conclusiones del experimento cuantifican con precisión científica la eficiencia de disposiciones combinadas de evaporación y sombra, que son la base del oasis tradicional. La formación de sombra para proteger de la radiación resulta ser la medida más efectiva. Reduce sobre todo la temperatura de las superficies, paredes y suelos. Las cubiertas no vegetales, aunque aumentan la temperatura del aire, siempre contribuyen a mejorar el confort al bloquear la radiación, reduciendo la temperatura de las superficies que quedan debajo y minimizando sus pérdidas de agua. Las cubiertas vegetales funcionan mucho mejor en relación a la temperatura del aire, porque son transparentes a la disipación de calor en forma de onda larga que proviene del suelo. Por este motivo las directrices para la construcción de sombras de la Expo'92²³ sugerían sistemas de capas fragmentadas y superpuestas, de forma que unas dieran sombra a otras y simultáneamente se permitiera la salida de aire caliente y ondas radiantes. La combinación de cubierta vegetal con pavimento verde es la que mejor se comporta, con un impacto en la temperatura del aire hasta dos grados. Por otro lado se comprueba que el comportamiento del césped es pésimo, muy consuntivo sin apenas refrescamiento.

²⁰ SHASUA-BAR, Limor.

²¹ COUTTS, Andrew M. y otros. (op. cit.).

²² SHASHUA-BAR, Limor, y otros: "Water use considerations and cooling effects of urban landscape strategies in a hot dry region". *Blaustein Institutes for Desert Research, Ben Gurion University of the Negev, Israel. Presentado en The seventh International Conference on Urban Climate. July 2009, Yokohama, Japan*

²³ GUERRA MACHO, J.J. y otros "Guía Básica para el Acondicionamiento Climático de Espacios Abiertos" *Secretaría General Técnica del CIEMAT Madrid 1995.*

Uno de los trabajos más interesantes se centra en la simulación de modificaciones de densidad de construcción y densidad de vegetación en *Phoenix, Arizona*²⁴, con el objetivo de cuantificar las mejoras ambientales de distintas estrategias de planeamiento y diseño urbano. Situada en el desierto de Sonora, la ciudad tiene un clima árido, con temperaturas superiores a 35 grados durante más de una tercera parte del año, humedad relativa mínima y precipitación anual media de 20mm. En estas condiciones de extrema escasez de agua, la eficiencia de la refrigeración respecto al consumo de agua es especialmente importante. Un modelo simple de flujos de calor en áreas urbanas llamado LUMPS (*Local-Scale Urban Meteorological Parameterization Scheme*), se utiliza para medir la temperatura y evaporación en diez tramos del centro urbano que incluyen áreas industriales sin vegetación y áreas residenciales con vegetación méxica y xérica. La premisa básica de este programa es que los flujos de calor se pueden modelizar partiendo de datos sobre la radiación neta, sobre la materialidad de las superficies y sobre su morfología, a través de parámetros como la rugosidad y las proporciones ancho-alto, junto con datos de mediciones meteorológicas estándar de temperatura, humedad, velocidad de viento y presión. Con esta información el programa da balances de energía con calor latente, calor sensible, almacenaje de calor y radiación neta por horas en unidades de vatios/m². Los valores de calor latente se pueden traducir fácilmente a consumos de agua.

Se proponen tres escenarios de transformación para simular las condiciones ambientales que surgirían como consecuencia: el primero aumenta la densidad de la construcción, el segundo incrementa la vegetación y el tercero la reduce dejando el suelo expuesto. En el primer escenario, al aumentar la densidad un 10%, se observa que aumenta ligeramente la evapotranspiración en todos los tramos objeto de estudio y el consumo de agua, en torno a un 2,6%. El aumento de rugosidad en la superficie urbana da lugar a mayor proporción de calor latente y por tanto un aumento de las pérdidas de agua y una reducción en el calor almacenado en los suelos. Con la misma fracción de agua, la reducción de suelos y superficies impermeables reduce la temperatura hasta casi medio grado. En el segundo escenario, al aumentar un 20% la vegetación se incrementa significativamente la evaporación y el consumo de agua, y se mejora sobre todo la refrigeración nocturna. La mejora más significativa en las temperaturas se da en las áreas que estaban menos vegetadas y aparece una medida óptima de evapotranspiración para esa configuración de edificación, porque incrementos posteriores en el consumo de agua no tienen la relación lineal con la refrigeración. El aumento de densidad en las zonas con vegetación tiene un comportamiento similar. Parece que es la proporción adecuada de vegetación la que influye, no tanto la densidad. En la tercera opción, la desaparición de áreas de vegetación a favor de suelos desnudos da lugar a reducciones en el consumo de agua pero incrementos mucho mayores de temperatura nocturna, excepto en las áreas que contaban con mucha vegetación, donde la reducción porcentual ha sido la misma, pero sigue habiendo suficiente fracción verde.

²⁴ BRAZEL Anthony y otros "Mitigating Urban Heat Island Effects with Water- and Energy-Sensitive Urban Designs" ponencia para congreso. Sustainable Urban Design University of Utah, Salt Lake City, UT.

Estos estudios, realizados en climas desfavorables por su aridez extrema o por la presencia de humedad que dificulta la refrigeración adiabática, cuantifican con precisión la influencia del agua en el clima urbano y aportan criterios de forma, posición y materialidad para organizar este archipiélago climático. La creación de sombra es la acción más importante. Reduce ganancias de radiación durante el día, protege el agua y mejora las condiciones del aire. Es mejor que sea vegetal y permeable a la radiación de onda larga, incluso regulable, móvil, para poder retirarla por la noche y facilitar la disipación. Las acciones en áreas muy secas, con suelos impermeables y poca evaporación presentan las mejoras más notorias, aunque existe también un límite a partir del cual la relación entre evaporación y refrescamiento empieza a reducirse. El efecto refrigerador de agua azul y agua verde es complementario en el ciclo diario, por lo que puede aparecer combinado, y es además localizado, por lo que las acciones tienen que ser distribuidas.

Cuerpos evaporadores.

Envolventes transpirables y gradientes de frescor.

¿Cómo organizar la presencia del agua dentro de estas islas climáticas? ¿Qué estructura ambiental se puede proponer para el proyecto atmosférico de la ciudad? ¿Qué ensamblajes entre edificación, redes y sistemas vivos se pueden identificar, tipificar, con un comportamiento eficiente?

La idea de reforestación extensiva, al pasar por encima de las áreas urbanas, encuentra conexiones formales entre las secciones forestales y los cañones que son fáciles de imaginar. El nuevo plano de sombra propuesto, como la cubierta arbórea o el palmeral del oasis, incorpora un primer **gradiente vertical** de penetración de la radiación, de intensidad de la luz y densidad del aire en la sección de los vacíos urbanos. Las capas xerófilas más altas forman una protección frente a la radiación que se extiende sobre edificación y espacios abiertos, bajo la que se desarrollan especies más evaporadoras.



3c Gran vía atmosférica. Laboratorio Gran vía. 2010. Gálvez Wieczorek Tadao Ando y Blair Associates., fuente en Londres

La organización horizontal parte de paramentos verticales envolventes que introducen un segundo **orden polinuclear**. Las unidades más pequeñas aparecen exentas, como torres de refrigeración, o integradas en la masa construida como patios de luces. Protegidos del sol y del aire caliente, estos recintos suelen aglutinar los cuartos húmedos y la

evaporación del agua de la red, y forman núcleos de partida para la producción de gradientes climáticos a su alrededor. Sus proporciones verticales facilitan un movimiento de aire convectivo que se incentiva con la vaporización. Los recintos exteriores más amplios se construyen desde el modelo de plazas-cuenca centrado en torno a una masa de agua central, apoyándose en los perímetros de fachada y suelos de los cañones que se transforman para formar envolventes que modifican el aire desde el perímetro. Los cuerpos evaporadores de agua azul y de agua verde se disponen en torno a núcleos y envolventes. Los espesores hidrófilos de la fase líquida se entrelazan con tapices vegetales tecnificados y con máquinas que pulverizan agua, integrando los distintos comportamientos termodinámicos a lo largo del ciclo diurno en formatos superficiales que se superponen a las envolventes existentes o posiciones suspendidas, ocupando los volúmenes de aire superiores de cañones y plazas. La acción sobre el aire que se disuelve paulatinamente al acercarse al perímetro de las islas, donde la sombra y el agua desaparecen para fomentar la ventilación y la intensidad lumínica. Este **perímetro-parapeto** protege la atmosfera interior, capta energía solar y purifica el aire polucionado.

Esponjas, nubes y tapices verdes.

Tras el análisis de las posibles organizaciones espaciales, el zoom se acerca para investigar con más detalle los cuerpos evaporadores. Con el término **ESPONJAS** se designan aquí materiales y sistemas constructivos porosos que al empaparse aproximan su comportamiento termodinámico al del agua. Los suelos hidrófilos por ejemplo, por su capacidad de almacenar agua, funcionan como sumideros de calor, superficies radiantes frías y refrigeradores por evaporación²⁵, cualidades que se han estudiado también en sistemas constructivos para edificación con experiencias reales²⁶. El tamaño de los poros incide de forma inversa sobre el tiempo de permanencia del agua retenida en su interior, sumando el efecto de la capilaridad que permite también al agua subir sobre paramentos verticales. Los materiales cerámicos por su porosidad muy pequeña, al humedecerse pueden mantener fría su propia superficie y el aire próximo por evaporación. El funcionamiento del botijo tradicional es un ejemplo clásico, que combina la sombra interior con la evaporación del agua interior que se filtra lentamente a través de un recipiente poroso. A nivel experimental se han testado prototipos de paredes exentas, construidas en espacios exteriores con materiales hidrófilos y tamaños de poros diferentes, atravesables por el aire. Si se cuenta con una superficie de agua en el suelo,

²⁵ OKE, Tim, 1987.

²⁶ Asaeda y Ca, 2000.

el muro puede empaparse por capilaridad, enfriarse y al ser atravesados por el aire, funcionar como climatizador²⁷.

Los **TAPICES DE VEGETACIÓN** completan el paisaje refrigerador de nubes y esponjas. Formados fundamentalmente por agua, su operatividad transpiradora es más sofisticada, sensible a las condiciones ambientales según cada especie. La vegetación xérica autóctona de los paisajes secos es tolerante a periodos de sequía y minimiza los intercambios de agua. Sus hojas son gruesas y de colores grises y forman capas de sombra resistentes. La vegetación métrica bombea más caudal a través de hojas finas que multiplican la superficie de evaporación. En condiciones de stress hídrico, como la restricción del riego, las hojas cierran los *stomata*, la transpiración se reduce y el efecto refrigerador desaparece. El incremento de riego por el contrario ha dado ratios de evaporación hasta un 40% mayores²⁸. Como en las ciudades áridas tradicionales, en el tejido vegetal el agua apenas se ve, va protegida del sol por membranas que funcionan como un interface de doble dirección: por un lado regula el contacto entre el agua reutilizada y el aire urbano: como un último filtro destilador, retiene los residuos disueltos. Al mismo tiempo protege el agua que contiene de la toxicidad que la rodea. Con esta membrana de regulación y sistemas de riego entubados, soterrados o encapsulados es posible la reutilización de aguas residuales de forma compatible con el marco legal, muy restrictivo con la calidad para la aspersion o vaporización, y también con la política de separaciones que requiere la diversidad de contaminantes del ámbito urbano.

Describir este paisaje de cuerpos evaporadores y su posible articulación en un sistema bien estructurado hace más fácil imaginar la transformación de la fábrica urbana en **un cuerpo que transpira**, que reduce la temperatura de su piel por la evaporación del agua que contiene en su interior. Esta respiración de las superficies forma parte del metabolismo, de la bioquímica nueva de los flujos urbanos. Con estas nuevas imágenes que han ido surgiendo se puede formar un *collage* ordenado y bastante nítido del interior de una isla oasis.

²⁷ He y Hoyano, 2010.

²⁸ Dato publicado por Tim Oke y McCaughey (1983) para barrios de Vancouver, en Canadá.

La cubierta-palmeral



3c Emparrado. Jerez de la Frontera

Sobre la edificación, las **CUBIERTAS XÉRICAS** son sistemas captadores, de lluvias y de humedad. Durante el día reducen la absorción de calor y durante la noche se convierten en superficies frías condensadoras. La incorporación sistemática de cubiertas verdes con vegetación métrica cuenta con antecedentes en ciudades de clima húmedo, inicialmente como sistema de laminación y fomento de evaporación para control de inundaciones. Las mediciones termodinámicas realizadas en *Toronto* muestran que más allá de la retención de agua, han resultado ser un dispositivo de control climático mesoescalar significativo con la rehidratación de la atmósfera y la reducción de las temperaturas de la cúpula de aire, que se traduce en mejores condiciones para disipar del calor de los cañones, que puede subir con facilidad.²⁹ Otras experiencias más puntuales en Kreuzberg, Berlín³⁰, documentan la evaporación espontánea de la totalidad de los 588mm de lluvia, evitando la necesidad de conexión a la red de alcantarillado y una capacidad refrigeradora de 302 kWh/(m²a) dirigida sobre todo a la UBL. En un contexto semiárido la evaporación potencial en el plano de cubiertas es excesiva para el volumen de agua disponible, e

²⁹ La investigación de Liat Margolis sobre el comportamiento termodinámico de diferentes soluciones de cubierta se puede consultar en <http://grit.daniels.utoronto.ca/data/drawings/>

³⁰ KÖHLER, Manfred: "Concept for a Careful Urban Renewal Quarter " 108 Berlin-Kreuzberg", Group "Ökotop" TU Berlin 1983, TU Berlin, Citado en SCHMIDT, Marco: (op. cit).

insuficiente para transformar la cúpula de aire más expuesta a las condiciones climáticas exteriores. Las condiciones de convexidad y concavidad de este plano discontinuo, con sus propias umbrías y solanas y diferentes exposiciones a viento dibujan las zonas más protegidas, donde soluciones más evaporadoras podrían tener cabida al quedar el vapor y el aire fresco retenidos durante más tiempo.



2c "Between the Air" Selgas Cano. 13 Muestra de Arquitectura Internacional de la Bienal de Venecia, 2012

Sobre los vacíos, los sustratos hidropónicos o con poco volumen de tierra permiten idear un plano suspendido, regulable y móvil desvinculado del suelo, lo que aporta grados de libertad mayores para la geometría de ciudad densa con cañones profundos. La

....

La propuesta principal de los oasis urbanos es tomar ventaja de la concentración de aguas que se da en las ciudades, para transformar su clima interior con muy baja intensidad energética, con un potencial enorme para invertir el actual escenario de aridez, desertización y calentamiento del espacio urbano. Involucra los grandes sistemas regionales de producción de aire fresco, aborda a escala metropolitana la fragmentación de las islas de calor con la canalización de aire y agua en las vaguadas principales, y a nivel local, donde es posible ordenar la calidad y renovación del aire, constituye un archipiélago de climas basados en inversión térmica y sombra para preservar el frescor que rezuma de la construcción.

La idea de las islas climáticas incorpora un cambio de escala en el control del aire. Desde el acondicionamiento mecánico de interiores a costa del calentamiento de exteriores, empezar a pensar el aire de fragmentos de ciudad establece afinidades con conceptos disciplinares anteriores como los *climas totales* de *Fuller*, las *megaformas* de *Frampton*, o los gradientes de información y ambientes en las ciudades de *Archizoom*. La gran cubierta es

un palmeral conceptual, abstracto que agrupa llenos y vacíos, se dobla para incorporar las fachadas de los perímetros, como una envolvente que protege esta entidad mayor. Pero al mismo tiempo es un sistema discontinuo, fragmentando que aglutina una multitud de elementos que reaccionan al clima, erizándose o replegándose, agrupados como cerramientos tridimensionales, a veces con mucho espesor. Las torres, como esclusas que canalizan los flujos dinámicos y los invernaderos, donde el calor, la humedad y los residuos se envasan en recintos sellados, completan su funcionamiento.

Esta idea de **arquitectura transpirable**, que regula sus condiciones higrotérmicas disipando la humedad que almacena en su interior, se ha concretado en híbridos que integran especies vivas con instalaciones técnicas de riego, vaporización y condensación. Atraviesan interiores y exteriores, espacios umbríos con perímetros permeables y atmosferas soleadas estancas. Fachadas y cubiertas dejan de entenderse como límites que aíslan, a favor de ideas más próximas a membranas o interfaces, como órganos que transforman materiales y regulan intercambios entre ambos lados a través de su espesor. Los balones de oxígeno del Parque de los Pinos extreman la visibilidad de los poros por los que respiran. En El Palenque de Prada el aire interior y el cerramiento de fachada son el mismo material, que solo se diferencia por su densidad y concentración. La articulación como un sistema de escala urbana, sigue patrones de orden para coordinan las diversas piezas y potenciar su eficiencia. Las intuiciones que se pueden vislumbrar en el proyecto de la Expo de Sevilla prestan credibilidad a este proyecto de ciudad como un sistema de flujos dinámicos que se puede ordenar y trabar con las redes de agua.

Revindicar la **exterioridad** para la escena pública, el contacto con las variaciones climáticas y las condiciones del paisaje, que se incorporan a través de la fusión entre la arquitectura tecnificada y la tradición paisajística, se basa primero en la valoración de la diversidad de ambientes como una riqueza para el proyecto, pero también en el interés de evidenciar las profundas conexiones entre naturaleza y construcción, ecología y economía. El interés por explorar otro tipo de aires va mezclado con la visibilidad de los flujos hidrológicos, con el interés por la percepción de los estratos geológicos y sus espesores húmedos, o de la materialidad del aire a través de los cambios de humedad y temperatura. La construcción de la ciudad hidrófuga y su atmosfera deshidratada han sido soluciones útiles en un momento histórico, pero la tecnología actual y los instrumentos de proyecto hacen posibles soluciones más sofisticadas, que regulan las conexiones en vez de aislar los espacios y parten de la observación de los procesos para reducir a la vez las dependencias de materia y de energía.