



CONAMA10
CONGRESO NACIONAL
DEL MEDIO AMBIENTE

COMUNICACIÓN TÉCNICA

Influencia de la vegetacion en la calidad del aire y el clima urbano

Autor: Juan Angel Acero Alejandro

Institución: Tecnalía - MedioAmbiente

e-mail: juanagel.acero@tecnalia.com

Otros Autores: Andres Simon Moral (Tecnalía-MedioAmbiente); Jon Arrizabalaga Ibarzabal (Tecnalía-MedioAmbiente)

RESUMEN

El diseño urbano condiciona de forma importante los niveles de calidad del aire y el confort del peatón dentro de las ciudades. La dispersión de las emisiones locales dentro de los 'cañones' urbanos está muy limitada debido a la dificultad de mezcla con aire limpio exterior. Así pues, la concentración de contaminantes puede aumentar significativamente.

En este sentido, la vegetación dentro de las áreas urbanas puede tener diferentes efectos en la calidad del aire y el confort del peatón. Por una parte, es conocida la mitigación de los efectos de la isla de calor urbana. Por otra, hay que considerar sus efectos en la calidad del aire actuando como sumidero de material particulado y otros gases principalmente a través de deposición en la hoja, así como el efecto que conlleva en el cambio de los patrones dispersivos y la reducción de la circulación del aire y consecuentemente el aumento de la concentración de contaminantes. Por ello, la localización de la vegetación dentro de áreas urbanas es un aspecto muy importante.

Se han analizado diferentes escenarios en relación a la influencia de la vegetación en la dispersión de las emisiones del tráfico y en la climatología local en una plaza de Bilbao. El objetivo era justificar las diferencias significativas que se pueden dar según la localización de la vegetación dentro una plaza.

Palabras Clave: diseño urbano; calidad del aire; emisiones tráfico; climatología urbana

1. Introducción

Es bien conocido que en los núcleos urbanos, especialmente en las ciudades de mayor tamaño, existe una perturbación de las condiciones atmosféricas. Por un lado, la calidad del aire suele empeorar y por otro las condiciones climáticas se alteran con respecto al entorno rural. Estos problemas tienen su origen en diversos factores, como son, la morfología de las ciudades, los materiales utilizados en los desarrollos urbanos y las emisiones de gases contaminantes.

Las ciudades están formadas por cañones urbanos que forman estructuras complejas que por un lado dificultan el flujo libre de aire y disminuyen la ventilación y por el otro, disminuye el factor de vista del cielo (*SVF, Sky View Factor*) provocando un atrapamiento radiativo que aumenta la inercia térmica del medio. Los materiales con que están construidas las ciudades presentan unos valores de albedo (porcentaje de radiación solar reflejada) menores y de difusividad térmica mayores que el medio natural. La consecuencia es una mayor absorción de energía y un mayor almacenamiento de calor, que junto al atrapamiento radiativo provoca una mayor temperatura que el medio rural circundante. En este sentido, el empleo de medidas de mitigación de la temperatura interior de la ciudad conlleva una reducción de las emergencias de la población relacionadas con la temperatura (Silva, 2010).

Por otra parte, en las ciudades se produce la emisión a la atmósfera de contaminantes (tráfico, calefacciones etc.), que debido a la reducida ventilación pueden ocasionar niveles inadecuados de calidad del aire con el consiguiente efecto en la salud humana. Así mismo hay que tener en cuenta que la mayor parte de los seres humanos habitan en núcleos urbanos, lo que convierte el problema en una afección significativa a la población.

Desde el punto de vista de climatología urbana, los efectos conjuntos de la ventilación, el atrapamiento radiativo, la disminución del albedo, el aumento del almacenamiento de calor y las emisiones de calor antropogénico formarán el llamado Efecto Isla de Calor (*UHI, Urban Heat Island*). Debido a ello, en las ciudades, sobretodo durante la noche, la temperatura es mayor que en el medio rural circundante (figura 1). Esto, en un contexto de Cambio Climático, supone un aumento del estrés térmico, lo que puede tener consecuencias en la salud humana.

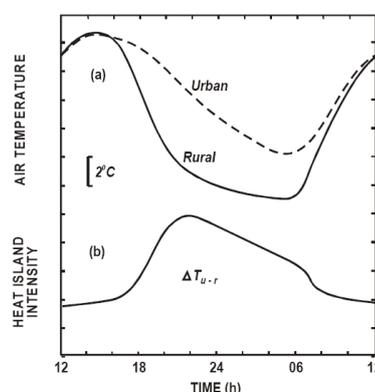


Figura 1. – Evolución de la diferencia de temperatura entre el ambiente urbano y su entorno rural (Fuente: Oke, T.R., 1987)

En este contexto, se presenta necesaria la definición de medidas que sean capaces de reducir esta problemática, de cara a mejorar la calidad de vida en las ciudades. En concreto, la vegetación es un elemento urbano que interacciona tanto con la contaminación atmosférica como con la temperatura. La introducción de vegetación en el entorno urbano refresca el ambiente en las horas de mayor temperatura, disminuyendo así la isla de calor urbana. Además, la vegetación supone una 'barrera porosa' a la contaminación actuando como sumidero para algunos contaminantes, pudiendo mejorar la calidad del aire de la zona. Sin embargo, también hay que considerar el posible efecto negativo de la vegetación sobre la dispersión de contaminantes especialmente si los elementos vegetativos se ubican próximos al lugar de emisión. En estas condiciones se puede limitar la ventilación y la mezcla entre masas de aire aumentando la concentración de contaminantes en puntos concretos.

1.1 Vegetación y Clima Urbano

La vegetación interactúa con la climatología urbana de varias formas. Por un lado aumenta el albedo de la ciudad, haciendo que un mayor porcentaje de la radiación incidente sea reflejada a la atmósfera, aumenta la conductividad térmica hacia el suelo y provoca sombra sobre el suelo y sobre los edificios, reduciendo la acumulación de energía en la superficie, lo que evita un aumento de la temperatura y reduce el gasto energético en los edificios, lo cual, a su vez, disminuye la emisión de calor desde los edificios. Por otro lado, mediante el proceso de evapotranspiración la vegetación influye sobre el flujo de calor latente, rebajando la temperatura del aire de la zona al emplear parte de la energía disponible en la evaporación. Este efecto es más acentuado en las ciudades secas y calurosas (Alexandri and Jones, 2008).

Hay que considerar que si bien la vegetación ayuda a que las temperaturas que se alcanzan durante el día en zonas urbanas sean menores, por la noche la reducción del factor de vista del cielo conlleva una reducción del enfriamiento radiativo de la superficie urbana.

Existen diferentes posibilidades en cuanto al uso de la vegetación como medida de mitigación de la UHI. Debido a que algunas interactúan con la calidad del aire, sus efectos se deberían estudiar de forma conjunta. Además de la plantación de bosques y parques urbanos, también se puede considerar árboles entorno a carreteras o dentro de calles, así como la introducción de plantas en tejados (*Greenroofs*) y en las fachadas de los edificios.

Los efectos de la vegetación dependen fuertemente de la densidad del follaje de las plantas, del tipo de tierra utilizada (en cuanto a características hídricas) y de las características de la zona de la urbe donde se coloquen. El mejor resultado viene de las combinaciones de diferentes medidas/estrategias de plantación de vegetación.

1.2 Vegetación y Calidad del Aire

El efecto de árboles, arbustos y el resto de vegetación natural sobre los niveles de contaminantes en el aire urbano (partículas, ozono y otros gases) ha sido ampliamente estudiado. Aunque se ha demostrado que la vegetación puede actuar tanto de sumidero

como de fuente de material particulado y gases contaminantes a la atmósfera, se ha constatado que en áreas urbanas próximas a focos de contaminación existe una mejora de la calidad del aire. Sin embargo, no se ha podido cuantificar en detalle el potencial de reducción exacto de muchas especies de árboles.

La depuración biológica del aire por medio de las plantas se produce por tres mecanismos:

- Deposición en las hojas, las ramas y el tronco
- Adsorción por estas tres superficies anteriores
- Captación a través de los estomas de la hoja

La deposición es el efecto más importante para la reducción de material particulado del aire ambiente. Este efecto ocurre al transportar el viento el material particulado y entrar en contacto con las superficies del árbol o planta. Algunas de estas partículas se absorben por la planta mientras la mayoría se quedan adheridas a la superficie. En el caso de partículas, la vegetación no es un sitio definitivo ya que estas se pueden resuspender a la atmósfera por medio de vientos o simplemente depositarse en el suelo por medio de la lluvia.

La adsorción por la superficie vegetal y la captación de los estomas influyen preferentemente en los gases contaminantes. Una vez dentro de la planta, estos gases reaccionan con agua y forman ácidos u otros compuestos químicos.

Existen diferentes factores que intervienen en el efecto de la vegetación en la calidad del aire: la especie, el tamaño del árbol y su disposición o posicionamiento, el tamaño de la hoja, la forma, la longevidad y características de su superficie, la fisiología del árbol, especialmente la conductancia de los estomas de las hojas y la capacidad de transpiración (dependiendo de la situación de estrés de la especie, por ejemplo, debido a la propia contaminación)

Así pues la evaluación de los diferentes aspectos de la interacción de la vegetación con la climatología urbana y los niveles de calidad del aire se presenta como una necesidad de cara a la toma de decisión en el ámbito de la planificación y el diseño urbano. En el trabajo que se presenta a continuación se ha evaluado el impacto en la atmósfera urbana de diferentes escenarios de disposición de la vegetación en la plaza Indautxu de Bilbao. Para ello se ha usado en modelo de microescala ENVI-met (Bruse, M and H. Fler, 1998; Bruse, 2004).

2. Metodología

2.1 Descripción del lugar

La plaza Indautxu se localiza en el centro de la ciudad de Bilbao. Sus dimensiones aproximadas son 100x80 metros y se encuentra rodeada por calles con tráfico denso especialmente la situada al norte de la plaza con 14,712 vehículos día (figura 2). Actualmente existe arbolado disperso por la plaza aunque la mayor parte de su superficie esta cubierta de baldosas por lo que la mayor parte es suelo impermeable. La plaza esta rodeada de edificios de cinco a seis pisos que es la altura tipo de los edificios en esta

parte de la ciudad. Las calles disponen de una relación W/H (*width* (ancho) de la calle & *height* (alto) de la calle) que en todos los casos es menor de 0.5. Es por ello que no se espera que los cañones urbanos tengan buenas condiciones dispersas y que el atrapamiento radiativo sea alto influyendo en los niveles de calidad del aire y la inercia térmica del entorno. La plaza tiene una diferencia de altura de 1 – 2 metros entre la parte norte y la sur.

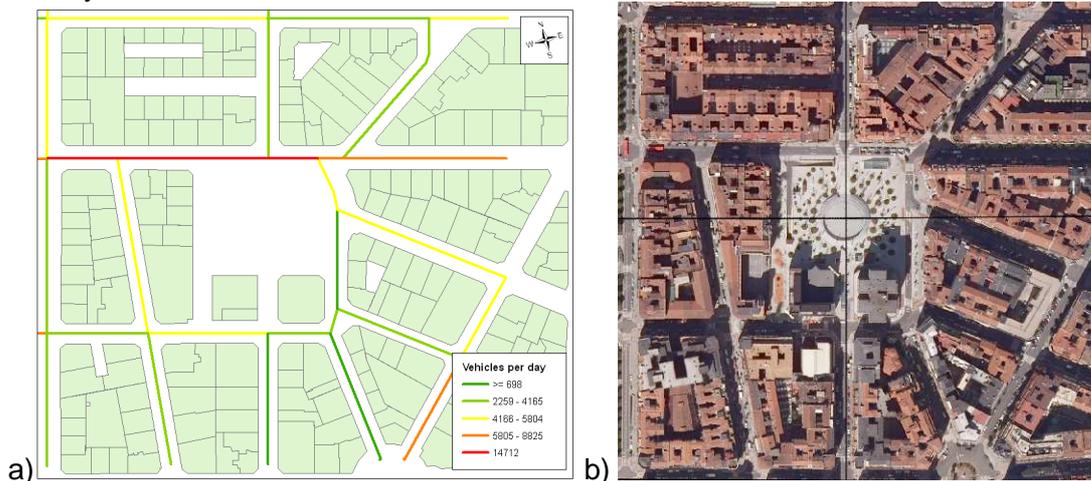


Figura 2. a) Intensidad media diaria (IMD) en el área simulada; b) imagen aerea del entorno de la plaza Indautxu.

2.2 Modelo y simulaciones

Para evaluar los diferentes escenarios considerados se ha usado el modelo ENVI-met (versión 3.1). Es un modelo microclimático tridimensional y no-hidrostático desarrollado para calcular y simular variables climáticas y de confort térmico así como la dispersión de contaminantes en áreas urbanas. Tiene una resolución espacial de 0.5 a 10 metros y un salto de tiempo de 10 segundos en la interacción de la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes. Es un modelo tipo CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Permite modelar la evolución de las variables de salida durante el ciclo diario (y hasta 48 horas) usando las leyes fundamentales de la dinámica y termodinámica de fluidos. Para la dispersión de contaminantes el modelo usa la ecuación de advección-difusión euleriana. El modelo considera todos los tipos de radiación solar (directa, reflejada y difusa), así como la radiación infrarroja de los edificios. Los flujos radiativos en el área modelizada consideran el efecto de la vegetación incluyendo el efecto del sombreado, la absorción y re-irradiación de energía.

Además de la vegetación, el modelo ENVI-met usa como valores de entrada datos de edificios (ubicación, altura), características de las superficies (albedo, conductancia, emisividad, ...), tipos de suelos, condiciones climáticas de contorno para forzar el modelo y emisión de contaminantes. Debido al elevado número de efectos de interacción atmósfera-superficie-vegetación considerados, el modelo exige un costo computacional significativo.

El módulo de vegetación en ENVI-met describe las plantas como elementos porosos caracterizados por LAD (*Leaf Area Density*, Densidad de Área Foliar; m^2/m^3). Este parámetro no solo se considera en la deposición y captación tanto de gases como de

partículas, sino que influye en la dinámica del flujo de viento y consecuentemente en los parámetros de dispersión. La velocidad de deposición es una función del diámetro y la densidad de la partícula contaminante, así como del tamaño típico de la hoja. Actualmente el modelo no considera la resuspensión de las partículas depositadas en el elemento vegetal.

2.3 Definición de escenarios

Se han estudiado tres escenarios que consideran la disposición de la vegetación dentro de la Plaza Indautxu de Bilbao. Se ha considerado la situación actual como el escenario base (E0) en el que existen dos tipos de árboles (de 4 y 6 metros) en diferentes puntos de la plaza. Estos árboles no tienen hojas hasta la mitad de su altura y la densidad de área foliar es menor de $1 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (depende de la altura). Los dos nuevos diseños de disposición de la vegetación en la plaza se plantean de la siguiente forma:

- Escenario 1 (E1) considera la disposición de árboles alrededor del borde de la plaza con la finalidad de bloquear las emisiones del tráfico de las calles contiguas.
- Escenario 2 (E2) considera un pequeño conjunto de árboles en el centro de la plaza ocupando la mitad de la superficie de la plaza.

Tanto E1 como E2 se plantean con árboles muy densos ($\text{LAD}=2.180 \text{ m}^2/\text{m}^3$) de 10 metros de altura. En estos casos los árboles no tenían hojas en los dos primeros metros de altura. Los tres escenarios se pueden ver en la figura 3.

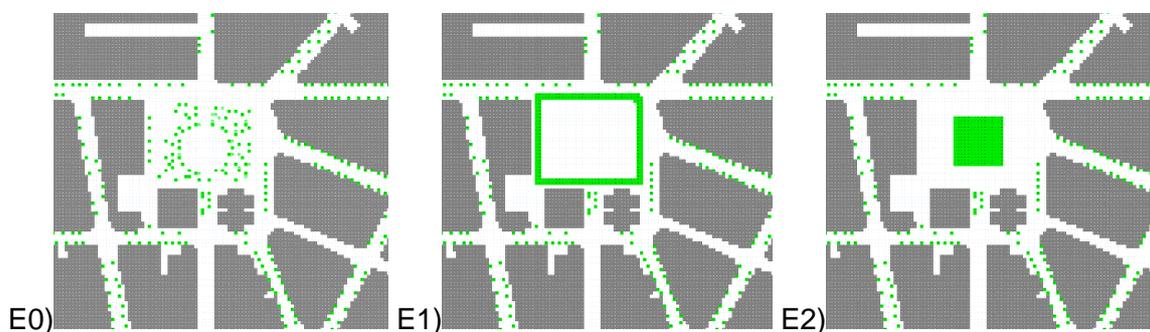


Figura 3. Disposición de la vegetación en los tres escenarios considerados (E0, E1, E2)

Las emisiones del tráfico se han calculado a partir de información local tomando tres periodos (mañana, tarde y noche) con diferentes intensidades de tráfico. El factor de emisión local se obtuvo a través de la metodología CORINAIR (2007) en el que se consideró 25 km/h la velocidad de los vehículos, calles sin pendiente y el 5% de los vehículos eran autobuses y otros pesados.

Todos los edificios se han considerado con la misma altura (26 metros) y con las mismas características (limitación del modelo usado) de sus superficiales (tejados, paredes). Para ello se ha tenido en cuenta las propiedades típicas de las construcciones en esta zona de Bilbao.

Cada una de las simulaciones se ejecutó durante 30 horas con condiciones meteorológicas de contorno obtenidas de datos reales medidos encima de los edificios del día 13 de agosto de 2009. El flujo de viento entrando en el dominio de la simulación fue relativamente homogéneo durante gran parte del día. En cualquier caso, para la

comparación de escenarios el flujo de viento se mantuvo constante ($DV = 318^\circ$) durante toda la simulación.

Los resultados han mostrado la influencia de la disposición de la vegetación en los entornos urbanos en el confort térmico del peatón a través de la variación del microclima urbano local así como en los niveles de material particulado emitido por el tráfico en las calles colindantes.

3. Resultados

3.1 Confort térmico del peatón

El confort térmico se puede medir a través de diferentes índices que por lo general relacionan una variable empírica con la sensación térmica y/o estrés térmico. En este estudio se ha usado el índice PET (*Physiologically equivalent temperature*) derivado del modelo de balance térmico del cuerpo humano MEMI (Mayer & Hoppe, 1987). Aunque inicialmente PET se usó principalmente en Alemania, hoy en día se usa de forma común como índice térmico (Thorsson et al., 2004; Johansson & Emmanuel, 2006; Oliveira & Andrade, 2007). Para el cálculo de PET es necesario por un lado información meteorológica (temperatura del aire, presión de vapor, velocidad de viento y temperatura media radiante como medida del calor absorbido a través de radiación) y por otro, se necesita información de las características de las personas (edad, sexo, altura, peso, actividad física y ropa que lleva).

En la figura 4 se puede observar la distribución espacial de los valores del índice de confort térmico PET a las 8:00 y a las 17:00 hora local (GMT+2) el 13/08/2009. En dicha figura se puede observar que a las 8:00 la plaza entera se encuentra a la sombra. Las escasas variaciones en el índice PET se deben principalmente a variaciones en la intensidad del viento que alteran la acumulación de calor en el cuerpo humano. A las 17:00 se puede apreciar como gran parte de la plaza se encuentra bajo la influencia directa del sol, excepto su parte más occidental que a esa hora de la tarde está afectada por la sombra del edificio. Lo mismo ocurre con la mayor parte de las calles donde la relación W/H (relación anchura/altura) es tal que no permite la incidencia directa de la radiación solar. Así pues, la sombra produce una disminución significativa en los valores de PET reflejando la importancia de la radiación solar en la sensación térmica del peatón.

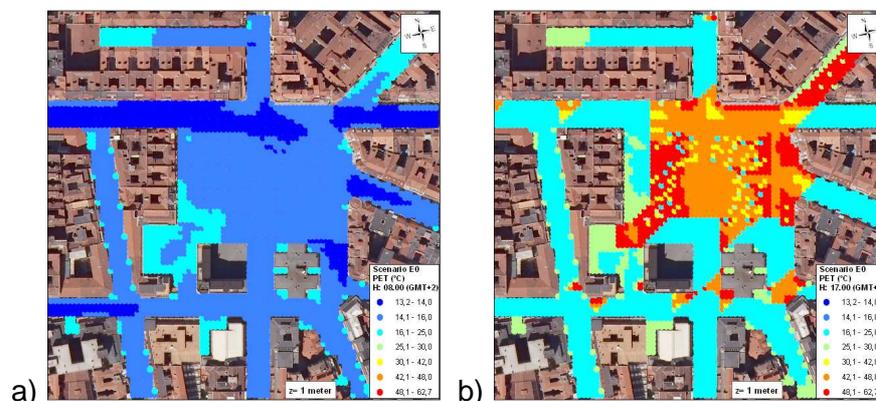


Figura 4. Niveles de confort térmico del peatón (PET) en el entorno de Indautxu a las 8:00 (a) y a las 17:00 (b) para el escenario base (E0)

Además de la radiación solar (de onda corta) y la de los edificios (de onda larga) otra variable que influye en la sensación térmica es la velocidad de viento. En la figura 4 a las 8:00 se puede observar como en la parte sur-oeste de la plaza existe un incremento de PET. Estos valores altos están asociados a una disminución de la velocidad del viento que se registra en esa área debido a un estancamiento del flujo de aire. Evidentemente, los árboles existentes en la plaza también generan cambios puntuales en el confort térmico debido a su influencia en el balance radiativo y el efecto de la evapotranspiración de la vegetación. Este efecto es más visible a las 17:00.

A continuación se describen las diferencias principales entre el escenario base (E0) representando la situación actual y los diferentes escenarios de vegetación propuestos (E1 y E2).

En ambos escenarios (Figura 5), a las 17:00 se puede observar como la vegetación genera una disminución de la sensación térmica entorno a la ubicación de los árboles: en el caso del escenario E1, se da en el perímetro de la exterior de la plaza y en el caso del E2, en el centro de la plaza. Principalmente este efecto viene determinado por la sombra generada. Sin embargo, otras zonas cercanas a la vegetación sufren pequeños aumentos de la sensación térmica. Es el caso de la parte noroeste de la plaza en el escenario E1 y la parte sureste de la plaza en el caso del E2 donde ocurre un cambio en la dinámica del viento que conlleva una disminución de la velocidad del viento y consecuentemente un aumento del PET o de la sensación térmica.

A las 17:00, la mayor reducción del PET (mejora del confort térmico) se produce con el escenario de vegetación E2.

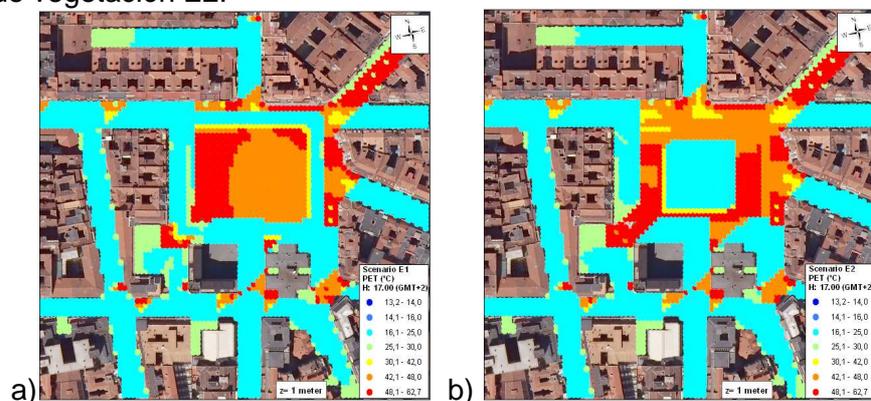


Figura 5 Niveles de confort térmico del peatón (PET) en el entorno de Indautxu a las 17:00 (GMT+2) para los escenarios de vegetación E1 (a) y E2 (b)

3.2 Niveles de PM10

Los resultados obtenidos en cada uno de los escenarios (E0, E1, E2) concuerdan con las condiciones meteorológicas de contorno, el diseño urbano existente en la Plaza Indautxu y la disposición de la vegetación. Así, la contaminación emitida por el tráfico en la calle situada al norte de la plaza tiene un impacto significativo su calidad del aire (Figura 6a).

La comparación con los diferentes escenarios de vegetación propuestos (E2, E1) muestran que la disposición de la vegetación ocasiona diferentes patrones de dispersión del PM10 emitido por los vehículos en las calles circundantes (Figura 6 b, d).



Figura 6. Resultados a $z=1.4$ metros. a) Niveles de PM10 con el escenario actual (E0), b) Diferencia relativa de PM10 entre los escenarios (E0 – E1), c) Diferencia relativa de PM10 entre los escenarios (E0 – E2)

En el escenario E1 se distingue un aumento significativo de las concentraciones de PM10 junto a la calle situada al norte de la plaza y dentro del perímetro definido por la barrera de árboles. Esta variación viene justificada por una reducción de la velocidad del viento debido a la presencia de los árboles y el consecuente estancamiento de los contaminantes. El aumento medio de los niveles de PM10 dentro del perímetro del arbolado para el escenario E1 es del 15% con respecto a E0. Por otra parte, el entorno de la calle orientada al este reduce sus niveles de PM10 en el escenario E1 debido principalmente la retención de los contaminantes emitidos en la calle situada al norte de la plaza y la orientación con respecto al flujo de aire.

El escenario E2 muestra una disminución de la concentración dentro y a sotavento de los árboles situados en el medio de la plaza. Estos resultados justifican la deposición de PM10 en la vegetación y el efecto de filtro que esta tiene en los contaminantes. Por otra parte el arbolado ejerce un cambio en el patrón de viento en el lado oeste de la plaza provocando cierto estancamiento y el consecuente aumento de los niveles de PM10. Comparando la concentración promedio en toda la plaza, el escenario E2 muestra una reducción del 2% frente al escenario E0.

Sin embargo, dependiendo de la altura a la que se analiza el impacto y el momento del día (actividad atmosférica turbulenta) estos patrones generales de cada escenario varían.

Influencia de la hora del día

A lo largo del día la atmósfera presenta diferentes situaciones de estabilidad que conllevan diferentes características de dispersión del aire. Esto implica un cambio significativo en los niveles de contaminación registrados. A las 8:00 (hora local: GMT+2), la atmósfera todavía se encuentra afectada por la estabilidad nocturna que implica una menor dispersión de contaminantes. Por ello, considerando que el flujo de aire encima de los edificios es del noroeste (318°), el escenario E2 muestra una mayor acumulación de

contaminantes delante de los árboles a las 8:00 en comparación con las 17:00. (Figura 7.a).

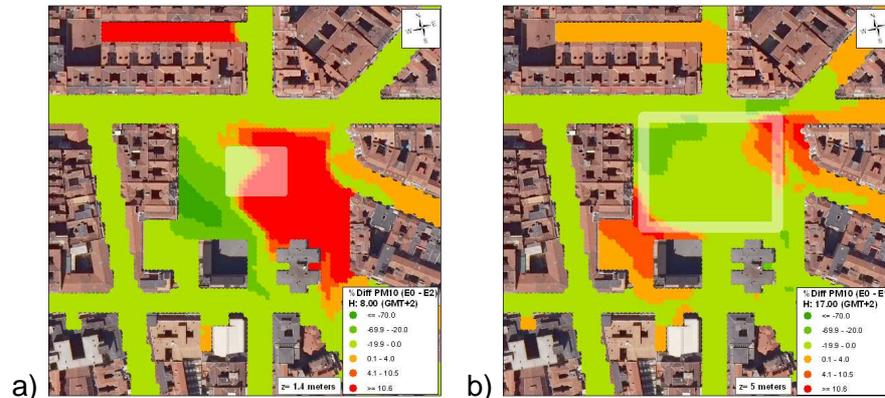


Figura 7. a) Diferencia relativa de PM10 entre los escenarios (E0 – E2) a z=1.4 metros y 8h (GMT+2), b) Diferencia relativa de PM10 entre los escenarios (E0 – E1) a z=5 metros y 17.00 (GMT+2)

Influencia de la altura

La altura de los árboles así como la altura donde se encuentra el follaje del árbol puede condicionar los parámetros dispersivos y la concentración de contaminantes. Así, la barrera de árboles del escenario E1 muestra un mayor filtrado de PM10 a 5 metros en comparación con 1.4 metros.

Para el caso del escenario E2, la reducción de los niveles de PM10 a z=5 metros se observa en todo el área cubierta por los árboles. A 1.4 metros sobre la superficie (Figura 7.a) solo la mitad del área donde se encuentran los árboles (centro de la plaza) registra una reducción de la concentración. Este área depende del flujo de viento y las fuentes emisoras.

4. Conclusiones

Los resultados han mostrado la influencia de la vegetación tanto en el confort térmico del peatón como en los niveles de calidad del aire dentro y en el entorno de una plaza de Bilbao. Todos los escenarios de vegetación muestran diferencias en la dinámica del aire dentro de la plaza y en la localización de los máximos de concentración y de los niveles de confort térmico.

Por una parte, se ha observado una evolución del PET y del confort térmico a lo largo de la jornada. Esta magnitud aumenta significativamente en aquellas zonas expuestas a la radiación solar. Así se puede observar un incremento de la intensidad desde las primeras horas de la mañana hasta pasado el mediodía y un descenso progresivo a lo largo de la tarde. Además, el calentamiento diferencial que se produce en los elementos urbanos origina una mayor irradiación (de onda larga) por parte de estos, influyendo el nivel de confort térmico de los habitantes del núcleo urbano. Sin embargo, no solo es necesario considerar los efectos radiativos, sino también la exposición a los flujos de aire que se encauzan a través de las estructuras urbanas y que según su intensidad pueden afectar

significativamente el confort del peatón. Así pues, otro factor clave es la intensidad de viento o la ventilación de esa área.

En cuanto a calidad del aire, se ha podido observar diferencias de concentración de PM10 según el escenario considerado. La concentración varía con respecto a la altura no solo por el efecto de la dispersión sino por la deposición que se produce en el follaje de los árboles. También, el momento del día condiciona la capacidad dispersiva de la atmósfera y consecuentemente los niveles de calidad del aire.

Considerando exclusivamente el área de la plaza de Indautxu, el mejor resultado para el confort térmico en un día de calor y con las condiciones meteorológicas consideradas, se daría con el escenario E2. Así pues es conveniente agrupar los árboles para conseguir un mayor efecto considerando que el sombreado afecta de forma muy local. Sin embargo, los niveles de PM10 debido al impacto de las fuentes de tráfico del entorno de la plaza se reducen más con el escenario E1.

Es por ello que existe la necesidad de evaluar los diseños urbanos desde el punto de vista del confort térmico (dentro de un contexto de cambio climático) y la calidad del aire ya que las distribuciones y composiciones particulares de la ciudad condicionan el bienestar de los habitantes. Así pues la evaluación climática y de impacto de la contaminación local de nuevos desarrollos o modificaciones de los existentes debe ser una herramienta más dentro de la planificación urbana. En nuestro caso se ha considerado la disposición de la vegetación dentro de áreas urbanas. Sin embargo, existen otras variables urbanas (orientación de edificios, anchuras de calles, características del material de las fachadas y tejados, ...) que también hay que considerar. Para ello, existen modelos de simulación que mediante la generación de escenarios permiten mejorar la toma de decisión basándose en rigurosa información científico-tecnológica.

5. Bibliografía

Alexandri, E.; Jones, P. (2008). Temperature Decreases in an Urban Canyon Due to Green Walls and Green Roofs in Diverse Climates. *Building and Environment*, 43, 480-490.

Bruse, M and Fleer, H. (1998). Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling and Software*, 13, 373–384

Bruse, M. (2004). ENVI-met 3.0: Updated Model Overview, <http://www.envi-met.de/documents/papers/overview30.pdf>

Clark, C., Busiek, B.E., Adriaens, P. (2010) Quantifying Thermal Impacts of Green Infrastructure: Review and Gaps. Presented at WEF 2010 Cities of the Future/Urban River Restoration Conference, Cambridge, Massachusetts, USA.

Honjo, T., Takakura, T. (1990-1991). Simulation of thermal effects of urban green areas on their surrounding areas. *Energy and Buildings*, 15, 443-446

Johansson, E., Emmanuel, R. (2006). The influence of urban design on outdoor thermal comfort in the hot, humid city of Colombo, Sri Lanka. – *Int. J. Biometeor.* 51, 119–133.

Mayer, H., Höppe, P. (1987). Thermal comfort of man in different urban environments. *Theor. Appl. Climatology*, 38, 43-49

Oke, T.R. (1987). *Boundary Layer Climates*. Routledge. New York, USA

Oliveira, S., Andrade, H. (2007). An initial assessment of the bioclimatic comfort in an outdoor public space in Lisbon. – *Int. J. Biometeor.* 52, 69–84.

Silva, H.R., Phelan, P.E., Golden, J.S. (2009). Modeling effects of urban heat island mitigation strategies on heat-related morbidity: a case study for Phoenix, Arizona, USA. *Int J Biometeorol*, 54, 13–22

Thorsson, S., Lindqvist, M., Lindqvist, S. (2004). Thermal bioclimatic conditions and patterns of behaviour in an urban park in Göteborg, Sweden. – *Int. J. Biometeorol.* 48, 149–156.

Urano, A., Ichinose, T., Hanaki, K. (1999). Thermal environment simulation for three dimensional replacement of urban activity. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 81, 197–210