# CALIDAD DE AIRE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE QUITO

Air quality in the historic downtown of Quito

#### Francisco Ramírez C.

Magíster Arquitecto. Docente Titular, Facultad de Arquitectura, Diseño y Artes. Pontificia Universidad Católica del Ecuador- PUCE. Miembro de International Federation of Landscape Architects- IFLA.

#### Michael Maks D.

MEng (Hons) en Ingeniería Civil y Medioambiental. Docente Agregado, Facultad de Arquitectura, Diseño y Artes. Pontificia Universidad Católica del Ecuador-PUCE. CEO en EvolutionEcoEngine.

#### David Sebastián Chuquer S.

Maestro en Ingeniería Ambiental. Docente Titular, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Pontificia Universidad Católica del Ecuador- PUCE. Docente Titular, Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Central de Ecuador- UCE.

#### Andrea Vallejo E.

Arquitecta por la Pontificia Universidad Católica del Ecuador- PUCE. MSc. Environmental Design and Engineering, University College of London- UCL.

#### RESUMEN

El presente estudio muestra el rendimiento de un prototipo de jardín vertical activo "CMMC" como unidad de enfriamiento y filtro para mejorar la calidad del aire interior y exterior. El comportamiento de jardines verticales fue analizado mediante tres casos de estudio. El jardín vertical activo CMMC enfrió el aire en un promedio de 8,1 °C con una capacidad de enfriamiento promedio de 682,8 W. Incluyendo los efectos del preenfriamiento en la entrada del jardín, el jardín enfrió el aire 14,3 °C en promedio, con una capacidad de enfriamiento promedio de 1.203,2 W. En el tercer caso, se monitoreó la calidad del aire en las cercanías y en sitios sin la influencia del jardín vertical, logrando una disminución de ozono (75%), dióxido de nitrógeno (44%) y partículas PM2,5 (79%) y PM10 (85%). Los resultados fueron concluyentes: el jardín activo CMMC presenta mejoras de calidad del aire superiores respecto a los jardines pasivos. El fenómeno de absorción de contaminantes marca una propuesta para la mejora de la calidad del aire en zonas críticas de contaminación en el Centro Histórico de Quito.

## ABSTRACT

This study shows the performance of an active vertical garden prototype "CMMC" as cooling unit and filter to improve the quality of indoor and outdoor air. We analyzed the behavior of vertical gardens through three case studies. The active vertical garden CMMC, air cooled at an average of 8.1 ° C with a cooling capacity average 682.8 W. Including the effects of precooling at the entrance garden, the garden cooled air 14,3 ° C on average, with an average capacity cooling 1203.2 W. In the third case, air quality in near sites were monitored without influencing the vertical garden achieving ozone depletion (75%), dioxide nitrogen (44%) and PM2.5 (79%) and PM10 (85%). The results were conclusive: CMMC active garden presents air quality improvements over passive gardens. The phenomenon of absorption of pollutants marks a proposal for improving air quality in critical areas of contamination in the historic center of Quito.

[ Palabras claves ]

Jardines verticales, energía sustentable, patrimonio cultural, calidad del aire.

[ Key Words ]

Vertical gardens, sustainable energy, cultural heritage, air quality.

## INTRODUCCIÓN

La población mundial está concentrada en ciudades. Hasta hace poco, el equilibrio entre la población urbana y rural definitivamente se rompió, pues cerca del 60% de la población mundial está concentrada en las urbes, con la consecuente pérdida de calidad en la habitabilidad de los seres humanos (UN. 2011). El crecimiento urbano va de la mano con una disminución en áreas verdes, lo que conlleva a un aumento de temperatura conocido como el efecto de isla de calor (Grimmond v WMO Secretariat, 2014). La naturaleza es un enfriador natural potencial que provee mayores beneficios regionales, al ubicarse en un patrón disperso, y mayores beneficios locales, al encontrarse en un patrón agrupado; por ejemplo, el incluir 1% de espacio verde resulta en una reducción de temperatura de la superficie de 0,5 °C a nivel regional y 1-2 °C a nivel local (Zhang, Murray y Turner, 2017). Además, el contacto con plantas es altamente beneficioso para el confort y la salud humana, con mejores efectos reportados en una mayor duración de exposición y mayor intensidad del espacio natural (Shanahan y otros, 2016). En primer lugar, la actividad microbiana en los sistemas de raíces filtra los compuestos orgánicos volátiles del aire (Wolverton, Johnson y Bounds, 1989). Segundo, el material particulado es capturado y retenido en las hojas (Fjeld, Veiersted, Sandvik, Riise y Levy, 1998), lo que permite que los jardines verticales mejoren la calidad del aire (Perini, Bazzocchi, Croci, Magliocco y Cattaneo, 2017). Tercero, la productividad y el bienestar de una persona aumentan cuando entra en contacto con las plantas, junto con una disminución en sus niveles de estrés (Fjeld, Veiersted, Sandvik, Riise y Levy, 1998; Ulrich y otros, 1991; Lohr, Pearson-Mims, y Goodwin, 1996).

Uno de los beneficios de los jardines verticales es que refrigeran pasivamente los edificios y pueden provocar una reducción en la carga de energía del enfriamiento activo de los edificios (Perini, Bazzocchi, Croci, Magliocco y Cattaneo, 2017). Esto es importante para reducir el consumo de energía de los mismos, ya que los sistemas de enfriamiento son relativamente intensivos en energía, pues, por ejemplo, representan el 15% del consumo de electricidad en los edificios residenciales de Estados Unidos de América (U.S. Energy Information Administration, 2018).

Los jardines verticales aportan al mejoramiento de la temperatura como enfriadores y filtro para mejorar la calidad del aire (Pérez y otros, 2011). Respecto al consumo de energía, se pueden distinguir dos grupos de jardines verticales:

a. Jardines verticales pasivos, constituidos por vegetación que se planta en un sustrato montado verticalmente en la fachada de un edificio, y definido como una pared verde, cuya sombra, evapotranspiración y aislamiento térmico reducen la temperatura en la superficie y el espacio interior de un edificio (Medl, Stangl y Florineth, 2017), con aporte a la eficiencia energética del mismo (Perini, Ottelé, Fraaij, Haas y Raiteri, 2011).

b. Jardines verticales activos, definidos como un refrigerador evaporativo conectado al sistema de enfriamiento de aire mecánico del edificio, de manera que el aire que pasa detrás del jardín vertical se enfríe mediante evapotranspiración antes de ser expulsado a un espacio interior (Figura 1). En términos de modelar y cuantificar el rendimiento de jardines verticales activos, se han realizado varios estudios a lo largo de los años (Davis y Ramirez, 2013) (Davis y Hirmer, 2015) (Davis, Ramírez y Vallejo, 2015) (Davis, Ramírez y Perez, 2016).

Por otra parte, la UNESCO y CBD (Convention on Biological Diversity) reconoce que "el bienestar y sustento urbano y rural están íntimamente conectados con el estatus y las tendencias de la diversidad biológica y cultural, la misma que debe promoverse a través de subvenciones, creación de espacios verdes públicos, jardines comunitarios y el enverdecimiento de las ciudades". Se hace necesario entonces visibilizar, reconocer, apreciar, integrar, planificar y gestionar la naturaleza en el espacio urbano para alcanzar el bienestar humano (Fuller, Irvine, Devine-Wright, Warren y Gaston, 2007).

En el CHQ (Centro Histórico de Quito) viven 47.945 habitantes (INEC, 2010), y comprende 376 ha de protección edificada y 230 ha de protección natural (FLACSO; PNUMA, 2011) y de una rica biodiversidad a través de su historia, representada por aves, plantas y otros seres vivos que habitan en huertos, patios conventuales, jardines, quebradas, laderas, parques y plazas. El CHQ, entonces, es considerado como una gran oportunidad para implementar jardines verticales, constituyendo un nuevo pixel verde en el que subyace la imagen de la ciudad como mosaicos bioculturales (Cuvi, 2017).

La posibilidad de implementar el prototipo del jardín vertical activo, como innovación tecnológica en el Centro Histórico de Quito, abre un horizonte prometedor, a la adaptación de los edificios patrimoniales, y a su espacio público, preservando de manera sostenible el patrimonio cultural. Además, se plantea el uso de plantas nativas emblemáticas de la ciudad de Quito, con el fin de reducir su mantenimiento y cuidado, en especial por la reducción de demanda hídrica y su resistencia a plagas y contaminación del aire.

#### JARDÍN ACTIVO CMMC Y OTROS JARDINES

El prototipo de jardín vertical activo CMMC (Climatización de espacios por medio de un Muro verde de plantas Medicinales y Comestibles), diseñado y construido en la Pontificia Universidad Católica de Quito-Ecuador, actúa como unidad de enfriamiento (Davis, Vallejo y Ramírez, 2019) y como filtro, mejorando la calidad del aire. El CMMC está fijado al exterior de una pared de vidrio del edificio de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Artes de la Pontificia Universidad Católica de Ecuador. El jardín vertical mide 2,7 m de alto y 1,5 m de ancho. Está compuesto por una trama de 15 módulos de malla de alambre galvanizado de 0,46 x 0,46 cm con un espesor de 12 cm. El jardín vertical está orientado al suroeste y está a la sombra antes de las 13:00 hrs y expuesto al sol después de las 13:00 hrs, como se muestra en la Figura 2. El sustrato dentro de cada módulo se compone de una mezcla de tierra, esphagnum y cáscara de coco. El jardín vertical contiene una variedad de especies de plantas nativas, endémicas o plantas que, por su origen, historia, usos y tradiciones, se han convertido en emblemáticas de Ecuador, como la Lamiaceae sp. (Coleus), Crassulaceae (Flor amarilla), Aptenia sp., Hydrocotyle sp., Cymbalaria muralis, Alternanthera porrigens, Tillandsia recurvata e Iresine herbstii; Thymus vulgaris L.; Solanum dulcamara; Geranium robertianum (Jorgensen y Leon-Yanez, 1999), que reduce su mantenimiento y cuidado, en especial por la reducción de demanda hídrica, su resistencia a plagas y contaminación del aire, aspectos que son muy importantes a tomar en cuenta al emplazar este prototipo de jardín en un edificio patrimonial y en el espacio público del Centro del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ).

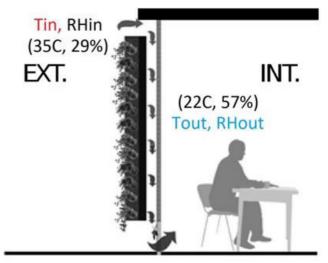


Figura 1: Esquema de flujo del aire en el jardín vertical activo como enfriador evaporativo y filtro de la calidad del aire. Elaboración propia.

En el jardín activo CMMC, la entrada de aire al jardín está ubicada en su parte superior, el cual fluye por una cámara de aire de 1,49 m de ancho y 5 cm de profundidad en el espacio detrás del jardín. La distancia que fluyó el aire se calculó como la suma de la longitud de los módulos expuestos al aire, sin tomar en cuenta el espacio ocupado por las bandas de respaldo, ya que estos no contribuirían a la refrigeración por evaporación (exponiendo un total de 0,33 m de profundidad por módulo o un total de 2,4 m). Se supone que el aire fluye sobre un total de cuatro módulos antes de ser expulsado por los ventiladores, y como tal, no fluye aire sobre la última fila de módulos debajo de los ventiladores antes de ser expulsado. El aire se enfrió y humidificó a través de su contacto con el sustrato como se muestra en la Figura 1. Para evitar la posible fuga de aire a lo largo de los laterales del jardín y entre los módulos, estos fueron sellados con espuma expandible. El sustrato fue regado por un sistema automático de goteo y recirculación. Antes de cada ronda de recolección de datos, se verificó que todas las partes constitutivas del sistema estuvieran en pleno funcionamiento y que el sustrato estuviera completamente saturado de aqua.



Figura 2: Fotografía de jardín activo CMMC en los predios de la PUCE. Fuente: Andrea Vallejo. 2017

## CONTAMINACIÓN DEL AIRE EN QUITO Y SU INFLUENCIA SOBRE LA SALUD Y LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Los contaminantes atmosféricos son causa importante para el desarrollo de enfermedades y aumento de la mortalidad en el DMQ (Estrella y otros, 2005) (Raysoni y otros, 2017; Raysoni y otros, 2016; WHO, 2016). Por ejemplo, el ozono (O3) provoca un aumento de la mortalidad entre el 1-2% cuando se sobrepasa los 100µg/m3, entre el 3-5% cuando se supera los 160µg/m3, y entre el 5-9% cuando se supera los 240µg/m3, debido principalmente a los problemas respiratorios y cardiovasculares que produce. En el caso del dióxido de nitrógeno (NO2), aumenta la respuesta bronquial en asmáticos con niveles superiores a 200µg/m3. Mientras que cuando las partículas con diámetro aerodinámico menor a 10 micrómetros (PM10) y 2,5 micrómetros (PM2,5) superan los 70 v 35µg/m3 respectivamente, aumenta el riesgo de mortalidad de la población en un 15% (Organización Mundial de la Salud, 2006; Registro Oficial, 2011). Adicional a los daños a la salud, los contaminantes degradan los materiales de construcción, especialmente por efectos corrosión (Ivaskova, Kotes y Brodnan, 2015; Christodoulakis, Varotsos, Cracknell y Kouremadas, 2018; Brimblecombe y Grossi, 2010), siendo la caliza (componente de muchos monumentos históricos de construcción) uno de los materiales que más se degradan (Corvo y otros, 2010; Di Turo y otros, 2016; Barca y otros, 2014).

La falta de planificación viene acabando con la armonía entre el ser humano y la naturaleza. Problemas como la falta de áreas verdes en el suelo urbano han demandado respuestas como la implementación de techos verdes y jardines verticales, los cuales, como la mayoría de vegetación urbana, brindan múltiples efectos positivos en la concentración, eficiencia cardiovascular, mejoramiento de la calidad del aire, confort térmico y acústico (Davis, Ramírez y Vallejo, 2015).

Desde 2004, la Secretaria de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito (SA-DMQ) controla la calidad del aire con ocho estaciones automáticas a lo largo de la ciudad y los valles aledaños. Este sistema ha reportado que durante 2016 y 2017 se han superado los límites máximos permisibles recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en materia de partículas PM10, PM2,5 y O3 (Secretaría de Ambiente del DMQ, 2017).

Estudios han demostrado que los árboles en zonas urbanas pueden contribuir significativamente en la reducción de contaminantes en el aire. Ejemplo de ello, en Estados Unidos se estima que anualmente se remueven 711.000 toneladas métricas de contaminantes. Yang (2008) estimó que en Chicago, con 27,87 Ha de techos verdes para el 2007 (Taylor, 2007) los niveles de remoción de contaminantes puede llegar a 85kg Ha-1 año-1 siendo un método económico para la remoción de contaminantes (Yang, Yu y Gong, 2008; Rowe, 2011).

Siendo el DMQ una ciudad que adolece del problema de una baja calidad del aire, por ubicarse en un valle rodeado de montañas que limitan la dispersión de contaminantes y al estar expuesto a una intensa radiación solar, es necesario buscar alternativas que permitan mitigar el efecto de contaminantes sobre la salud y los bienes patrimoniales. El objetivo que se ha planteado en este estudio es evaluar la influencia de dos tipos de jardines verticales como unidad de enfriamiento y purificación de aire. Para conseguir ello se analizaron 3 casos estudio, tomando en

cuenta jardines verticales activos y pasivos, en los que se midió la calidad del aire en sus cercanías, y se compararon con los niveles registrados en áreas sin la influencia de estos jardines.

#### **METODOLOGÍA**

#### Velocidad del aire

La velocidad del aire se determinó tomando mediciones individuales en varios puntos a lo largo de la entrada de aire en la parte superior del jardín (exterior del edificio) y en los puntos de salida de aire de los ventiladores de jardín vertical (interior del edificio). La velocidad del aire se midió usando un anemómetro PCE-009, registrando la velocidad del aire de entrada en la toma superior, y de salida del aire en cada ventilador, observándose una velocidad estable.

## Temperatura y humedad del aire

Se usaron tres termohigrómetros para mediciones simultáneas de la temperatura del aire y la humedad relativa:

- a. Aproximadamente a 3 m del jardín vertical en el espacio exterior
- b. En el centro de la entrada de aire.
- c. En la salida de aire del ventilador central en el espacio interior.

Los termohigrómetros utilizados fueron 3 Voltcraft USB DL-121TH Data-Loggers. Los valores de temperatura y humedad relativa (RH) se registraron cada 10 segundos en la memoria interna de los termohigrómetros, y los resultados se transfirieron a un archivo de Excel. Luego se hizo una comparación entre las mediciones de las condiciones climáticas ambientales, las de la entrada de aire en la parte superior del jardín en el exterior del edificio y del aire expulsado por los ventiladores en el interior del edificio.

#### **CONDICIONES EXPERIMENTALES**

Se realizaron un total de 4 rondas de mediciones. Las dos primeras pruebas experimentales sirvieron para establecer los procedimientos de medición y los datos que se compararán en las pruebas posteriores, mientras que las ejecuciones 3 y 4 mostraron resultados más precisos. La ronda final se consideró la más precisa y bajo las condiciones más favorables; caliente y seco con la luz solar directa cayendo sobre el jardín. Esto significaba la temperatura de entrada más alta y la humedad relativa de entrada más baja, y como tal el mayor potencial para el análisis de enfriamiento por evaporación.

Para las cuatro rondas de mediciones, se examinaron los 100 puntos finales, donde se asumió que en ese momento el jardín estaría funcionando en toda su capacidad. Además, la comparación se realizó entre las mediciones de la temperatura ambiente, la entrada de aire y la salida de aire con una separación de 7 y 5 s respectivamente. De esta forma, se garantiza la inmediatez y casi simultaneidad del registro de la temperatura del aire de entrada con el registro de la temperatura del aire de salida.

## CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE ENFRIAMIENTO DEL AIRE

La capacidad de enfriamiento para el jardín vertical se estimó usando la siguiente ecuación:

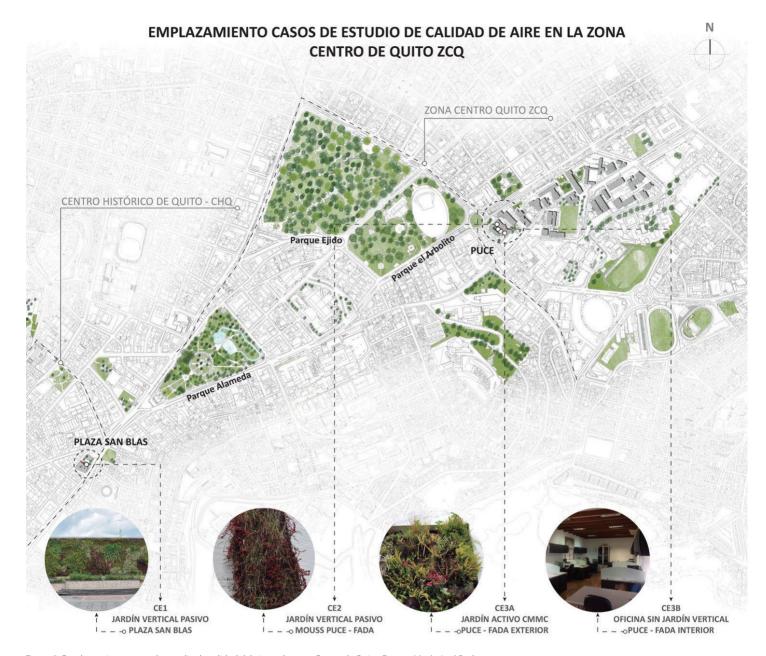


Figura 3: Emplazamiento casos de estudio de calidad del aire en la zona Centro de Quito. Fuente: María José Burbano.

#### Dónde:

$$Q \times \rho \times C \times \Delta T$$
 = Capacidad de enfriamiento [W] Q = caudal de aire volumétrico [m³ s¹]  $\rho$  = densidad del aire = 0,811 [kg m²]  $\rho$  = calor específico del aire = 1000 [J kg¹¹ °C¹]  $\rho$  = cambio de temperatura [°C]

Suponiendo que existiera un flujo de estado estacionario por la parte posterior del jardín donde no ocurriera la pérdida de aire o la infiltración, la velocidad de flujo volumétrico podría ser a través de la velocidad promedio y el área de la sección transversal en la entrada del jardín:

$$1.4 \times 0.0725 = 0.104 \,[\text{m}^3 \,\text{s}^{-1}]$$
 (2)

Como tal, la capacidad de enfriamiento podría calcularse usando la siguiente relación:

Capacidad de enfriamiento = 
$$84.3 \Delta T [W]$$
 (3)

Dónde:  $\Delta T = la diferencia de temperatura [°C]$ 

#### Cálculo de eficiencia y tasa de cambio de aire

La eficiencia para el jardín vertical activo se calculó con la siguiente ecuación:

$$\epsilon = (T_{db} - T_{cooled}) / (T_{db} - T_{wb}) \times 100 \, [\%] \tag{4}$$
 Dónde:  $T_{db} =$  temperatura de bulbo seco del aire de entrada  $T_{cooled} =$  temperatura de bulbo seco del aire de salida  $T_{wb} =$  temperatura del bulbo húmedo del aire de entrada (Wang, 2000)

La temperatura del bulbo húmedo se calculó para una presión de aire de 71,85 kPa a 2850 m sobre el nivel del mar en la ciudad de Ouito.

Para calcular la tasa de intercambio de aire para el jardín vertical activo en pies cúbicos por minuto (cfm), se utilizó la siguiente conversión de unidades:

velocidad de intercambio de aire [cfm] = Q [m³/s]  $\times$  [(3,28084 pies) / m] $^3 \times$  [(60 s) / min] (5)

Donde Q es la tasa de flujo volumétrico del aire detrás del jardín vertical activo, es decir, 0,104 m³ s⁻¹.

#### Calidad del aire

Existen diversos estudios sobre la estimación de la disminución y asimilación de contaminantes en cercanías de jardines artificiales, utilizando modelos de dispersión que toman en cuenta factores como la velocidad de sedimentación de los contaminantes (Yang, Yu y Gong, 2008). Sin embargo, existe limitada información

al respecto de mediciones en campo del efecto de la asimilación de contaminantes por jardines verticales. Estas medidas son específicas del sitio de medición y del volumen de aire que es influenciado en cada caso (Tan y Sia, 2005). Para el desarrollo de este trabajo, se realizaron mediciones de la calidad del aire a filo de calle y en las cercanías de los jardines verticales estudiados en varios lugares del Centro de Quito. Se analizaron 3 casos de estudio que se detallan en la Tabla 1 y Figura 3.

Cada caso estudio especifica los lugares y fechas en las que se realizaron las mediciones. El primer caso estudio corresponde al aporte que brinda el jardín pasivo construido en la Plaza Pública de San Blas, ubicado en el Centro Histórico del DMQ. El segundo caso estudio corresponde a el Muro Orgánico Urbano Silvestre Sostenible (MOUSS), diseñado y construido en la PUCE. El tercer caso estudio evalúa el comportamiento del jardín activo CMMC, también diseñado y construido por la PUCE. En este caso se compararon mediciones de aire en el área aledaña al jardín CMMC y en una oficina de profesores de la Facultad de Arquitectura Diseño y Artes FADA-PUCE.

**Tabla 1**: Descripción de puntos de monitoreo. Elaboración propia.

Caso Estudio	Jardín vertical	Fechas de monitoreo	Ambiente circundante	Fechas de monitoreo
1. Jardín vertical pasivo de 80 m2 de área (CE1)	Jardín vertical pasivo San Blas Coordenadas: -0,218094/-78,506162	Gases: 05/07/2018 a 09/07/2018 Partículas: 07/07/2018 a 09/07/2018	Secretaría de seguridad del DMQ, calles Guayaquil y Espejo Coordenadas: -0,221452/-78,510926	Gases: 05/04/2018 a 12/04/2018 Partículas: 09/04/2018 a 10/04/2018
2. Jardín vertical pasivo de 5 m2 de área (CE2)	Jardín vertical pasivo MOUSS- PUCE Coordenadas: -0,210563/-78,492965	Gases: 30/07/2018 a 03/08/2018 Partículas: 30/07/2018 a 01/08/2018	Ingreso a PUCE intersección 12 de octubre y Ladrón de Guevara (garita de guardia)  Coordenadas -0,210385/-78,493335	Gases: 16/03/2018 a 22/03/2018 Partículas: 21/03/2018 a 22/03/2018
3. Jardín vertical activo de 4,5 m2 de área (CE3A)	Jardín vertical activo CMMC - PUCE, espacio interior Coordenadas: -0,210527/-78,493208	Gases: 07/09/2018 a 12/09/2018 Partículas: 08/09/2018 a 10/09/2018	Exterior, FADA PUCE  Coordenadas: -0,210545/-78,493234	Gases: 12/09/2018 a 17/09/2018 Partículas: 12/09/2018 a 14/09/2018
4. Oficina sin Jardín vertical (CE3B)	Oficina FADA PUCE  Coordenadas: -0,210773/-78,493351	Partículas: 20/09/2018 a 21/09/2018	Interior, FADA PUCE  Coordenadas: -0,210545/-78,493234	Partículas: 12/09/2018 a 14/09/2018

La calidad del aire ambiente fue medida con el AQM60 Environmental Monitor V5.0 de AEROQUAL (AEROQUAL, 2018). Los parámetros analizados fueron dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), ozono (O<sub>3</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). El material particulado fue monitoreado con el equipo AEROCET831 de Metone. Se determinó material particulado con diámetro aerodinámico menor a 2,5 micrómetros (PM<sub>2,5</sub>) y menor a 10 micrómetros (PM<sub>10</sub>) (Met One Instruments Inc, 2018). Las concentraciones de gases (NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> y CO<sub>2</sub>) se midieron en partes por millón (ppm) y las concentraciones de partículas en µg/m3 (PM<sub>2,5</sub> y PM<sub>10</sub>) a condiciones locales. En la tabla 2 se describen las condiciones de funcionamiento de los monitores utilizados.

**Tabla 2**: Descripción de monitores de calidad de aire y captura de datos. Elaboración Propia.

Sensor	Método	Captura de datos		
CO <sub>2</sub>	Instrumental Infrarrojo no dispersivo	Cada dos minutos		
O <sub>3</sub>	Semiconductor Sensible a Gas (GSS)	Cada dos minutos		
NO <sub>2</sub>	GSS	Cada dos minutos		
PM <sub>2.5</sub> y PM <sub>10</sub>	Contador de partículas	Cada minuto		

Las series de tiempo se realizaron en Excel utilizando tablas dinámicas. Se establecieron promedios horarios de cada uno de los parámetros analizados y se evaluaron los porcentajes de variación entre las mediciones realizadas en cercanías a jardines verticales y en ambientes sin su influencia (Tabla 1) mediante la siguiente ecuación:

% 
$$Variación = \frac{v_j - v_e}{v_e} * 100$$
 (6)

Donde  $V_e$  es el valor del parámetro analizado en el ambiente sin la influencia del jardín vertical y  $V_j$  es el valor del parámetro analizado en las cercanías del jardín vertical.

La comparación entre los valores obtenidos en las cercanías del jardín y en áreas sin su influencia, se realizaron aplicando, en primer caso, la correlación cruzada, la cual permite relacionar las series de tiempo descritas en la Figura 4 y determinar su coeficiente de correlación de Pearson a distintos retrasos (lags). Esta prueba permite observar el patrón de variación cíclica de los contaminantes a través del día. En segundo caso, se evaluó la diferencia significativa entre las muestras obtenidas en las cercanías del jardín y en áreas sin su influencia mediante la prueba de *t de student* modificada para grupos con diferentes varianzas, también conocida como prueba de Welch. Ambos análisis se realizaron con el software RStudio versión 3.5.1.

## **RESULTADOS**

## Velocidad del aire

La velocidad del aire de las mediciones tomadas en 9 ubicaciones a lo largo de la entrada vertical del jardín (exterior del edificio)

varió de 1,3 a 1,6 m s<sup>-1</sup>, con un promedio de 1,4 m s<sup>-1</sup>. Este valor promedio de la velocidad del aire de entrada se usó como el valor de la velocidad promedio del aire detrás del jardín para todos los cálculos. Las velocidades de aire medidas en el interior del edificio en las salidas de los 5 ventiladores para el aire expulsado del jardín vertical mostraron una variación mayor que las de la entrada, que van de 1,3 a 2,8 m s<sup>-1</sup>.

#### Temperatura y humedad del aire

En todas las mediciones realizadas se demostró una reducción de la temperatura entre las condiciones climáticas ambientales y el aire en la entrada del jardín. Esto proporciona evidencia de preenfriamiento del aire incluso antes de que ingrese a la cámara de aire detrás del sustrato, lo que sería de interés para futuras investigaciones. El resumen de resultados para las cuatro rondas de mediciones se enumera en la Tabla 3. La Ronda 3 midió las mayores reducciones de temperatura entre la temperatura ambiente y la salida del jardín, mientras que la Ronda 4 midió las mayores reducciones de temperatura y el aumento de humedad relativa entre el aire en la entrada y la salida.

## Capacidad de enfriamiento del aire

La capacidad de enfriamiento se calculó considerando la diferencia entre las temperaturas ambiente y de salida, lo que explica el efecto de pre enfriamiento en la entrada del jardín. También se calculó considerando la diferencia entre las temperaturas de entrada y salida. Para los cálculos de ambiente versus de salida, la capacidad de enfriamiento varió de 1036,6 a 1382,1 W, con un promedio de 1203,2 W. Para los cálculos de entrada y salida, la capacidad de enfriamiento varió de 548,0 a 859,9 W, con un promedio de 682,8 W.

## Rendimiento: eficiencia y tasa de cambio de aire

La eficiencia para el jardín vertical activo se calculó primero usando valores para la mayor caída de temperatura y la menor caída de temperatura entre la entrada y la salida. La eficiencia para la mayor caída de temperatura (10,2 °C) fue del 26,8%. La eficiencia para la menor caída de temperatura (6,5 °C) fue del 18,5%. La eficiencia se calculó luego teniendo en cuenta el pre-enfriamiento, al examinar las mayores y menores caídas de temperatura entre el aire ambiente y la salida. La eficiencia para la mayor caída de temperatura (16,4 °C) fue del 39,0%. La eficiencia para la menor caída de temperatura (12,3 °C) fue del 31,7%.

La tasa de intercambio de aire en cfm se calculó a partir de la tasa de flujo volumétrico calculada en la Ecuación 4 y utilizando la conversión de la unidad en la Ecuación 5. Esta conversión produjo una tasa de intercambio de aire de 220,4 cfm.

Se realizó la prueba chi-cuadrada de Pearson ( $\chi^2$ ) entre la diferencia de temperatura promedio Ambiente-Entrada y la diferencia de temperatura Entrada-Salida para establecer si hay una asociación estadísticamente significativa entre las variables para cada una de las cuatro tomas de datos realizadas. La hipótesis utilizada fue la siguiente:

 $\rm H_{\rm o}$  (Hipótesis 0): La diferencia de temperatura no está influenciada por el Jardín Vertical.

 $\rm H_{\scriptscriptstyle 1}$  (Hipótesis 1): La diferencia de temperatura está influenciada por el Jardín Vertical.

Tabla 3: Resumen de los resultados de temperatura y humedad relativa para las 4 rondas del monitoreo. Elaboración Propia.

	Primer	a toma de (	datos	Segunda toma de datos		Tercera toma de datos		Cuarta toma de datos				
	Ambiente vs. Salida	Ambiente vs. Entrada	Entrada vs. salida	Ambiente vs. Salida	Ambiente vs. Entrada	Entrada vs. salida	Ambiente vs. Salida	Ambiente vs. Entrada	Entrada vs. salida	Ambiente vs. Salida	Ambiente vs. Entrada	Entrada vs. salida
Diferencia de temperatura máxima °C	3,6	2,4	1,2	15,9	13,7	2,4	19,3	16,3	3,5	16,4	7,8	10,2
Diferencia de temperatura mínima °C	1,8	1,2	0,4	12,8	11,1	1,6	13,6	10,3	2,1	12,3	3,5	6,5
Diferencia de temperatura promedio °C	2,5	1,7	0,8	14,1	12,2	1,9	16,3	13,6	2,7	14,3	6,2	8,1
Diferencia de Humedad Relativa máxima [%]	14,7	11,2	6,7	33,4	23,8	11,6	35,8	25,3	14,4	29,5	7,6	25,4
Diferencia de Humedad Relativa mínima [%]	11,2	7,6	1,2	28	18,4	8,7	27	14,4	6,6	23,0	0,7	18,1
Diferencia de Humedad Relativa promedio [%]	12,6	8,6	3,9	30,6	20,6	10,0	31,6	19,9	11,6	25,7	4,0	21,7

Como resultado, usando un nivel de significancia de 0,05, se rechazó la H0 en todas las tomas de datos; por lo tanto, las diferencias son estadísticamente representativas, como se puede ver en la Tabla 4.

**Tabla 4**: Prueba chi-cuadrada de Pearson ( $\chi^2$ ). Elaboración Propia.

Toma de Datos	χ² Calculado χ² Tab		Resultado		
Primera	0,85		H0 nula		
Segunda	1,98	3,84	H0 nula		
Tercera	2,14		H0 nula		
Cuarta	3,74		H0 nula		

## DISCUSIÓN

En general, los resultados muestran que el jardín vertical activo redujo la temperatura y aumentó la humedad relativa del aire que pasa detrás del sustrato. De acuerdo con los principios del enfriamiento por evaporación, la relación entre temperatura y humedad es inversa; cuanto mayor es la humedad, menor es la temperatura y viceversa (Wang, 2000). El jardín vertical activo enfrió el aire en un promedio de 8,1 °C. Incluyendo los efectos del pre-enfriamiento en la entrada del jardín, el jardín enfrió el aire a una temperatura promedio de 14,3 °C. Como tal, los resultados de esta investigación indican que el jardín vertical activo es una tecnología alternativa prometedora para refrigerar espacios interiores. Las siguientes secciones consideran los diversos aspectos de estos resultados, que permiten un mayor desarrollo de los sistemas activos de jardines verticales.

### Comparación de rendimiento

Para analizar el rendimiento del jardín vertical activo, se realizó una comparación entre los resultados de este experimento y los

sistemas de enfriamiento de aire activo tradicionales. Debido a que las unidades de aire acondicionado son los sistemas más adoptados y los enfriadores evaporativos directos se parecen más a la tecnología utilizada en el jardín vertical activo, se consideraron estos dos métodos de enfriamiento activo. Como se mencionó anteriormente, el rendimiento de las unidades de aire acondicionado tiende a medirse en capacidad de enfriamiento (Btu por hora o W) y el rendimiento de los enfriadores evaporativos tiende a medirse en la tasa de intercambio de aire (cfm) y la eficiencia (%). Por lo tanto, el jardín vertical activo se comparó con cada método de enfriamiento activo utilizando diferentes medidas. Estas comparaciones se resumen en la Tabla 5.

**Tabla 5**: Comparación de rendimiento de jardín vertical activo, unidades de aire acondicionado y enfriadores evaporativos directos (Oropeza-Perez y Østergaard, 2018; U.S. Energy Information Administration, 2018; Wang, 2000). Elaboración Propia.

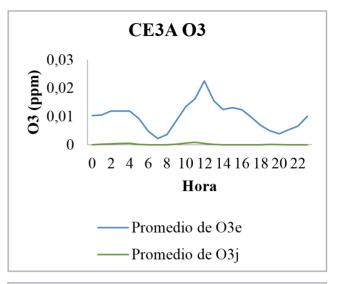
Capacidad de enfriamiento	Ambiente vs Salida	Entrada vs. Salida		
Máximo [W]	1382,1	859,86		
Mínimo [W]	1036,6	548,0		
Promedio [W]	1203,2	682,8		

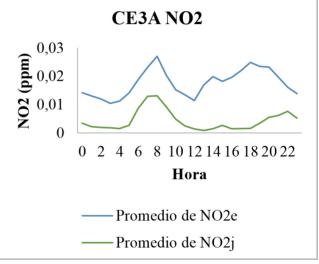
En general, los resultados de rendimiento son prometedores y demuestran que los jardines verticales activos son capaces de enfriar el aire. Como se ve en la Tabla 5, en todas las categorías de rendimiento, el jardín vertical activo tiene un rendimiento potencialmente comparable tanto para las unidades de aire acondicionado como para los enfriadores evaporativos directos. Las diferencias de temperatura entre el aire entrante y el expulsado fueron comparables para el jardín vertical activo y un enfriador evaporativo directo. Si consideramos todos los beneficios de jardines verticales pasivos en el bienestar humano, y los sumamos a los beneficios que los jardines verticales activos tienen en el campo de la construcción de sistemas HVAC como una estrategia general para la reducción de energía y el aumento del rendimiento del edificio, queda demostrado el aporte de beneficio en la escala urbana, como espacio público pero también en la escala arquitectónica del edifico, componentes que forman el patrimonio cultural del CHQ.

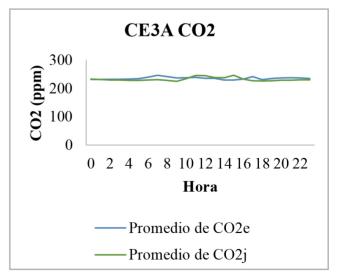
## Calidad del aire

Cabe recalcar que el objetivo del trabajo es trazar una ruta que permita profundizar las investigaciones en la remoción de contaminantes atmosféricos mediante su absorción por la flora. Las variaciones registradas en las mediciones tienen muchas causas, las cuales están indefinidas y se investigó si uno de esos factores es la presencia del jardín vertical en la zona. En el estudio se compararon los niveles de contaminantes en las cercanías de los jardines verticales (activo o pasivos) respecto a los niveles de contaminantes en ambientes sin su influencia. Las series de tiempo del comportamiento de contaminantes durante el día se reportan en la Figura 4 para el caso CE3A, siendo las series con el subíndice "e" los parámetros medidos en áreas sin la influencia

del jardín vertical, y las series con subíndice "j" las medidas en las cercanías del jardín, según lo detallado en la Tabla 1.







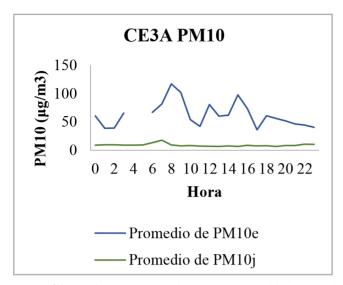


Figura 4: Perfil horario de contaminantes del CE3A para cercanías del jardín vertical activo (con subíndice "j") y en ambientes sin la influencia del jardín vertical (oficina) (con subíndice "e"). Elaboración Propia.

Respecto a las concentraciones de contaminantes medidos sin la influencia del jardín vertical (series con subíndice "e") se registran tendencias similares a las evaluadas y analizadas de manera detallada en la literatura (Chuquer y otros, 2018; Secretaría de Ambiente del DMQ, 2018). En general se observa que el O3 presenta picos máximos de concentración a la hora de máxima radiación solar, mientras que el PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> y NO<sub>2</sub> registran picos de máxima concentración en el periodo de mayor actividad antropogénica, entre las 7-8 am. Para el CO<sub>2</sub> se observan datos casi constantes durante el día.

Al momento de comparar las concentraciones en las cercanías del jardín y en áreas sin su influencia para el CE3A, se observan que todos los contaminantes evaluados (O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>) tienen comportamientos similares con coeficientes de correlación máximos en 0 retrasos (Figuras 5a – 5e). Sin embargo, existen disminuciones significativas de todos los contaminantes (Figura 5f), lo que indica que su asimilación en el jardín vertical mejora significativamente la calidad del aire que esta circundante a él

La disminución de contaminantes provocada por la influencia de los jardines verticales en distintas zonas de Quito se detalla en la Figura 6. Los resultados reportados indican la selectividad que tiene la flora en la absorción de contaminantes. La medición para CE3A reporta que los jardines activos tienen mayor eficiencia en la remoción de todos los contaminantes evaluados respecto a los jardines pasivos, obteniéndose reducciones de O, y NO, del 99% y 76%, respectivamente. Las mediciones para CE1 y CE2 se realizaron en periodos diferentes, por lo que variabilidad de los datos puede deberse a las distintas fechas de monitoreos. Con información histórica de la calidad del aire en Quito, proporcionada por la Secretaria de Ambiente (SA) (Secretaría de Ambiente del DMQ, 2018), se calcularon las diferencias en las concentraciones de los parámetros debidas a las épocas de monitoreo. Respecto al O3, entre marzo y julio de 2017 existió una diferencia del 33% (mayor en julio por el verano y la intensa radiación solar de la época), mientras que en los casos estudio evaluados existió una reducción entre el 38 y 86% en los niveles del contaminante. Respecto al NO<sub>2</sub>, la diferencia de las concentraciones en marzo y julio de 2017 fue de 67%. La diferencia fue mayor en marzo y abril por las bajas temperaturas, lo cual disminuye le eficiencia de los motores y provoca mayor emisión de NO<sub>3</sub> (Zalakeviciute, López-Villada y Rybarczyk, 2018). En los jardines analizados

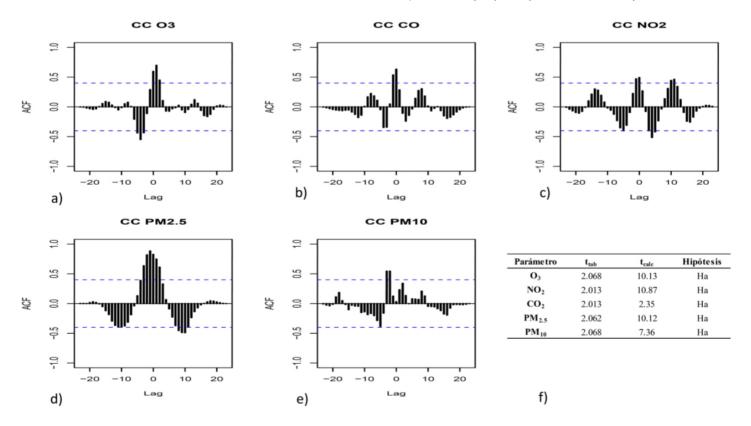
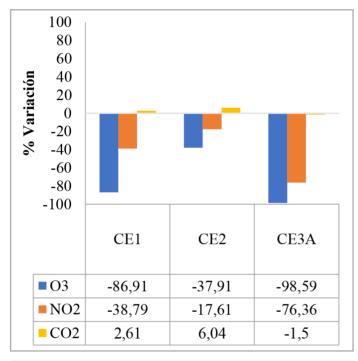


Figura 5: Análisis estadístico de correlación cruzada para distintos contaminantes (a-e) y prueba de t de student de Welch (f). Elaboración propia.

existió una reducción entre el 18 y 38% en los niveles del contaminante. Ambas comparaciones demuestran la existencia de factores adicionales a los meteorológicos que remueven estos contaminantes del aire, pudiendo ser uno de ellos la influencia de los jardines verticales. Para el caso del CO<sub>2</sub> existen incrementos significativos (hasta un 6,04%) en las mediciones tanto en las cercanías de los jardines verticales y en sitios alejados de su influencia. Los valores reportados en el estudio guardan concordancia con las remociones de contaminantes publicadas por Yang (2008), donde estima que el ozono y dióxido de nitrógeno son los contaminantes que son removidos con mayor eficiencia por techos verdes (Yang, Yu y Gong, 2008).



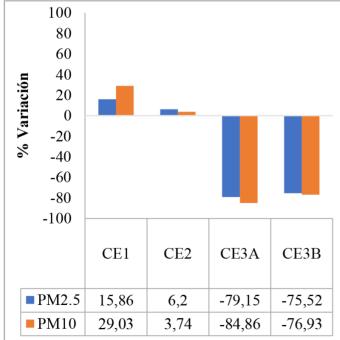


Figura 6: Porcentajes de variación entre niveles de contaminantes en ambientes cercanos a jardines verticales y ambientes sin su influencia. Elaboración Propia.

Respecto al análisis de material particulado, se encontraron diferencias en el comportamiento de cada tipo de jardín. Para el caso de jardines pasivos (CE1 y CE2) se observaron variaciones que pueden atribuirse principalmente al cambio estacional de concentraciones de los contaminantes, como lo reporta la SA del DMQ (aumento del 17% en PM<sub>2.5</sub> y aumento del 29% en PM<sub>10</sub> en julio respecto a abril).

Para el caso del jardín activo CMMC (CE3A), se observó una drástica disminución de  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$ ; sin embargo, el jardín activo ingresa aire a ambientes interiores, por lo que se realizaron mediciones en otro ambiente interior en el que no existe un jardín activo. Los resultados demostraron que el jardín activo CMMC disminuyó los niveles de  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$  en un 79 y 85% respecto a los niveles exteriores, y mejoró la calidad del aire en un ambiente interior en un 4% y 8% para  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$  respectivamente comparando con un ambiente interior sin un jardín activo.

#### **CONCLUSIONES**

El objetivo de esta investigación fue cuantificar el rendimiento de un prototipo de jardín vertical activo como unidad de enfriamiento por evaporación alternativa. El jardín vertical activo enfrió el aire en un promedio de 14,3 °C, con una capacidad de enfriamiento promedio de 1.203,2 W. Estos valores de rendimiento final incluyeron un efecto de pre-enfriamiento medido, con el aire en la entrada del jardín, siendo en promedio 6,2 °C más frío que el ambiente.

La condición del prototipo de jardín activo, de estar expuesto en determinadas horas del día a la luz solar o a la sombra, tuvo un gran efecto en su capacidad de enfriamiento. Se demostró que la capacidad de enfriamiento del jardín activo es comparable a las unidades de aire acondicionado y los refrigeradores evaporativos tradicionales, además de tener las ventajas que mejora la calidad del aire cerca del jardín vertical activo, y por lo tanto las condiciones de salubridad del usuario y visitante del CHQ.

En general, en esta etapa de la investigación se puede decir que los jardines verticales activos continúan siendo prometedores como sistemas alternativos de enfriamiento activo y en este caso con un componente especial, que por la presencia de especies vegetales nativas o emblemáticas de Quito, constituyen una recuperación del patrimonio cultural de la ciudad de Quito, pues hasta ahora están presentes sólo en quebradas naturales cercanas a la ciudad de Quito, último relicto de la flora y fauna andina.

Respecto a la calidad del aire, se evidencia que los jardines verticales activos y pasivos disminuyen significativamente los niveles de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> en sus áreas circundantes. Además, se comprobó que el jardín vertical activo remueve de manera más eficiente los contaminantes O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> y PM<sub>25</sub> respecto a un jardín vertical pasivo.

El prototipo CMMC supone una innovación tecnológica a ser considerada para preservar de manera sostenible el patrimonio cultural en el Centro de Quito, refuerza el vínculo del habitante con su entorno urbano, resignificando el espacio público en un proceso que se construye en la cotidianidad.

#### **AGRADECIMIENTOS**

El trabajo descrito en este documento fue financiado por la Pontificia Universidad Católica del Ecuador (Proyecto O13084). Los autores reconocen el apoyo provisto por María José Burbano, en la edición de las imágenes.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- AEROQUAL (2018). AQM60. 05,03,2018. www.aeroqual. com/wp-content/uploads/AMQ-60-Air-Quality-Monitoring-Station-User-Guide-V1.pdf.
- Barca, D., Comite, V., Belfiore, C., Bonazza, A., La Russa, M., Ruffolo, S., Sabbioni, C. (2014). Impact of air pollution in deterioration of carbonate building materials in Italian urban environments. Applied Geochemistry (48), 122-131.
- Brimblecombe, P. y Grossi, C. (2010). Potential Damage to Modern Building Materials from 21st Century Air Pollution. The Scientific World Journal, 116-125.
- Christodoulakis, J., Varotsos, C., Cracknell, A., y Kouremadas, G. (2018). The deterioration of materials as a result of air pollution as derived from satellite and ground based observations. Atmospheric Environment (185), 91-99.
- Chuquer, D. S., Ampudia, S. H., Puertas, C. C., Bustamante, L. A., Reina, C. A. y Ramírez, R. F. (2018). Contaminación del aire a filo de calle en Quito, caso estudio Guayaquil y Espejo. Revista Perfiles 20(1).
- Corvo, F., Reyes, J., Valdés, C., Villaseñor, F., Cuesta, O., Aguilar, . . . Quintana, P. (2010). Influence of Air Pollution and Humidity on Limestone Materials Degradation in Historical Buildings Located in Cities Under Tropical Coastal Climates. Water, Air and Soil Pollution (205), 359-375.
- Cuvi, N. (2017). Las ciudades mosaico bioculturales; caso del centro histórico de Quito. Revista Etnobiología 1(15), 5-25.
- Davis, M. M. y Hirmer, S. (2015). The potential for vertical gardens as evaporative coolers: An adaptation of the 'Penman Monteith Equation'. Building and Environment (92), 135-141.
- Davis, M. M., Ramírez, F. y Pérez, M. (2016). More than just a Green Façade: vertical gardens as active air conditioning units. Procedia Engineering (145), 1250-1257.
- Davis, M. y Ramírez, F. (2013). Muro Orgánico Urbano Silvestre Sostenible. Memorias Primer Congreso Internacional y Expo Científica (28), 1-8. Quito: INEER.
- Davis, M., Ramírez, F. y Vallejo, A. (2015). Vertical Gardens as Swamp Coolers. Procedia Engineering (118), 145-159.
- Davis, M. M., Vallejo Espinosa, A., y Ramirez, F. R., (2019).
   "Beyond green façades: active air-cooling vertical gardens",
   Smart and Sustainable Built Environment, https://doi.org/10.1108/SASBE-05-2018-0026.
- Di Turo, F., Proietti, C., Screpanti, A., Fornasier, M., Cionni, I., Favero, G. y De Marco, A. (2016). Impacts of air pollution on

- cultural heritage corrosion at European level: What has been achieved and what are the future scenarios. Environmental Pollution (218), 586-594.
- Estrella, B., Estrella, R., Oviedo, J., Narvaez, X., Reyes, M., Gutierrez, M. y Naumova, E. (2005). Acute respiratory diseases and carboxyhemoglobin status in school children of Quito, Ecuador. Environmental Health Perspect, 607-611.
- Fjeld, T., Veiersted, B., Sandvik, L., Riise, G. y Levy, F. (1998). The Effect of Indoor Foliage Plants on Health and Discomfort Symptoms among Office Workers. Indoor and Built Environment 4(7), 204-209.
- FLACSO; PNUMA. (2011). Perspectivas del ambiente y cambio climático en el medio urbano: ECCO Distrito Metropolitano de Quito. Quito: FLACSO.
- Fuller, R., Irvine, K., Devine-Wright, P., Warren, P. y Gaston, K. (2007). Psychological benefits of greenspace increase with biodiversity. Biology Letters, 390-394.
- Grimmond, S. y WMO Secretariat (2014), "Towards integrated urban weather, environment and climate services", WMO Bulletin, Vol. 63 No. 1, pp. 10-14.
- INEC (2010). VII Censo de Población y VI de Vivienda. Quito: INEN.
- Ivaskova, M., Kotes, P. y Brodnan, M. (2015). Air Pollution as an Important Factor in Construction Materials Deterioration in Slovak Republic. Procedia Engineering (108), 131-138.
- Jorgensen, P. y León-Yáñez, S. (1999). Catalogue of the Vascular Plants of Ecuador. Saint Louis: Monogr. Syst. Bot. Missouri Botanical Garden. (75), 1-1182.
- Lohr, V., Pearson-Mims, C. y Goodwin, G. (1996). Interior Plants May Improve Worker Productivity and Reduce Stress in a Windowless Environment. Journal of Environmental Horticulture 2(14), 97-100.
- Medl, A., Stangl, R. y Florineth, F. (2017). Vertical greening systems A review on recent technologies and research advancement. Building and Environment (125), 227-239.
- Met One Instruments Inc. (2018) Indoor & Controlled Environments. 05, 03, 2018. metone.com/indoor-controlled-environment/aerocet-531s-handheld-particle-counter/.
- Organización Mundial de la Salud (2006). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre; Actualización mundial 2005. Resumen de evaluación del riesgo. Ginebra: Ediciones de la OMS.
- Oropeza-Perez, I. y Østergaard, A. (2018). Active and passive cooling methods for dwellings: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 1(82), 531-544.
- Pérez, G., Rincón, L., Vila, A., González, J.M., Cabeza, L.F. (2011), "Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings", Applied Energy. Vol. 88 No. 12, pp.4854-9.

- Perini, K., Ottelé, M., Fraaij, A., Haas, E. y Raiteri, R. (2011). Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope. Building and Environment 11(46), 2287-2294.
- Perini, P., Bazzocchi, F., Croci, L., Magliocco, A. y Cattaneo, E. (2017). The use of vertical greening systems to reduce the energy demand for air conditioning. Field monitoring in Mediterranean climate. Energy and Buildings (143), 35-42.
- Raysoni, A., Armijos, R., Weigel, M., Echanique, P., Racines, M., Pingitore Jr, N. y Li, W. (2017). Evaluation of Sources and Patterns of Elemental Composition of PM2.5 at Three Low-Income Neighborhood Schools and Residences in Quito, Ecuador. International Journal Environmental Research and Public Health 7(14), 674.
- Raysoni, A., Armijos, R., Weigel, M., Montoya, T., Eschanique, P., Racines, M. y Li, W. (2016). Assessment of indoor and outdoor PM species at schools and residences in a high-altitude Ecuadorian urban center. Environmental Pollution (214), 668-679.
- Shanahan, D. F., Bush, R., Gaston, K. J., Lin, B. B., Dean, J., Barber, E., y Fuller, R. A. (2016). Health benefits from nature experiences depend on dose. Scientific reports, 6, 28551.
- TULSMA (2011). Registro Oficial. Libro VI Anexo 4. Norma de calidad del aire o nivel de inmisión Libro VI Anexo 4. Quito, Pichincha, Ecuador: Registro Oficial.
- Rowe, B. (2011). Green roofs as a means of pollution abatement. Environmental Pollution 8-9 (159), 2100-2110.
- Secretaría de Ambiente del DMQ (2017). Informe de la calidad de aire - 2016. Quito: Secretaría de Ambiente del DMO.
- Secretaría de Ambiente del DMQ (2018). Informe de la calidad del aire - 2017. Quito: Secretaría de Ambiente del DMQ.
- Tan, P. y Sia, A. (2005). A pilot green roof research project in Singapore. Proceedings of Third Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference, Awards and Trade Show. Washington, DC.
- Taylor, D. (2007). Growing Green Roofs, City by City. Environmental Health Perspectives 6(115), A306–A311.
- UN (2011). United Nations Human Settlements Programme. Cities and Climate Change: Global report on Human Settlements 2011.
- U.S. Energy Information Administration (2018). FREQUENTLY ASKED QUESTIONS. How is electricity used in U.S. homes? 02, 18, 2018. https://www.eia.gov/tools/faqs/faq. php?id=96&t=3
- Ulrich, R., Simons, R., Losito, B., Fiorito, E., Miles, M. y Zelson, M. (1991). Stress recovery during exposure to natural and urban environments. Journal of Environmental Psychology 3(11), 201-230.

- Wang, S. K. (2000). Air Conditioning Systems: Evaporative Cooling Systems and Evaporative Coolers, chapter 27. En S. K. Wang, Handbook of Air Conditioning and Refrigeration 2nd ed. New York, NY. 2000: McGraw-Hill.
- WHO. (2016). Ambient air pollution: A global assesment of exposure and burden of disease. Geneva: WHO document production services.
- Wolverton, B., Johnson, A. y Bounds, K. (1989). Interior Landscape Plants for Indoor Air Pollution Abatement. Hancock County, Mississippi.: NASA Stennis Space Center.
- Yang, J., Yu, Q. y Gong, P. (2008). Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. Atmospheric Environment 31(42), 7266–7273.
- Zalakeviciute, R., López-Villada, J. y Rybarczyk, Y. (2018).
   Contrasted Effects of Relative Humidity and Precipitation on Urban PM2.5 Pollution in High Elevation Urban Areas.
   Sustainability 6(10), 2064.
- Zhang, Y., Murray, A. T., y Turner Ii, B. L. (2017). Optimizing green space locations to reduce daytime and nighttime urban heat island effects in Phoenix, Arizona. Landscape and Urban Planning, 165, 162-171.