

Ehp: Environmental Health Perspectives

**Influencia en las capacidades Cognitivas, de trabajadores en oficinas, de la exposición a dióxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles y de la ventilación. Estudio de exposición controlada en ambientes de oficinas convencionales y Green.**

Autores: Joseph G.Allen, Piers MacNaughton, Usha Satish, Suresh Santanam, Jose Vallarino y John D. Spengler.

Publicado el 26 de octubre de 2.015

## **INDICE**

<b>1.- INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>2</b>
<b>2.-MÉTODOS .....</b>	<b>4</b>
<i>Diseño del estudio .....</i>	<i>4</i>
<i>Población del estudio .....</i>	<i>4</i>
<i>Simulación de las condiciones ambientales en el interior .....</i>	<i>6</i>
<i>La monitorización ambiental.....</i>	<i>9</i>
<i>Evaluación de las capacidades cognitivas .....</i>	<i>11</i>
<i>Análisis estadístico .....</i>	<i>13</i>
<b>3.-RESULTADOS.....</b>	<b>14</b>
<i>Edificios Green y capacidades cognitivas.....</i>	<i>14</i>
<i>El Dióxido de Carbono (CO2) y las Capacidades Cognitivas.....</i>	<i>16</i>
<i>Consideraciones varias .....</i>	<i>18</i>
<b>4.-DISCUSIÓN.....</b>	<b>19</b>
<i>Edificios Green y Salud .....</i>	<i>19</i>
<i>Dióxido de Carbono y Ventilación .....</i>	<i>20</i>
<i>Fortalezas y Limitaciones.....</i>	<i>21</i>
<b>5.-CONCLUSIONES.....</b>	<b>23</b>
<b>6.-REFERENCIAS .....</b>	<b>24</b>

## 1.- INTRODUCCIÓN

El incremento del coste energético en la década de los 70s llevó a un cambio en la construcción de los edificios a lo largo de Estados Unidos, fueron incrementando su hermeticidad y su eficiencia energética. Esta circunstancia derivó en una disminución de las renovaciones de aire en las viviendas y en los edificios. En esa época las renovaciones de aire comenzaron a disminuir de aproximadamente 1 ren/h a la mitad, 0,5 ren/h (Chan et al. 2003; Hodgson et al. 2000; ASHRAE 2013), incluso se encuentran casos con solamente 0,1/0,2 ren/h.

La historia de la ventilación en Edificios, en los últimos 100 años, ha sido resumida recientemente por Persily (2015). Persily describe el original estándar ASHRAE 62, publicado en el año 1973, demostrando la evolución natural de nuestro conocimiento en la relación entre la tasa de ventilación y una aceptable calidad del aire interior. Los requerimientos de ventilación en viviendas y en edificios comerciales, en los años 80s, también fueron decreciendo proporcionalmente al crecimiento del ahorro de energía.

Con estos cambios comienzan las potenciales consecuencias negativas para la calidad ambiental en el interior, la merma de ventilación puede llevar asociado el aumento de la concentración de contaminantes en el Edificio. Las enfermedades relacionadas con el Edificio y el Síndrome del Edificio Enfermo fueron denunciados por primera vez, en los años 80s, asociados a una clara falta de ventilación (Riesenberg y Arehart-Treichel 1986). Estos problemas de salud asociados al ambiente interior produjeron importantes pérdidas de productividad (Fisk 1997). Algunos factores del ambiente interior en el trabajo se asociaron con la salud de los ocupantes, tales como la humedad, la tasa de ventilación, la presencia en el lugar de trabajo de materiales que emitan sustancias químicas al aire, el stress laboral, las alergias (Mendell 1993, Wargocki 2000, Bornehag 2005, Hedge 2009, Hedge y Gaygen 2010 y Nishihara 2014).

Los problemas relacionados con una mala CAI, surgieron en los Edificios convencionales con la hermeticidad de sus cerramientos, lo cual contribuyó a la llegada de los diseños sostenibles o “green buildings” con sistemas de clasificación (U.S. Green Building Council’s Leadership in Energy and Environmental Design; LEED). Estos sistemas de clasificación de Edificios, apuestan por reducir la huella de carbono y mejorar la salud de los ocupantes, asignando créditos para nuevos y existentes edificios que adopten diseños, operatividad y mantenimientos más sostenibles. Existen diferentes niveles que son premiados según los créditos obtenidos (plata, oro o platino; USGBC 2014). Algunos créditos se consiguen mediante la adopción de medidas

ambientales y de eficiencia energética, pero también se incluyen guías para mejorar la ventilación y la filtración, el uso de materiales de baja emisión, el control de las fuentes de emisión de contaminantes químicos en interiores, la mejora de las condiciones térmicas, la mejora en la iluminación e incluso se tiene en cuenta la correcta orientación del edificio.

Comparando con construcciones convencionales, las medidas ambientales en los “green buildings” muestran bajas concentraciones de contaminantes clave como partículas, dióxido de nitrógeno, COVs y alérgenos (Colton 2014, Jacobs 2014, Noris 2013). Sin embargo estas reducciones, generalmente, no se hicieron extensibles al CO<sub>2</sub> o a las renovaciones de aire, demostrando la influencia de la eficiencia energética sobre la manera de operar y diseñar los “green buildings”. Este tipo de edificios se asocian con mejoras en la CAI y con importantes reducciones en la sintomatología de los usuarios que los ocupan, incluso con aumentos en la productividad en viviendas, escuelas y en ambientes de oficina (Colton 2014, NRC 2007, Singh 2010). Sin embargo, una importante limitación de estos estudios es la dependencia a la subjetividad sobre los resultados de las mediciones, como en las encuestas, que los participantes tienen preferencias porque son premiados en su estatus (green o control). No tenemos conocimiento, que se hayan realizado en “green buildings” estudios donde los participantes no supiesen, a priori, las condiciones ambientales de sus edificios.

Concebimos el presente estudio para cuantificar objetivamente el impacto del ambiente interior sobre las capacidades cognitivas, como eje impulsor, en el día a día, de la productividad de los trabajadores de oficina. Simulamos condiciones en el edificio con bajas concentraciones de COVs (“green”) y con altas (“convencional”), ambas con los estándares de ventilación recomendados en ASHRAE. Reconociendo que los avances tecnológicos en los sistemas mecánicos abren la posibilidad de aumentar las tasas de ventilación sin sacrificar la eficiencia energética. También se realizaron pruebas en otros edificios, los cuales disponían de tasas de ventilación mayores, estos se catalogaron como condiciones “Green +”. Por último indicar que también nos motivó el reciente hallazgo de Satish, que señala que el CO<sub>2</sub> puede ser un contaminante por sí mismo, y no solo un indicador del grado de ventilación (2012) y, por tanto también se experimentó la influencia del CO<sub>2</sub>, en una jornada completa de trabajo, sobre las capacidades cognitivas, manteniendo el resto de variables constantes.

## 2.-MÉTODOS

### Diseño del estudio

Este es un estudio que comenzó controlando el ambiente de una oficina para estimar los efectos de algunos parámetros de la CAI en la capacidad cognitiva. Se utilizó un diseño de estudio de “doble ceguera” que incluye:

- Repetición de mediciones de capacidades cognitivas a los mismos individuos.
- Caracterización de las potenciales variables CAI.
- Controles en la zona central de la semana, evitando los efectos del lunes y el viernes.
- Todos los participantes recibieron la misma exposición cada día, las cuales variaban de una jornada a la siguiente.

### Población del estudio

24 trabajadores (arquitectos, diseñadores, programadores, ingenieros, profesionales de marketing, gerentes) del área de Syracuse participaron en el estudio que tuvo una duración de 6 días sobre el rendimiento cognitivo y las condiciones del edificio (Tabla

**Table 1.** Participant demographics

	n	%
<i>Gender</i>		
Male	10	42
Female	14	58
<i>Age</i>		
20-30	8	33
31-40	3	12
41-50	6	25
51-60	4	17
61-70	3	12
<i>Ethnicity</i>		
White/Caucasian	22	92
Black or African American	1	4
Latino	1	4
<i>Highest level of Schooling</i>		
High School Graduate	1	4
Some College	2	8
College Degree	13	54
Graduate Degree	8	33
<i>Job Category</i>		
Managerial	5	21
Professional	15	63
Technical	1	4
Secretarial or Clerical	1	4
Other	2	8

1). Seis personas más fueron contratadas como respaldo pero finalmente no fueron incluidas en el estudio. Los participantes fueron captados a través de e-mails en negocios locales y debían cumplir con algunas restricciones como:

- No ser personas fumadoras ni tener asma.
- No tener claustrofobia, ni esquizofrenia (debido a que estas personas debían permanecer unos días en el laboratorio de experimentación)

Los participantes se trasladaron al Willis H. carrier Total Indoor Environmental Quality (TIEQ) Laboratory at the Syracuse Center of Excellence (CoE) durante 6 días repartidos

en 2 semanas en el mes de Noviembre del año 2014. El protocolo del estudio fue revisado y aprobado por el Harvard T.H. Chan School of Public Health Institutional Review Board. SUNY Upstate Medical at Syracuse University cedió su revisión al Harvard's IRB. Todos los participantes firmaron un consentimiento informado y fueron compensados con \$800.

Los participantes acudieron al CoE los martes, miércoles y jueves, a las 9:00 hrs durante 2 semanas consecutivas. El CoE dispone de 2 oficinas casi idénticas ubicadas contiguas una de la otra que forman parte del TIEQ Laboratorio y cada una de ellas tiene 12 cubículos. Las habitaciones tienen una construcción muy similar y en su interior contienen idénticos materiales (carpetas, pintura, ordenadores, etc).

Las condiciones ambientales, que se describen en los siguientes apartados, se diseñaron para ser constantes en ambas habitaciones. El primer día se asignó, aleatoriamente, un cubículo a cada participante que fue el mismo durante todo el estudio. Se les solicitó que dedicaran por entero su jornada diaria, en las condiciones ambientales simuladas, a realizar sus actividades laborales habituales. Tuvieron a su disposición ordenadores, impresoras, acceso a internet y una zona privada para llamadas telefónicas privadas. Dispusieron de una parada de 45 minutos para comer, una limitada selección de alimentos, entre las 12:00 -12:45 hrs la oficina 1 y entre las 12:15-13:00n hrs la oficina 2. La comida se sirvió en un recinto adyacente a las oficinas. Tras esta parada, los participantes volvían a sus cubículos para continuar con su trabajo.

Los test para evaluar las capacidades cognitivas se iniciaban a las 15:00 hrs de cada día, y duraban hasta abandonar el TIEQ Laboratorio a las 17:00 hrs. Tanto los participantes en el estudio, como los analistas que interpretaron los resultados de los test no conocían las condiciones ambientales que se habían simulado cada uno de los días. Los participantes no recibieron instrucciones de cómo emplear su tiempo, ni por las tardes, ni los lunes antes de comenzar con el estudio.

### *Simulación de las condiciones ambientales en el interior*

Las simulaciones de las condiciones ambientales, de cada día, se diseñaron para evaluar condiciones que se encuentran habitualmente en oficinas (Tabla 2)

**Table 2.** Average indoor environmental conditions simulated in each room of the TIEQ lab.

Variable	Day 1 Green+		Day 2 Moderate CO <sub>2</sub>		Day 3 High CO <sub>2</sub>		Day 4 Green		Day 5 Conventional		Day 6 Green+	
Date	11/4		11/5		11/6		11/11		11/12		11/13	
Day of the Week	Tue		Wed		Thu		Tue		Wed		Thu	
Room	502	503	502	503	502	503	502	503	502	503	502	503
Experimental Parameters												
CO <sub>2</sub> (ppm)	563	609	906	962	1400	1420	761 <sup>b</sup>	726 <sup>b</sup>	969	921	486	488
Outdoor Air Ventilation (cfm/person) <sup>a</sup>	40	40	40	40	40	40	20	20	20	20	40	40
TVOCs (µg/m <sup>3</sup> )	43.4	38.5	38.2	28.6	32.2	29.8	48.5	43.5	506	666	55.8	14.9
Other Environmental Parameters												
Temp (°C)	23.9	24.5	22.4	23.9	21.3	22.0	22.9	23.7	21.8	22.5	20.7	21.3
RH (%)	31.0	30.4	34.2	31.6	38.7	38.3	34.3	33.3	39.6	38.3	27.8	26.8
NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	57.9	58.9	53.2	54.1	60.8	58.4	51.3	45.6	54.6	50.8	56.5	55.5
O <sub>3</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	3.42	21.2	14.4	13.0	1.37	0.00	6.85	238	1.71	1.37	4.11	6.85
PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	2.38	3.49	3.35	2.58	2.97	2.42	1.26	1.83	1.68	1.34	1.26	1.38
Noise (dB)	51.3	49.9	49.7	48.8	52.5	48.8	49.6	48.7	51.1	48.8	50.5	49.2
Illuminance (mV)	2.95	2.70	2.89	2.83	2.31	2.04	3.11	2.93	2.74	2.51	2.39	2.28
Irradiance (mV)	9.07	8.76	9.45	9.37	6.00	6.05	9.90	9.60	8.30	8.14	6.70	6.82

<sup>a</sup> A constant air flow rate of 40 cfm/person was maintained on all study days, with 100% outdoor air used on days 1, 2, 3, and 6, and 50% outdoor air and 50% recirculated air used to achieve an outdoor air ventilation rate of 20 cfm/person on days 4 and 5.

<sup>b</sup> Average concentration from 2-5 p.m. was 926 ppm, but lower CO<sub>2</sub> concentrations in the morning hours during the approach to steady-state led to a lower average CO<sub>2</sub> concentration.

**Tabla 2**

Los 3 parámetros que se controlaron experimentalmente fueron:

- **La ventilación con aire exterior.** Se usaron 2 caudales de ventilación: 20 cfm (cubic feet per minute)/persona y de 40 cfm/persona, que corresponden respectivamente a 9,2 l/s.persona y 18,4 l/s.persona.
- **La concentración de CO<sub>2</sub>.**
- **La concentración de Compuestos Orgánicos Volátiles Totales (TVOCs).**

#### La ventilación con aire exterior

Muchos locales, se han construido utilizando como referencia de ventilación el antiguo estándar de ASHRAE (Standard 62-89), que recomendaba 20 cfm/persona, lo que correspondería a una concentración interior de CO<sub>2</sub> de 945 ppm. Por lo tanto 20 cfm/persona es la ventilación que se usó para los días de simulación "Green" y "Convencional" porque refleja los mínimos requerimientos de ventilación para ambos, edificaciones "green" (LEED) y edificaciones convencionales (ASHRAE estándar 62-89).

También se buscó evaluar el impacto de una muy buena ventilación, con 40 cfm por persona (días clasificados como Green +), lo que correspondería a unos niveles constantes de 550 ppm de CO<sub>2</sub>. Para garantizar el desconocimiento de las condiciones ambientales, se mantuvieron los 6 días del estudio, unos movimientos de aire correspondientes a 40 cfm por persona. Con la diferencia, de que en los días Green + (y también en los días de concentración moderada y alta de CO<sub>2</sub>) el 100 % del aire era exterior y en los días “Green” y Convencional el 50% de aire era exterior y el otro 50% era recirculado, para lograr una ventilación de 20 cfm por persona, sin que se viera afectado el caudal total movido en la sala (los movimientos por hora de aire).

### Concentración de CO<sub>2</sub>

Para la valoración independiente de la relación del CO<sub>2</sub> con las capacidades cognitivas, se mantuvo constante una ventilación de 40 cfm por persona, mientras se iba añadiendo CO<sub>2</sub> a las dependencias hasta alcanzar las 3 diferentes concentraciones constantes consigna de este gas para cada día. El primer objetivo fue 550 ppm (Green +, los días 1 y 6). La segunda concentración objetivo de CO<sub>2</sub>, 945 ppm, reflejaría las condiciones de un ambiente con ventilación de 20 cfm por persona. El tercer objetivo de CO<sub>2</sub>, 1400 ppm, se seleccionó para representar la más alta, pero no poco habitual, concentración de ésta gas en ambientes interiores (USEPA BASE dataset 1998). En los días 2 y 3, donde se experimentó sobre los efectos independientes del CO<sub>2</sub>, se inyectó desde una botella de CO<sub>2</sub> ultrapuro (al menos 99,9999% de pureza) al conducto de impulsión del sistema de A/A, la cantidad necesaria para alcanzar, un estado estacionario, en el interior de 945 y 1400 ppm. En todo momento, durante la dosificación de CO<sub>2</sub>, un técnico monitorizó y ajustó, en tiempo real, las inyecciones para mantener los niveles constantes (estuvo sentado junto a la válvula de corte de la botella durante todo el ensayo). Para los días de prueba 4 y 5 (Green y Convencional), no fue necesaria la adicción de CO<sub>2</sub> para alcanzar los objetivos de CO<sub>2</sub>, debido a las reducciones en las cantidades que se aportaban de aire exterior. Se monitorizó el CO<sub>2</sub>, con sistemas de alta resolución, en las habitaciones donde se hicieron las pruebas, mediante el uso de 3 monitores independientes calibrados. Se estableció un protocolo para garantizar la seguridad de los participantes en el evento, para evitar desviaciones incontroladas. En caso de superación de 2500 ppm (50% del Valor límite umbral utilizado por la American Conference of Governmental Industrial Hygienist; ACGIH 2015), se debía cancelar inmediatamente el ensayo. No hubo desviaciones durante las pruebas del protocolo propuesto.

La concentración de Compuestos Orgánicos Volátiles Totales (TVOCs)

El TIEQ laboratorio se construyó con materiales de baja emisión de VOCs y, de hecho se confirmaron concentraciones muy bajas de VOCS antes del experimento (Tabla 3).

**Table 3.** Speciated VOC concentrations ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) on each study day, averaged across rooms.

Analyte	Condition						
	Background	Green+	Med. CO <sub>2</sub>	High CO <sub>2</sub>	Green	Conventional	Green+
<b>VOCs</b>							
1,2,4-Trimethylbenzene	0.3	0.2	ND <sup>a</sup>	0.1	ND	0.5	0.1
2-Butanone	2.5	0.7	0.7	0.8	1.1	1.1	0.6
2-Propanol	1.0	1.2	1.1	3.1	1.2	312.5	8.2
Acetone	12.0	14.7	9.6	8.7	20.0	20.0	8.6
Benzene	0.5	0.8	0.5	0.9	0.7	0.5	0.5
Carbon disulfide	0.6	0.2	ND	ND	ND	ND	0.1
Carbon tetrachloride	ND	0.2	0.4	ND	0.2	ND	ND
Chloroform	ND	0.1	ND	ND	ND	0.1	ND
Chloromethane	1.3	1.7	1.5	1.4	1.9	1.5	1.4
Cyclohexane	0.2	0.3	0.4	0.5	0.1	0.4	0.3
Dichlorodifluoromethane	2.5	2.6	2.9	2.7	2.9	2.4	2.5
Ethyl acetate	ND	ND	ND	ND	1.0	2.0	ND
Ethylbenzene	0.3	0.4	ND	0.3	0.2	0.1	0.1
Freon 113	0.3	0.7	0.8	0.8	0.8	0.2	0.4
Heptane	ND	0.3	ND	0.3	ND	257.5	6.9
Hexane	0.4	0.7	0.5	0.7	0.4	0.8	1.3
m,p-Xylene	0.8	1.5	0.4	1.0	1.0	0.7	0.7
Methylene chloride	0.5	0.3	0.6	0.5	0.3	0.4	0.4
o-Xylene	0.3	0.4	ND	0.4	0.1	0.3	0.1
Styrene	0.1	ND	ND	ND	ND	ND	0.1
Tetrachloroethene	3.7	0.9	ND	ND	0.9	0.6	0.2
Tetrahydrofuran	ND	ND	ND	ND	0.2	0.1	0.2
Toluene	2.4	2.1	1.4	1.9	2.2	1.9	2.9
trans-1,2-Dichloroethene	19.0	8.8	12.6	6.2	10.3	21.8	8.7
Trichloroethene	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.2
Trichlorofluoromethane	1.3	1.2	1.6	1.4	1.5	1.1	1.2
<b>Grand Total</b>	<b>50.0</b>	<b>40.1</b>	<b>35.0</b>	<b>31.4</b>	<b>46.9</b>	<b>626.4</b>	<b>45.6</b>
<b>Aldehydes</b>							
2,5-Dimethylbenzaldehyde	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Acetaldehyde	1.0	3.7	3.2	3.1	5.4	7.3	2.1
Benzaldehyde	ND	ND	ND	ND	ND	1.5	ND
Crotonaldehyde	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Formaldehyde	2.4	5.9	5.5	5.4	8.9	11.7	4.4
Hexanaldehyde	ND	0.8	0.8	ND	1.9	2.4	ND
Isovaleraldehyde	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
m,p-Tolualdehyde	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
n-Butyraldehyde	1.1	2.7	1.4	2.3	2.8	2.4	2.0
o-Tolualdehyde	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Propionaldehyde	ND	0.7	1.2	ND	1.4	1.6	0.6
Valeraldehyde	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Glutaraldehyde	ND	0.5	ND	ND	0.4	ND	ND
o-Pthalaldehyde	ND	65.1	57.7	70.0	41.6	38.4	76.8
<b>Grand Total</b>	<b>4.6</b>	<b>79.4</b>	<b>69.8</b>	<b>80.9</b>	<b>62.4</b>	<b>65.3</b>	<b>85.8</b>

<sup>a</sup> Non-detect

**Tabla 3**

Para simular un espacio de una oficina Convencional, con alto contenido en VOCs, se colocaron fuentes generadoras de VOCs, en los difusores de impulsión de aire ubicados en el techo (no se observaba nada desde los lugares de trabajo), en cada cubículo antes de que los participantes llegaran el quinto día. Se eligió como objetivo total de VOCs (TVOCs) la concentración de 500  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , basándonos en los límites fijados en las Valoraciones LEED IAQ. Como método de medición se utilizó el TO-15 de la EPA (USGBC 2014).

Se seleccionó como fuente generadora de VOCs una mezcla inolora con compuestos que se encuentran habitualmente en oficinas y que comprendía 4 categorías de VOCs:

- 1.- Materiales de construcción. 56 in<sup>2</sup> de melanina y 64 in<sup>2</sup> de vinilo).
- 2.- Adhesivos. 80 in<sup>2</sup> de cinta adhesiva para conductos, 80 in<sup>2</sup> de cinta de embalar y productos de limpieza (1 oz. Limpiador multi-superficie, 4 toallitas limpiadoras multi-superficie y un limpiador en seco para ropa.
- 3.- Suministros de oficina. 4 rotuladores borradores en seco y una botella de corrector líquido.

### ***La monitorización ambiental***

El equipo que formaba parte del estudio caracterizó el Laboratorio TIEQ diariamente a través de un amplio espectro de indicadores IEQ: CO<sub>2</sub>, temperatura, humedad relativa, presión barométrica, nivel de ruido, VOCs, Aldehidos, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>2,5</sub> y luz ambiental.

#### **Temperatura, humedad relativa y concentración de CO<sub>2</sub>**

Se instalaron estaciones meteorológicas Netatmo en cada cubículo para medir temperatura, humedad y dióxido de carbono (en ppm) y nivel sonoro cada 5 minutos para cada participante. Se calibraron de 0 a 3.000 ppm de CO<sub>2</sub> usando gases patrones y se validaron con un equipo TSI Q-Track modelo 7575. También las estaciones Netatmo se comprobaron con patrones de calibración de 400 y de 1.000 ppm al final del estudio determinar la desviación de los sensores durante el periodo de 2 semanas. Se tomaron por duplicado mediciones de CO<sub>2</sub> en cada habitación usando un equipo TSI Q-Track modelo 7575 y 2 registradores (data loggers) K-33.

#### **La concentración de Compuestos Orgánicos Volátiles Totales (TVOCs)**

Se utilizaron canisters Summa para detectar un total de 62 VOCs comunes. Para cada día de estudio, se seleccionó aleatoriamente un cubículo de trabajo de cada Oficina (Tabla 3). También se tomó cada día una tercera muestra adicional en uno de los cubículos. Las muestras las analizaron en ALS Laboratories, de acuerdo al método TO-

15 de la EPA. De los 62 que se buscaron, 36 VOCs no se detectaron en ninguna de las muestras.

*Resto de parámetros ambientales controlados*

Cada habitación disponía en el extremo opuesto de la entrada una estación de medición de los siguientes parámetros:

- 1.- Partículas de tamaño 2,5 micras de diámetro e inferiores ( $PM_{2,5}$ ). Se midieron con el monitor de aerosoles TSI SidePak AM510. También se utilizaron muestreos con cassettes para realizar el análisis mediante gravimetría.
- 2.- 14 moléculas de la familia de los Aldehídos. Se utilizó una bomba de muestreo a un caudal de 0,4 l/minuto, captación sobre soporte y envío a ALS Analytical Laboratories usando el método TO-11 de la EPA.
- 3.- Dióxido de Nitrógeno ( $NO_2$ ). Se usaron captadores pasivos para  $NO_2$  (peso promedio durante 8 horas) modelo X-595 de Assay Technology según método 182 de OSHA.
- 4.- Ozono ( $O_3$ ). Se usaron captadores pasivos para  $O_3$  (peso promedio durante 8 horas) modelo X-586 de Assay Technology según método 214 de OSHA.
- 5.- Iluminación e irradiancia. Mediciones realizadas con equipo IL 400 con detectores SEL-033/Y/W y SEL-033/F/W.

De los 5 parámetros anteriores, se realizó, al menos, un blanco y un duplicado por cada 10 muestras. Todos los blancos fueron correctos en los análisis. Todas las mediciones duplicadas se desviaron menos de un 15% respecto a las principales, y la media entre ambas fue lo que se utilizó para los posteriores análisis.

Se instaló un sistema de monitorización en la cubierta del CoE para medir  $PM_{2,5}$ ,  $O_3$  y  $NO_2$ , utilizando los mismos procedimientos y equipamiento que tenían las estaciones de medición interiores, con la finalidad de establecer la potencial influencia de los contaminantes exteriores en el ambiente interior. Los datos de la temperatura exterior, la humedad, la radiación solar y la velocidad/dirección del viento se obtuvieron de la estación meteorológica del CoE instalada en la cubierta del edificio. Como referencia se tomaron medidas de todos los parámetros ambientales en el TIEQ Laboratorio un mes antes del actual estudio.

### *Evaluación de las capacidades cognitivas*

La evaluación de las capacidades cognitivas se llevó a cabo con la herramienta informática “Strategic Management Simulation (SMS), la cual es un test informático validado, diseñado para valorar lo efectivo del nivel de gestión de trabajadores, a través de un proceso de toma de decisiones (Streufert et al. 1988; Breuer et al. 2003; Satish et al. 2004). Antes del test diario de 1,5 horas, los participantes recibieron una sesión informativa, describiendo en 1 página el escenario al que se enfrentarían en el test. Cada participante utilizó un ordenador del TIEQ Laboratorio, al cual accedía con una única identificación personal. Estaba prohibido el uso de ordenadores propios y el de otro tipo de dispositivos antes del inicio de la simulación.

Los participantes se sometieron a diferentes simulaciones basadas en retos del mundo real (ejemplo: coordinar una situación de emergencia en un municipio siendo el alcalde). Estos escenarios se diseñaron para conocer los patrones de respuestas estándar. EL software permite gran flexibilidad en la estrategia a seguir; los participantes pueden escoger tomar una decisión o trazar un plan en cualquier momento, respondiendo a cualquier estímulo desde el programa. La ausencia de rígidos requerimientos permite al participante la libertad de emprender iniciativas, de acuerdo a su estilo cognitivo personal. Basándose en estos planes de acción decididos, respuesta a la información recibida, usando las actuaciones previas y los resultados, el SMS Software calcula puntuaciones para 9 diferentes capacidades cognitivas (Tabla 4)

<b>Capacidad Cognitiva<sup>(*)</sup></b>	<b>Descripción</b>
Nivel de actividad básica	Habilidad general para tomar decisiones en cualquier momento.
Nivel de actividad práctico	Capacidad para tomar decisiones que están dirigidas a alcanzar un objetivo.
Orientación de tareas	Capacidad para tomar decisiones específicas que están orientadas hacia la finalización de tareas en mano.
Respuesta de Crisis	Habilidad para planificar, estar preparado y organizarse bajo condiciones de emergencia.
Búsqueda de información	Capacidad para recopilar información solicitada desde diferentes fuentes disponibles.
Uso de Información	Capacidad para usar información recibida, con el objetivo de lograr una meta general.
Amplitud de Enfoque	Capacidad para tomar decisiones a lo largo de múltiples dimensiones y usar varias opciones y oportunidades para lograr un objetivo.
Estrategia	Parámetros de pensamiento complejo, los cuales reflejan la habilidad para lograr buenas soluciones a partir del óptimo uso de la información y la planificación.

(\*) Ver Streufert et al. 1986 para una descripción más detallada.

**Tabla 4**

Un técnico especialista en gestionar este tipo de test, estuvo presente para proporcionar instrucciones y responder cualquier cuestión planteada por los participantes. Se utilizaron escenarios equivalentes cada uno de los días, lo cual permitía repetir los test individuales, sin potenciales inclinaciones o preferencias debido a los efectos de la experiencia y el aprendizaje (Swezey et al. 1998). Los escenarios equivalentes tienen coeficientes de correlación entre 0,68 y 0,94 para las puntuaciones de las capacidades cognitivas evaluadas (Streufert et a. 1998).

### *Análisis estadístico*

Modelos de efecto combinado y acumulativo, se usaron para relacionar los test con las exposiciones ambientales y las capacidades cognitivas, mientras se controlaba la correlación natural de la reiteración de las medidas. La exposición específica mayoritaria, se asignó a cada participante, sin importar que fuera el nivel en el cubículo (CO<sub>2</sub>), el nivel en la habitación (VOCs) o el nivel en el laboratorio (Ventilación). Participant ID was treated as a random intercept to control for confounding by individual characteristics. El residual fue distribuido normalmente y, con varianza de errores constante (homocedástico) para todos los modelos (datos no mostrados). Usamos penalized splines para la valoración gráfica lineal de la relación entre las exposiciones ambientales y las puntuaciones cognitivas. Las puntuaciones del programa SMS se compararon, a menudo, con datos normativos de otros usos de SMS (e.g. Satish et al. 2012). Si no había acceso a datos normativos, en su lugar se usaba nuestro estudio de población como grupo de referencia.

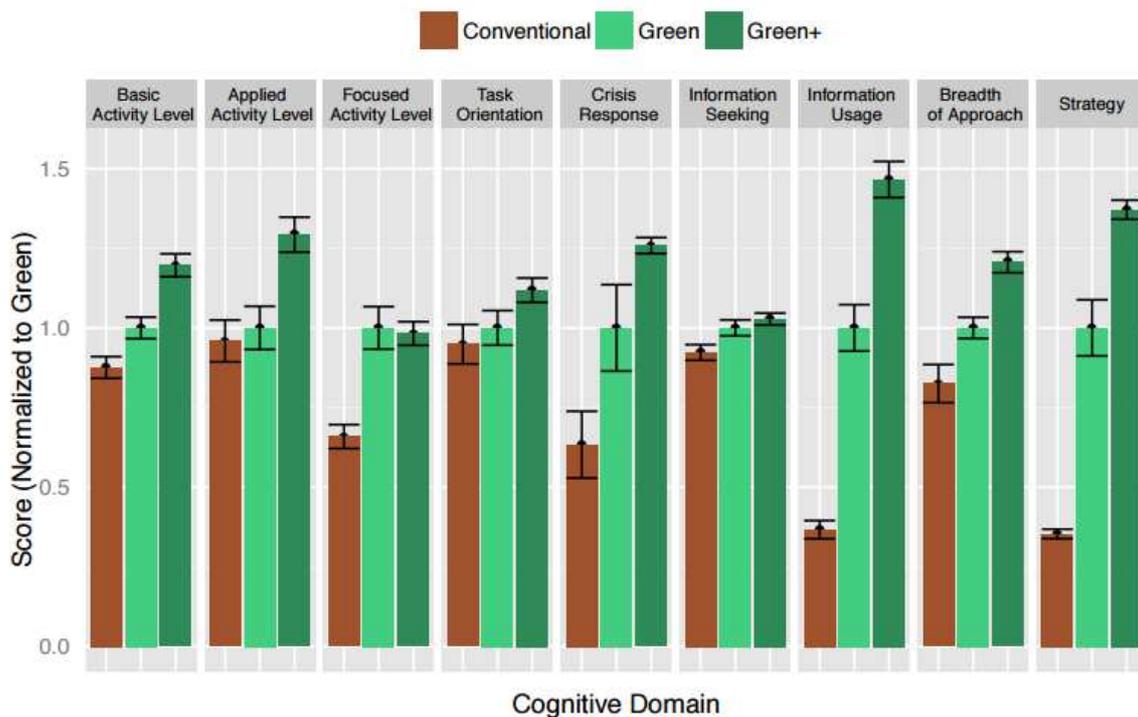
Basándose en el análisis, las puntuaciones cognitivas se normalizaron con las puntuaciones de los escenarios Convencional (Tabla 5), Green (Figura 1) o Green+ (Figura 2) para obtener comparaciones en las diferentes habilidades cognitivas, cada una de las cuales tiene una única escala en los formularios en bruto. Las notas se normalizaron para cada habilidad o campo cognitivo dividiendo todos los resultados entre la nota media del escenario con el que se normalizaba (convencional, green o green +). La relevancia estadística de los resultados no se ve afectada por la normalización. En este análisis se ha comprobado que se dan comparaciones múltiples, p-valores por debajo de 0,001 se han considerado estadísticamente significativos, de acuerdo a la corrección de Bonferri. Los análisis se han interpretado usando como fuente el paquete estadístico R versión 3.0.0 (R Project for Statistical Computing, Vienna, Austria).

### 3.-RESULTADOS

#### *Edificios Green y capacidades cognitivas*

La concentración de VOCs fue constante, por debajo de 50  $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ , todos los días del estudio, excepto para el día del escenario “Edificio Convencional”, cuando los niveles aumentaron a 506-666  $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ , en función de la habitación. Los compuestos que incrementaron su concentración fueron, aunque no solo, formaldehído, benzalaldehído, acetaldehído, heptano y 2-propanol. El heptano y el 2-propanol tuvieron el mayor de los incrementos de los compuestos muestreados (tabla 3). La concentración total de aldehídos fue fundamentalmente de o-Pthalaldehyde y permanecieron relativamente constante durante todos los días del estudio.

Las puntuaciones de las capacidades cognitivas fueron más elevadas en las condiciones de “Edificio Green” comparadas con las de “Edificio Convencional” para los 9 campos funcionales (Figura 1).



**Figura 1**

De media, las notas fueron un 61% y un 101% más altas en los días con condiciones “Green” y “Green+” respectivamente, respecto al día con escenario “Convencional”. Los efectos más significativos se apreciaron en las habilidades siguientes:

- Respuesta frente a Crisis. Puntuaciones del 97% y 131% más elevadas en los días “Green” y “Green+” respectivamente, respecto al día con escenario “Convencional”
- Uso de la Información. Puntuaciones del 172% y 299% más elevadas en los días “Green” y “Green+” respectivamente, respecto al día con escenario “Convencional”
- Estrategia. Puntuaciones del 183% y 288% más elevadas en los días “Green” y “Green+” respectivamente, respecto al día con escenario “Convencional”

Todas ellas se tratan de indicadores del nivel más alto de las capacidades o habilidades cognitivas y toma de decisiones (Streufert 1986).

La repetición del escenario “Green+” el sexto día, se añadió al estudio como medición de control de calidad y mostró puntuaciones similares al primer día. El p-values para la hipótesis nula de que no había diferencias entre los 2 días fue de 0,27 para “Estrategia” (puntuaciones normalizadas de 3,77 y 3,98), 073 para “Respuesta en Crisis” (puntuaciones normalizadas de 2,35 y 2,27).

*El escenario “Green +” obtuvo puntuaciones mayores para todos los campos de capacidades cognitivas respecto al escenario “Convencional” (estadísticamente relevante para todos ellos con  $p < 0,0001$ ).*

El escenario “Green” obtuvo puntuaciones mayores para todos los campos de capacidades cognitivas respecto al escenario “Convencional” (estadísticamente relevante para en cinco de los nueve con  $p < 0,0001$ ).

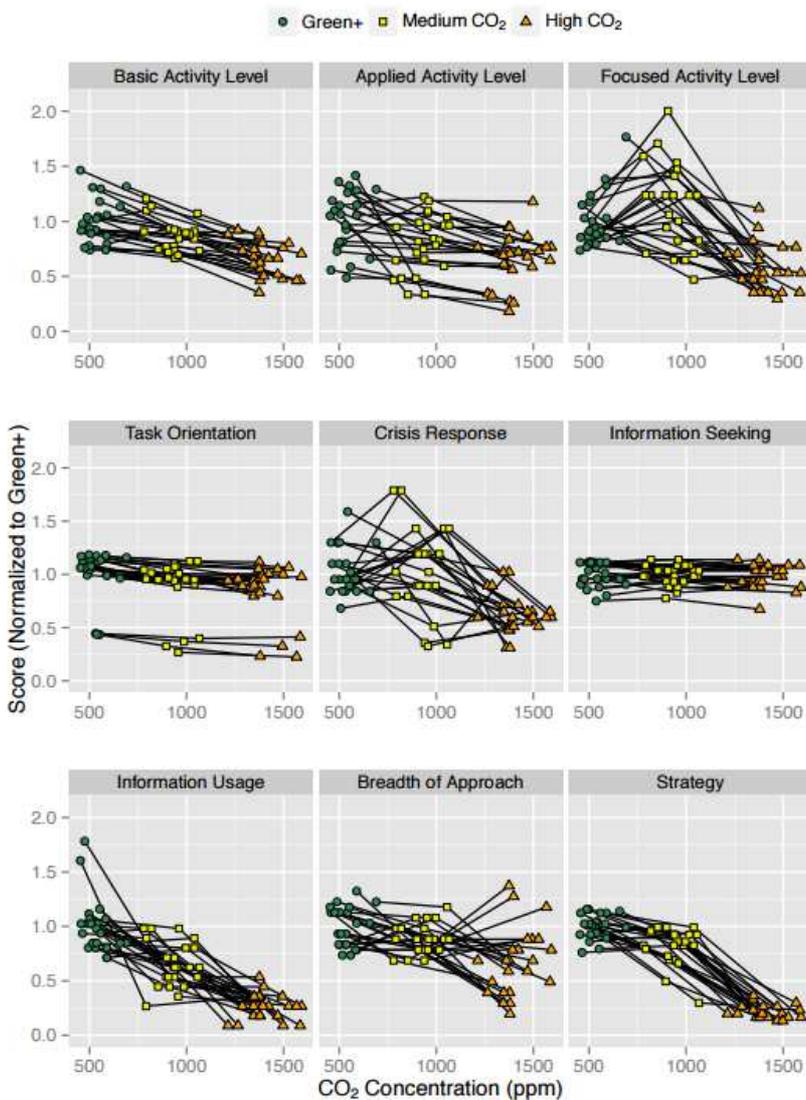
Los participantes tuvieron mejores notas en los días “Green +” respecto a los “Green” en 8 de los 9 dominios o campos, resultando aumentos del 25% en las puntuaciones cuando las tasas de ventilación con aire exterior aumentaron.

La puntuación promedio en el escenario “Green+” fue del doble respecto al escenario Convencional y al día de CO<sub>2</sub> elevado.

El modelo de puntuaciones promedio de la Tabla 5, presenta un elevado valor de R<sup>2</sup>, 0,81, lo cual significa que una importante cantidad en las puntuaciones de las capacidades cognitivas se relacionan directamente con las condiciones ambientales interiores, dejando solamente un 19% de la variabilidad justificándose por otros factores personales, tales como la dieta, la calidad del sueño la noche anterior o el humor de ese día.

### *El Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) y las Capacidades Cognitivas*

El efecto del CO<sub>2</sub> en las puntuaciones de las funciones cognitivas, mientras permanecen el resto de parámetros constantes, se representa en la Figura 2.



**Figura 2**

La puntuación de las capacidades cognitivas fueron un 15% más bajas en el día con condiciones de CO<sub>2</sub> moderadas (900/945 ppm) y un 50% inferiores en el día con condiciones de CO<sub>2</sub> cercanas a los 1.400 ppm que en las condiciones de los 2 días "Green+".

La respuesta a la exposición entre el CO<sub>2</sub> y las funciones cognitivas resulta aproximadamente lineal con las concentraciones usadas en este estudio. Sin embargo,

Debido a que el aire de cada habitación, no estaba completamente mezclado, había algunas diferencias, en las concentraciones de CO<sub>2</sub>, entre cubículos.

Cada línea representa la evolución en cuanto a las puntuaciones, en las 9 habilidades o capacidades cognitivas, de cada participante, en 3 diferentes escenarios: Green+, nivel moderado de CO<sub>2</sub> (900/950 ppm) y nivel elevado de CO<sub>2</sub> (1400 ppm). Los datos se han normalizado respecto a la nota media de todos los voluntarios, durante las condiciones Green+. Para 7 de las 9 funciones cognitivas, la puntuación promedio disminuye cuanto mayor es la concentración de dióxido de carbono (Tabla 5).

las mayores diferencias entre las notas de las condiciones “Green+” o niveles moderados de CO<sub>2</sub> respecto a nivel elevado de CO<sub>2</sub>, depende de cada campo cognitivo en concreto.

La tasa de ventilación, la concentración de CO<sub>2</sub> y los TVOCs fueron modelizados de forma independiente en cada día del estudio, con la finalidad de entender los efectos particulares de cada uno de los factores, sobre las puntuaciones de las habilidades cognitivas.

La significación estadística aumenta en las puntuaciones que estaban asociadas con la tasa de ventilación, CO<sub>2</sub> y TVOCs ( $p < 0,0001$  para los 3 parámetros).

**Table 5.** Generalized additive mixed effect models testing the effect of IEQ condition and on cognitive scores, normalized to the “Conventional” condition, treating participant as a random intercept.

Condition	Cognitive Domain: Estimate, [95% Confidence Interval], (p-value)									
	Basic Activity Level	Applied Activity Level	Focused Activity Level	Task Orientation	Crisis Response	Information Seeking	Information Usage	Breadth of Approach	Strategy	Average
Green+	1.35 [1.28,1.43] ( $<0.0001$ )	1.39 [1.26,1.52] ( $<0.0001$ )	1.44 [1.27,1.62] ( $<0.0001$ )	1.14 [1.11,1.17] ( $<0.0001$ )	2.35 [1.91,2.78] ( $<0.0001$ )	1.10 [1.07,1.14] ( $<0.0001$ )	3.94 [3.47,4.41] ( $<0.0001$ )	1.43 [1.25,1.60] ( $<0.0001$ )	3.77 [3.40,4.14] ( $<0.0001$ )	1.99 [1.89,2.09] ( $<0.0001$ )
Moderate CO <sub>2</sub>	1.20 [1.13,1.27] ( $<0.0001$ )	1.08 [0.95,1.21] (0.23)	1.68 [1.51,1.85] ( $<0.0001$ )	1.05 [1.02,1.08] (0.0009)	2.05 [1.63,2.48] ( $<0.0001$ )	1.11 [1.08,1.15] (0.61)	2.61 [2.15,3.07] ( $<0.0001$ )	1.29 [1.12,1.46] (0.0013)	3.17 [2.81,3.53] ( $<0.0001$ )	1.69 [1.59,1.79] ( $<0.0001$ )
High CO <sub>2</sub>	0.91 [0.84,0.98] (0.015)	0.88 [0.75,1.01] (0.081)	0.85 [0.68,1.02] (0.087)	1.00 [0.97,1.03] (0.76)	1.33 [0.90,1.75] (0.14)	1.08 [1.05,1.12] (0.35)	1.01 [0.55,1.48] ( $<0.0001$ )	0.98 [0.81,1.15] (0.78)	0.83 [0.47,1.19] (0.36)	0.99 [0.89,1.09] (0.78)
Green	1.14 [1.06,1.21] (0.0003)	1.04 [0.91,1.18] (0.51)	1.51 [1.34,1.68] ( $<0.0001$ )	1.03 [1.00,1.06] (0.065)	1.97 [1.54,2.40] ( $<0.0001$ )	1.09 [1.05,1.12] (0.45)	2.72 [2.26,3.19] ( $<0.0001$ )	1.21 [1.04,1.38] (0.018)	2.83 [2.46,3.19] ( $<0.0001$ )	1.61 [1.51,1.71] ( $<0.0001$ )
Conventional <sup>a</sup>	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Green+	1.37 [1.30,1.44] ( $<0.0001$ )	1.33 [1.20,1.46] ( $<0.0001$ )	1.52 [1.35,1.69] ( $<0.0001$ )	1.15 [1.12,1.19] ( $<0.0001$ )	2.27 [1.85,2.69] ( $<0.0001$ )	1.11 [1.08,1.15] ( $<0.0001$ )	4.04 [3.58,4.51] ( $<0.0001$ )	1.50 [1.33,1.67] ( $<0.0001$ )	3.98 [3.62,4.34] ( $<0.0001$ )	2.03 [1.93,2.13] ( $<0.0001$ )
R <sup>2</sup>	0.34	0.17	0.33	0.03	0.28	0.06	0.69	0.27	0.79	0.81

<sup>a</sup>Reference

**Tabla 5**

### *Consideraciones varias*

Analizando valores promedio de las puntuaciones, ajustado para los participantes sobre todos los campos cognitivos (datos no mostrados en este informe), podemos extraer las siguientes conclusiones:

- Un aumento de 400 ppm de CO<sub>2</sub> se asocia a una disminución del 21%.
- Un aumento de 20 CFM (cubic feet per minute o 9,2 l/s) de aire exterior por persona se asocia con una mejora del 18%.
- Un aumento de la concentración de TVOCs de 500 µgr/m<sub>3</sub>, se asocia con una disminución de un 13%.

A pesar de que algunos de los parámetros ambientales no fueron experimentalmente modificados, estos sufrieron pequeñas variaciones a lo largo del estudio (Tabla 2). Aunque hubo un alto grado de consistencia en la calidad ambiental interior (CAI) entre las dos salas, la concentración de Ozono registrada fue significativamente superior en una de las salas (238 µgr/m<sup>3</sup> frente a 6,85 µgr/m<sup>3</sup>) en el día con escenario "Green" (día 4). Ese día, las puntuaciones fueron un 4% superiores en la sala con la concentración de ozono más elevada.

Estos parámetros CAI (temperatura, humedad relativa, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>2,5</sub>, nivel de ruido, luz ambiental e irradiancia), fueron añadidos al modelo, como variables experimentales controladas y no se encontraron asociaciones relevantes con las capacidades cognitivas evaluadas (0,05 de nivel de significación estadística).

## 4.-DISCUSIÓN

### *Edificios Green y Salud*

Se ha encontrado un importante aumento en las puntuaciones de las funciones cognitivas cuando las personas permanecen un día completo en un Edificio Green, comparado con un ambiente diseñado para simular un Edificio Convencional con elevadas concentraciones de VOCs. El estudio se planteó para representar las condiciones típicas observadas en muchos edificios. No se incluyeron exposiciones extremas, ni se eligieron fuentes de emisión de VOCs poco comunes.

Lo cierto, es que se seleccionaron los objetivos de niveles de VOCs, tasas de ventilación y CO<sub>2</sub>, para estar por encima y por debajo de estándares y guías comunes como LEED, ASHRAE, y el estudio EPA BASE, con la finalidad de evaluarlos (USGBC 2014, ASHRAE 2013b, USEPA 1998). Nuestros hallazgos indican que pueden haber beneficios usando la referencia para VOCs de la guía LEED y mejorando las tasas de ventilación por encima de los requerimiento mínimos de ASHRAE.

Los parámetros de la simulación de Edificios Convencionales en este trabajo está basada en el estudio USEPA BASE, en el que se representan las características de los “típicos” edificios en EEUU de los 1990’s porque los propietarios que estuvieron dispuestos a participar en el estudio, introdujeron sus potenciales preferencias personales y los edificios “sin problemas” fueron seleccionados preferentemente (Persily 2004). Por lo tanto, hacer extensivo que los BASE edificios representa a la típica construcción convencional no está claro. Nuestras averiguaciones muestran que en el BASE estudio, por encima del 95%, los edificios tenían concentraciones de CO<sub>2</sub> sobre 945 ppm y concentraciones promedio de VOCs de 450 µgr/m<sub>3</sub>. Sin embargo, una importante cantidad de edificios en el estudio BASE, excedería probablemente estos niveles si los edificios “problemáticos” se hubiesen incluido en el proceso de selección.

Las concentraciones de VOCs en el día Convencional abarcan la guía LEED (500 µgr/m<sub>3</sub>) y el promedio en el estudio BASE 450 µgr/m<sub>3</sub>). Se añadieron fuentes de emisión comunes de VOCs, a las habitaciones, durante el día de Edificio “Convencional” con la intención de aumentar el rango de estos compuestos. Testeos previos, con la herramienta SMS mostraron que, exposiciones de los participante a 2 horas pintando, se relacionaba con reducciones de capacidades en 3 de los 4 campos investigados (Satish et al., 2013). “The lower TVOC concentrations (yet larger number of sources) in this study were associated with statistically significant decrements in decision-making performance in 5 of the 9 domains”.

### ***Dióxido de Carbono y Ventilación***

El dióxido de carbono se ha utilizado durante mucho tiempo para ambiente interiores como un indicador del grado de ventilación y de la adecuada calidad del aire interior (ASHRAE 2013). Sin embargo, esta idea convencional, está siendo desafiada debido a las evidencias en aumento de que el CO<sub>2</sub> es un contaminante directo, y no solo un marcador para otros contaminantes (Satish et al. 2012). Se han encontrado, con relevancia estadística, disminuciones en las puntuaciones de las capacidades cognitivas cuando la concentración de CO<sub>2</sub>, se incrementaba hasta niveles que están considerados como habituales en ambientes interiores (aproximadamente 950 ppm). De hecho, este nivel de CO<sub>2</sub> está considerado como aceptable, debido a que satisfaría la tasa de ventilación de la guía ASHRAE para una aceptable calidad del aire interior. Las disminuciones observadas cuando el CO<sub>2</sub> está sobre 1400 ppm son muy superiores.

Satish et al., usó la herramienta SMS para comprobar el efecto a la exposición de CO<sub>2</sub> sobre las funciones cognitivas con 22 participantes, usando una sala de ambiente controlado e inyectando CO<sub>2</sub> ultra puro (Satish et al. 2012). Registró implicaciones en 7 de 9 habilidades cognitivas cuando las concentraciones de CO<sub>2</sub> aumentaban.

El SMS también se utilizó para comprobar la relación entre la tasa de ventilación y las capacidades cognitivas entre 16 participantes (Maddalena et al. 2014). Los participantes obtuvieron puntuaciones significativamente inferiores en 8 de los 9 campos con tasas de ventilación bajas (12,5 cfm de aire exterior por persona). En contraste con nuestro presente estudio, éste tuvo las siguientes peculiaridades:

- 1) Un único parámetro experimental.
- 2) Medio día o exposiciones más cortas.
- 3) Múltiples condiciones experimentales para cada día.
- 4) Exposiciones objetivo anormales (2500 ppm de CO<sub>2</sub> y 12,5 cfm de aire exterior por persona).
- 5) Estudiantes de primer ciclo y adolescentes.

A pesar de estas diferencias, nuestro estudio encontró similares cambios en las puntuaciones cognitivas a variaciones en el CO<sub>2</sub> y el aire exterior de ventilación. Las relaciones fueron consistentes en:

- a) En los 3 tipos de poblaciones estudiadas, indicando que la comprensión tanto en trabajadores como en estudiantes se veía igualmente afectada por la concentración de CO<sub>2</sub> y por el aire exterior de ventilación.
- b) La duración de las diferentes exposiciones indica que, incluso cortas exposiciones influirían en las capacidades cognitivas del individuo. Puesto que

se dan similitudes en los hallazgos, puede que no haya insensibilización o respuesta de compensación para exposiciones prolongadas. Se requiere de más investigaciones para dar respuesta a estos asuntos.

Los niveles de exposición utilizados en este estudio también son comparables a aquellos observados en varias localizaciones interiores. Una evaluación, en vivienda pública de Boston, encontró concentraciones de CO<sub>2</sub> promedio de 809 ppm en apartamento convencionales, y 1204 ppm en las recientes construcciones de apartamentos LEED platinum (Colton et al. 2014). Corsi et al. (2002) registró concentraciones de CO<sub>2</sub> superiores a 1000 ppm en el 66% de 120 aulas en Texas, y Shendell et al. (2004) midió también concentraciones de CO<sub>2</sub> superiores a 1.000 ppm en el 45% de 435 aulas en Washington y Idaho, y refirió que estas elevadas concentraciones de CO<sub>2</sub> se asociaban con aumentos en el absentismo del alumnado.

### *Fortalezas y Limitaciones*

El diseño del estudio cuenta con notables fortalezas, entre las cuales podemos destacar:

- La repetición de las mediciones de las funciones cognitivas sobre el mismo individuo para el control de la variabilidad entre diferentes sujetos.
- La caracterización del Laboratorio TIEQ para diferentes escenarios ambientales.
- Repetición de las pruebas, para una misma condición, nueve días diferentes en diferentes días de la semana.
- Las pruebas se realizaron en los días centrales de la semana (martes, miércoles y jueves).
- Tanto los participantes como los analistas de las pruebas desconocían las condiciones ambientales de cada día.
- El uso de una medición objetiva de las capacidades cognitivas.

El programa informático SMS, es una herramienta de evaluación objetiva, y a diferencia de las medidas de autoevaluación, y por tanto es menos susceptible a las percepciones ambientales de los participantes. Se ha dedicado un gran esfuerzo a evaluar la validez del software SMS; correlaciones entre las puntuaciones de los tests y otras medidas de productividad como ingresos por edad y nivel laboral por edad, excedían 0,6 (Streufret et al. 1988).

Las correlaciones son más consistentes en los campos cognitivos más estratégicos, como la estrategia, el uso de la información y la repuesta antes situaciones de crisis que los campos que pertenecen a la actividad, como la búsqueda de información y el nivel de actividad. Los campos cognitivos que más se han visto implicados con las

exposiciones ambientales en este estudio, son los mismos que están íntimamente relacionados con otras medidas de productividad (Streufret et al. 1988). Por último, la elevada concordancia en las puntuaciones de los 2 días de condición “Green+” sugiere que:

- La validez interna del estudio.
- No existen efectos que se puedan asociar al aprendizaje en los test.
- El día de la semana en que se realizan los test (martes o jueves), no debe ser considerado como un factor de distorsión.

El potencial de distorsión, el efecto en la posible modificación por los parámetros medidos o por cualquier otra causa, que se ven reducidos por el uso de un ambiente controlado y la repetición de las mediciones para cada participante.

Puesto que se ha testado en días consecutivos, es posible que los efectos de la exposición de un día, se vieran reflejados en la puntuación del siguiente día.

Los factores ambientales que no fueron experimentalmente modificados, mostraron algunas variaciones, debido a cambios en las condiciones exteriores y al comportamiento de los participantes. Particularmente, los niveles de Ozono fluctuaron significativamente entre los diferentes escenarios (Tabla 2).

Los otros factores ambientales que no sean la tasa de ventilación, el CO<sub>2</sub> y los VOCs no fueron indicadores estadísticamente significativos en las puntuaciones cognitivas, no obstante no se puede descartar la posibilidad de distorsiones no controladas por estos factores. Las condiciones ambientales de cada día del estudio seguían criterios de diseño. Durante un día (Día 4), las concentraciones de CO<sub>2</sub> fueron inferiores por la mañana que por la tarde, lo cual influyó en la media del registro diario. Los niveles de CO<sub>2</sub> en este día, fueron similares a las condiciones de los días “CO<sub>2</sub> moderado” y “Convencional” (Día 5), antes y durante el test cognitivo (926 ppm entre las 14:00 y las 17:00 hrs). Este estudio ha usado un ambiente controlado, con control independiente de algunos contaminantes. Las evaluaciones en ambientes de oficinas reales son fundamentales para confirmar los hallazgos en escenarios no controlados.

## 5.-CONCLUSIONES

Los trabajadores de oficinas tuvieron una importante mejora de sus puntuaciones de habilidades cognitivas cuando trabajaban en ambientes “Green” y “Green+” en comparación con las condiciones del “Convencional”.

Las exposiciones a niveles de CO<sub>2</sub> y VOCs encontradas en edificios de oficinas comunes, se asocian con notas más bajas en las capacidades cognitivas comparadas con las obtenidas en edificios “Green”.

Usando materiales de baja emisión, lo cual es práctica habitual en edificios “green”, reduce en las oficinas las exposiciones a VOCs.

Incrementando la alimentación de aire exterior, no solo se reducen las exposiciones a CO<sub>2</sub> y VOCs, sino también a otros contaminantes de ambientes interiores.

Los diseños de edificios “Green” que optimizan la productividad de los empleados y el uso de la energía, requerirán la adopción de sistemas de eficiencia energética y prácticas de mantenimiento informadas, que puedan maximizar los beneficios para la salud de las personas mientras minimizan los consumos de energía.

Este estudio se diseñó para reflejar ambientes interiores de oficina en los cuales multitud de personas trabajan a diario.

Estas exposiciones deberían ser investigadas en otros ambientes interiores, tales como viviendas, colegios y aviones, donde disminuciones en las funciones cognitivas y en la toma de decisiones podrían significar impactos muy importantes en la productividad, el aprendizaje y la seguridad.

## **6.-REFERENCIAS**

Allen J, MacNaughton P, Laurent J, Flanigan S, Eitland E, and J Spengler. 2015. Green Buildings and Health. *Current Environmental Health Reports*. 2(3): 250-258.

ACGIH. 2015. Guide to Occupational Exposure Values. American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). Cincinnati, OH.

ASHRAE. 2013. 2013 ASHRAE Handbook—Fundamentals [SI Edition]. Atlanta, GA: *American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc.*

ASHRAE Standard 62.1-2013. 2013. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. Atlanta, GA: *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.*

Allen J, MacIntosh D, Saltzman L, Baker B, Matheson J, Recht J, Minegishi T, Fragala M, Myatt T, Spengler J, Stewart J, McCarthy J. 2011. Elevated Corrosion Rates and Hydrogen Sulfide in Homes with ‘Chinese Drywall’. *Science of the Total Environment*, 426: 113-119.

Breuer K, & Satish U. 2003. Emergency Management Simulations: An Approach to the Assessment of Decision-making Processes in Complex Dynamic Crisis Environments. In N. A. Press (Ed.), *From Modeling to Managing Security: A Systems Dynamics Approach* (J.J. G, ed). (pp. 145–156). Norway.

Colton M, MacNaughton P, Vallarino J, Kane J, Bennett-Fripp M, Spengler J, & Adamkiewicz G. 2014. Indoor Air Quality in Green Vs Conventional Multifamily Low-Income Housing. *Environmental Science & Technology*, 48(14), 7833-7833.

Corsi RL, Torres VM, Sanders M, & Kinney KA. 2002. Carbon dioxide levels and dynamics in elementary schools: results from the TESIAs study. *Proceedings from Indoor Air 2002, vol. 1*.

Fisk WJ, & Rosenfeld AH. 1997. Estimates of Improved Productivity and Health from Better Indoor Environments. *Indoor Air*, 7(3), 158-172. doi: 10.1111/j.1600-0668.1997.t01-1-00002.x

Hedge A & Gaygen DE. 2010. Indoor Environment Conditions and Computer Work in an Office. *HVAC&R Research Journal*, 16 (2), 123-138.

Hedge A. 2009. Indoor Environmental Quality, Health and Productivity. *Environmental Research Journal*, 4 (1/2).

Jacobs DE, Ahonen E, Dixon SL, Dorevitch S, Breyse J, Smith, J, Levavi P. 2014. Moving Into Green Healthy Housing. *Journal of Public Health Management and Practice*, 1. doi:10.1097/PHH.0000000000000047



Maddalena R, Mendell M, Eliseeva K, Chan W, Sullivan D, Russell M, Satish U, Fish w. 2014 Effects of ventilation rate per person and per floor area on perceived air quality, sick building syndrome symptoms, and decision-making. *Indoor Air*. doi: 10.1111/ina.12149

Mendell, MJ. 1993. Non---Specific Symptoms In Office Workers: A Review And Summary Of The Epidemiologic Literature. *Indoor Air*, 3(4), 227-236. doi: 10.1111/j.1600-0668.1993.00003.x

Nishihara N, Wargocki P, Tanabe S. 2014. Cerebral blood flow, fatigue, mental effort, and task performance in offices with two different pollution loads. *Building and Environment* 71:153-164. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.09.018

Noris F, Adamkiewicz G, Delp W, Hotchi T, Russell M, Singer BC, Fisk WJ. 2013. Indoor environmental quality benefits of apartment energy retrofits. *Building and Environment*, 68, 170-178. doi: 10.1016/j.buildenv.2013.07.003

NRC. 2007. *Green schools attributes for health and learning*. Washington, DC.  
Persily A and Gorfain J. 2004. "Ventilation data from the Environmental Protection Agency Building Assessment Survey and Evaluation (BASE) Study." *National Institute of Standards and Technology*, U.S. Department of Commerce. NISTIR 7145.

Persily A. 2015. Challenges in developing ventilation and indoor air quality standards: The story of ASHRAE Standard 62. *Building and Environment*, 91, 61-69.

Riesenberg DE, Arehart-Treichel J. 1986. "Sick building" syndrome plagues workers, dwellers. *JAMA* 255:3063-3063.

Satish U, Cleckner L, & Vasselli J. 2013. Impact of VOCs on decision making and productivity. *Intelligent Buildings International*, 5(4), 213-220. doi: 10.1080/17508975.2013.812956

Satish U, Mendell MJ, Shekhar K, Hotchi T, Sullivan D, Streufert S, & Fisk, WJ. 2012. Is CO<sub>2</sub> an indoor pollutant? Direct effects of Low-to-moderate CO<sub>2</sub> concentrations on human decision-making performance. *Environmental Health Perspectives*, 120(12), 1671.

Satish U, Streufert S, Dewan M, & Voort S. 2004. Improvements in Simulated Real-world Relevant Performance for Patients with Seasonal Allergic Rhinitis: Impact of Desloratadine. *Allergy*, 59(4), 415-420.

Shendell DG, Prill R, Fisk WJ, Apte MG, Blake D & Faulkner D. 2004. Associations between classroom CO<sub>2</sub> concentrations and student attendance in Washington and Idaho. *Indoor Air*, 14, 333-341.

Singh A, Syal M, Grady SC, & Korkmaz S. 2010. Effects of green buildings on employee health and productivity. *American journal of public health*, 100(9), 1665. doi:10.2105/AJPH.2009.180687

Streufert S & Swezey R. 1986. "Complexity, managers, and organizations." *Organizational and occupational psychology, Development Psychology Series*. Academic Press. ISBN: 0126733708, 9780126733709.

Streufert S, Pogash R, & Piasecki M. 1988. Simulation-based assessment of managerial competence: reliability and validity. *Personnel Psychology*, 41(3), 537-557. doi: 10.1111/j.1744-6570.1988.tb00643.x

Streufert S, Pogash RM, Gingrich D, Kantner A, Lonardi L, Severs W, Roache J. 1993. Alcohol and Complex Functioning. *Journal of Applied Social Psychology*, 23(11), 847-866. doi: 10.1111/j.1559-1816.1993.tb01009.x

U.S. Green Building Council (USGBC). 2014. LEED v4 - User Guide. Washington D.C. <http://www.usgbc.org/resources/leed-v4-user-guide>

U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). 1998. Building Assessment Survey and Evaluation. Retrieved 1/22, 2015, from [http://www.epa.gov/iaq/base/study\\_overview.html](http://www.epa.gov/iaq/base/study_overview.html)