



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

EUAT A CORUÑA - CURSO 2018/19
MÁSTER UNIVERSITARIO EN EDIFICACIÓN SOSTENIBLE

TRABAJO FIN DE MÁSTER
Septiembre 2019

**ESTUDIO DE SISTEMAS PASIVOS PARA EVITAR
PROBLEMAS RESPIRATORIOS EN INTERIORES
DE VIVIENDA UBICADOS EN LUGARES
DE CLIMA HÚMEDO Y VENTOSO**

AUTORA: ROSALIDIA ÁLVAREZ HERNÁNDEZ
TUTOR: SANTIAGO PINTOS PENA

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor Santiago Pintos, por haberme animado a investigar la relación entre áreas a priori tan distintas como la arquitectura y la salud, por el enfoque del trabajo y por su tutorización.

A distintos profesionales que me han ofrecido su tiempo y conocimiento para llevar a cabo este estudio, a Débora Fernández por su gran disposición en las búsquedas de artículos, al estudio de arquitectura técnica Alce y a David Castro por resolver las dudas sobre el estándar energético, a Coral González por realizar aportaciones en el aspecto sanitario y, en especial, a Mauro Dona por su inquietud en la tecnología y elaborar el dispositivo empleado para el experimento y a María Álvarez por los análisis estadísticos y su paciencia en la continua revisión de datos.

A los profesores y compañeros del máster, por sus aportes de ideas y su compañerismo durante todo el curso.

A mi familia, mi mayor ejemplo de esfuerzo y constancia, por su incondicional apoyo. Ella es mi motivación para querer mejorar como profesional y como persona.

FE DE ERRATAS

Se hace constar que en este trabajo fin de máster se han advertido los siguientes errores:

Página 25, 8º párrafo, donde pone “Norma UNE-EN 15251:2008. Parámetros del ambiente interior a considerar para el diseño y la evaluación de la eficiencia energética de edificios incluyendo localidad del aire interior, condiciones térmicas, iluminación y ruido” debería poner “Norma UNE-EN 15251:2008. Parámetros del ambiente interior a considerar para el diseño y la evaluación de la eficiencia energética de edificios incluyendo la calidad del aire interior, condiciones térmicas, iluminación y ruido”.

Página 98, 2ª línea del último párrafo, donde pone “las partículas golpean la fibra donde se depositan y se acumulan.” debería poner “las partículas golpean la fibra donde se depositan y se acumulan.”

Página 123, tabla 16, donde se indican las variables “despacho # despacho” debería poner “despacho # dormitorio”.

Página 132, figura 76, donde pone “estudio” debería poner “despacho”.

Página 180, pie de imagen, donde pone “Figura A.III_2” debería poner “Figura A.III_3”.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	1
ÍNDICE DE FIGURAS	3
ÍNDICE DE TABLAS	7
1. RESUMEN / ABSTRACT	9
1.1 RESUMEN	9
1.2 ABSTRACT	9
2. INTRODUCCIÓN	11
3. JUSTIFICACIÓN.....	15
4. OBJETIVOS	19
5. MÉTODO.....	21
6. ESTADO DEL ARTE	23
6.1 DEFINICIÓN DE CALIDAD DE AIRE	23
6.2 EXIGENCIAS NORMATIVAS RELACIONADOS CON LA CALIDAD DE AIRE INTERIOR	23
6.3 PRINCIPALES AGENTES Y SUS EFECTOS EN LA SALUD	26
6.4 ACCIONES ANTE LOS CONTAMINANTES	38
6.5 MEDICIÓN DE LA CALIDAD DE AIRE.....	39
7. CONTEXTUALIZACIÓN	45
7.1 CLIMA	45
7.2 POBLACIÓN.....	50
7.3 CRITERIOS DE CONFORT.....	52
8. ESTRATEGIAS EN ARQUITECTURA SOSTENIBLE.....	55
8.1 ARQUITECTURA VERNÁCULA	55
8.2 ARQUITECTURA PASIVA	61
9. MEDIDAS PASIVAS.....	67
9.1 VENTILACIÓN.....	67
9.2 REGULACIÓN DE LA HUMEDAD.....	78
9.3 ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES	83
10. MEDIDAS ACTIVAS.....	89
10.1 CRITERIOS DE ARQUITECTURA PASIVA EN EL ESTÁNDAR PASSIVHAUS.....	89
10.2 ESTÁNDAR PASSIVHAUS.....	90
10.3 VENTILACIÓN.....	91
10.4 VENTILACIÓN DE CONFORT.....	94
10.5 CONTROL DE LA VENTILACIÓN Y CONTROL DE LA CALIDAD DE AIRE	96
11. COMPARACIÓN DE ESTRATEGIAS	103
11.1 COMPARATIVA DE SOSTENIBILIDAD	103
11.2 ESTRATEGIAS EN LAS CERTIFICACIONES MEDIOAMBIENTALES	111
12. EXPERIMENTO: MEDICIÓN DE CALIDAD DE AIRE EN AMBIENTE INTERIOR A TRAVÉS DE SENSORES	117

12.1 INTRODUCCIÓN	117
12.2 TECNOLOGÍAS: SENSORES Y MONITORIZACIÓN	117
12.3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA CREADO	118
12.4 CONDICIONES Y SIMULACIONES	121
12.5 RESULTADOS	123
12.6 CONCLUSIONES	144
13. CONCLUSIONES	147
14. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	153
15. BIBLIOGRAFÍA	155
ANEXO I	167
ANEXO II	171
ANEXO III	177

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 10 principales causas de muerte en 2016.	11
Figura 2. Porcentaje del tiempo en seis localizaciones.	13
Figura 3. Boceto a mano de la teoría de las cinco pieles por Friedensreich Hundertwasser.	15
Figura 4. Fuentes que relacionan humedad y salud.	16
Figura 5. Esquema gráfico del proceso metodológico utilizado.	22
Figura 6. Caudales mínimos de ventilación en locales habitables.	23
Figura 7. Caudales mínimos de ventilación en locales no habitables.	24
Figura 8. Caudales de ventilación y concentración de CO ₂ en locales según la categoría del ambiente interior.	24
Figura 9. Diagrama de edificio con fuentes de contaminantes de interior y de exterior.	27
Figura 10. Rango óptimo de humedad relativa en interior de edificios.	29
Figura 11. Fuentes de COV más frecuentes en el aire interior de edificios.	35
Figura 12. Medidor de CO, CO ₂ , temperatura y humedad.	41
Figura 13. Medidor de formaldehidos.	41
Figura 14. Medidor de partículas.	42
Figura 15. Equipos para medición con bomba de muestreo.	42
Figura 16. Clasificación climática de Köppen-Geiger de la península ibérica.	45
Figura 17. Dominios climáticos de Galicia, recogidos de Pérez Alberti.	46
Figura 18. Comarcas costeras.	47
Figura 19. Valor medio diario de radiación solar (kWh/m ²).	48
Figura 20. Valor medio anual de continentalidad (°C).	48
Figura 21. Valor medio de termicidad invernal (°C).	49
Figura 22. Valor medio de termicidad estival (°C).	49
Figura 23. Valor medio de diurnidad (°C).	50
Figura 24. Valor medio anual de viento (m/s).	50
Figura 25. Precipitación anual acumulada (mm).	51
Figura 26. Valor medio anual de viento (m/s).	51
Figura 27. Climograma de bienestar de Givoni.	53
Figura 28. Principios de sostenibilidad de arquitectura vernácula.	55
Figura 29. Técnicas de protección frente al viento en Turquía, Normandía y Nueva Inglaterra; barreras frente al viento en tienda árabe, en tienda india y en iglú.	56
Figura 30. Casa González Luna, 1928-30.	59
Figura 31. Casa Ugalde en Caldes d’Estrac.	60
Figura 32. Casa en Paderne 2010.	61

Figura 33. Diagrama del efecto de la vegetación como cortaviento.	61
Figura 34. Relación de compacidad y consumo de energía	62
Figura 35. Diagrama de inercia térmica en muros gruesos.....	62
Figura 36. Diagrama de elementos singulares para controlar agentes físicos.....	63
Figura 37. Diagrama de elementos de ventilación en vivienda	63
Figura 38. Potencial de las estrategias de ventilación natural en reducción de consumo del acondicionamiento térmico estival.....	67
Figura 39. Esquemas de invernadero.....	69
Figura 40. Esquemas de suelo acumulador de grava.	70
Figura 41. Esquemas de sistema de doble piel.	70
Figura 42. Esquemas de muro trombe.	71
Figura 43. Esquemas de pozo canadiense.....	71
Figura 44. Esquemas de ventilación natural directa.	72
Figura 45. Esquemas de ventilación natural cruzada a diferentes alturas.	73
Figura 46. Esquemas de combinación ventilación natural cruzada, aleros, tamaño de huecos y distribución interior.	73
Figura 47. Principios de ventilación por efecto chimenea.	76
Figura 48. Principios de ventilación natural favorecido por la forma de la cubierta.....	77
Figura 49. Ventilación natural con chimenea térmica solar.	77
Figura 50. Ventilación a través de ventanas.	78
Figura 51. Curvas de sorción de diferentes materiales típicos en construcción.....	79
Figura 52. Comparación del MBV de 8 materiales.....	79
Figura 53. Rangos de clasificación de MBV.	81
Figura 54. Cocina con cemento fotocatalítico de Italcementi Group.	87
Figura 55. Pavimento de gres fotocatalítico de 120 x 60cm.	87
Figura 56. Esquema de ventilación natural basada en diferencia de presión (izquierda) y en diferencia de temperatura (derecha).....	91
Figura 57. Esquema de ventilación híbrida en vivienda.....	92
Figura 58. Esquema de ventilación controlada de doble flujo en vivienda.	93
Figura 59. Comparación entre ventilación natural y ventilación controlada.....	94
Figura 60. Principio de recuperación de calor, funcionamiento en invierno (izquierda) y verano con bypass (derecha).	95
Figura 61. Distribución de aire estelar (izquierda) y en cadena (derecha)	96
Figura 62. Distribución de tamaño de contaminantes atmosféricos comunes.	98
Figura 63. Gráfico de sostenibilidad de las estrategias.....	110
Figura 64. Equipo de medición.....	119
Figura 65. Arquitectura del sistema.	120

Figura 66. Ejemplo de gráfica sobre humedad exterior durante 30 días.....	120
Figura 67. Ejemplo de gráfica sobre temperatura exterior durante 30 días.....	121
Figura 68. Relación de temperatura interior – exterior durante 60 días.....	124
Figura 69. Relación de humedad interior – exterior durante 60 días.	125
Figura 70. Temperatura en ambas estancias.	126
Figura 71. Humedad en ambas estancias.....	127
Figura 72. Modificación de la temperatura por la ventilación en el dormitorio.....	128
Figura 73. Modificación de la humedad por la ventilación en el dormitorio.....	128
Figura 74. Modificación de la temperatura por la ventilación en el despacho.....	129
Figura 75. Modificación de la humedad por la ventilación en el despacho.....	130
Figura 76. Concentración de CO ₂ en el despacho y dormitorio.	132
Figura 77. Concentración de VOC en el despacho y en el dormitorio.	133
Figura 78. Concentración de PM _{2,5} en el despacho y en el dormitorio.	134
Figura 79. Concentración de PM ₁₀ en el despacho y en el dormitorio.	135
Figura 80. Modificación de CO ₂ por la ventilación en el dormitorio.....	136
Figura 81. Modificación de VOC por la ventilación en el dormitorio.....	137
Figura 82. Modificación de PM _{2,5} por la ventilación en el dormitorio.	138
Figura 83. Modificación de PM ₁₀ por la ventilación en el dormitorio.....	139
Figura 84. Modificación de CO ₂ por la ventilación en el despacho.....	140
Figura 85. Modificación de VOC por la ventilación en el despacho.....	141
Figura 86. Modificación de PM _{2,5} por la ventilación en el despacho.	142
Figura 87. Modificación de PM ₁₀ por la ventilación en el despacho.....	143

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Factores que afectan la calidad de aire interior.....	27
Tabla 2. Principales contaminantes de exterior e interior.....	31
Tabla 3. Principales fuentes contaminantes del aire interior.....	32
Tabla 4. Fuentes de emisión de PUF en interior.....	33
Tabla 5. Origen de microorganismos en interior de edificios.....	37
Tabla 6. Técnicas constructivas de la arquitectura vernácula marinera en Galicia.....	58
Tabla 7. Estrategias del pretratamiento del aire.....	68
Tabla 8. Estrategias del movimiento del aire.....	75
Tabla 9. Valores de MBV de materiales de construcción y su clasificación según el proyecto Nordtest.....	83
Tabla 10. Clasificación de filtros según la norma EN 779:2012.....	99
Tabla 11. Clasificación del grupo y requisitos de filtros según ISO 16890.....	100
Tabla 12. Clasificación y comparativa de filtros.....	101
Tabla 13. Comparación de estrategias en el aspecto social.....	107
Tabla 14. Comparación de estrategias en el aspecto medioambiental.....	108
Tabla 15. Comparación de estrategias en el aspecto económico.....	109
Tabla 16. Esquema de comparaciones a valorar con el ensayo.....	123

1. RESUMEN / ABSTRACT

1.1 RESUMEN

El siguiente trabajo indagará sobre las influencias de diversos agentes a la hora de realizar una construcción y cómo esta relación puede afectar a la salud de las personas que la habitan.

La calidad del aire interior se puede ver alterada por numerosos parámetros por las características climáticas, las condiciones del entorno y por las concentraciones de contaminantes que, cada vez son mayores en ambientes interiores.

Además de considerar las herramientas legislativas y guías para identificar las situaciones de riesgo en cuanto a calidad de aire interior, se investigarán los recursos y conocimientos necesarios que pueden regular esta situación de malestar.

En concreto, el estudio buscará una zona de costa con clima húmedo y ventoso para analizar la influencia de la humedad en afecciones respiratorias como el asma y la rinitis alérgica; las soluciones constructivas pasivas que pueden ser óptimas para disminuir los agentes físicos, biológicos y químicos que puedan contaminar el ambiente interior de las viviendas, así como las mejoras que se puedan realizar para mitigar este tipo de situaciones de una forma sostenible.

PALABRAS CLAVE

Calidad de aire interior, humedad, asma, arquitectura pasiva, contaminación.

1.2 ABSTRACT

This research will investigate the influence of various agents when making a housing construction and how this relation can affect the health of its inhabitants.

Indoor air quality can be altered by many parameters such as climate characteristics, surrounding conditions and pollutant concentration, which are on the rise in indoor environments.

In addition to considering legislative tools and guidelines to identify potential indoor air quality hazards, it will also research the resources and the competences to mitigate this discomfort.

Specifically, this paper will take a coastal area with a humid and windy climate to analyze the influence of humidity on respiratory diseases such as asthma or allergic rhinitis, the passive construction solutions that can reduce the physical, biological and chemical agents that contaminate the home indoor environments and the improvements that can be made to mitigate this hazards in a sustainable way.

KEY WORDS

Indoor air quality, humidity, asthma, passive architecture, pollution.

2. INTRODUCCIÓN

El ser humano está diseñado para interactuar con el entorno y realizar actividades en ambientes rodeados de diversos estímulos, lo que significa que la biología humana ofrece sistemas para recibir e intercambiar información y adaptarse a ese medio.

En poco tiempo, la evolución ha desarrollado multitud de entornos dependientes de agentes ante los cuales el sistema biológico y los mecanismos de adaptación del ser humano se ven alterados e incapaces de relacionarse.

Ese ajuste con el ambiente exterior se ve dificultado, en muchas ocasiones, por la mala calidad del aire. «Los estímulos vinculados a los ambientes higrotérmicos, luminosos y acústicos son energéticos, de carácter sensible. Sin embargo, la calidad del aire no corresponde a un estímulo energético y no es siempre apreciada sensitivamente, ya que hay sustancias que no se detectan ni por el olor, ni por la irritación de ojos o vías respiratorias y que, al considerarse dañinas, deben tratarse igualmente en la definición de las condiciones de diseño interior» (Neila González 2004)

Según datos revelados en 2016 por la OMS¹ la contaminación del aire representa un riesgo muy alto para la salud tanto en ciudades como en zonas rurales de viviendas —sobre todo en países de ingresos bajos y medianos—, suponiendo 4,2 millones de muertes prematuras en todo el mundo por año y siendo la enfermedad pulmonar obstructiva crónica y la infección de vías respiratorias la tercera causa de defunción [Fig. 1] en el mundo (OMS 2018a). Más concretamente en España, en 2018 las enfermedades respiratorias aumentaron un 10,3% con respecto al año anterior, situándose también como tercera causa de muerte (INE 2018a).

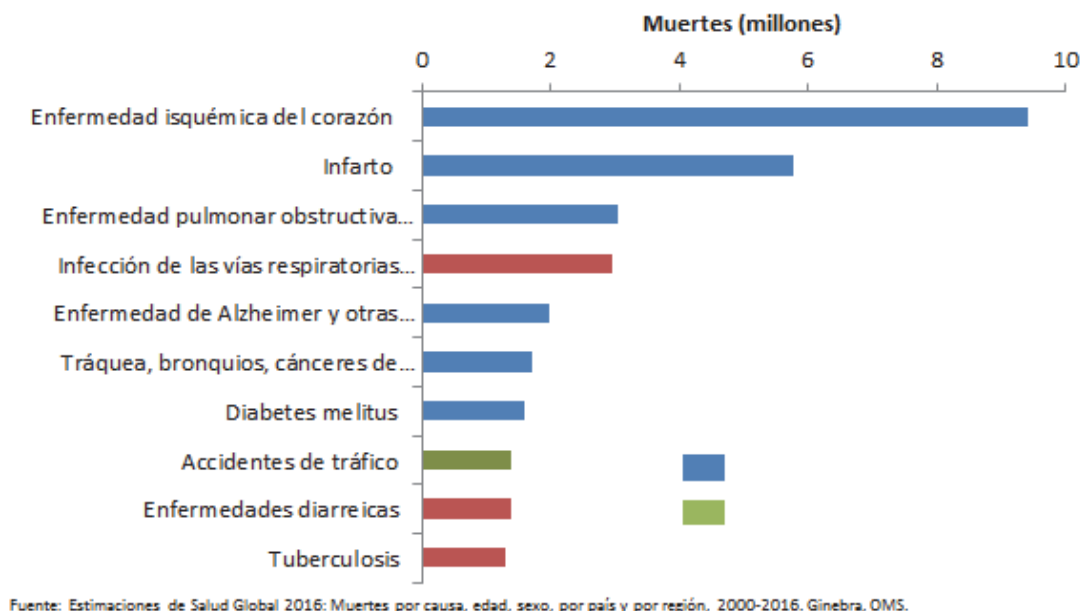


Figura 1. 10 principales causas de muerte en 2016. Fuente: (OMS 2018b)

¹ OMS: Organización Mundial de la Salud.

Con respecto al ambiente interior, la OMS señala a la contaminación del aire interior como la mayor causa de morbilidad y mortalidad en el mundo, estimando en 1,5 millones de muertes cada año las asociadas a la combustión de sólidos fósiles en interior de la vivienda. (OMS 2009)

Por otro lado, diversos estudios han demostrado que una variedad de efectos relacionados con el confort y salud del ser humano están relacionados directamente con las características ambientales del edificio.

Esta relación entre la calidad ambiental interior y el bienestar del ser humano es compleja puesto que existe una variedad de factores de tipo termal, visual, acústico y químico que pueden afectar a la comodidad del usuario bien sea a largo o corto plazo. (Apte, Fisk y Daisey 2002)

Cada vez hay más leyes, regulaciones y guías de buenas prácticas que se acercan a la idea de la sostenibilidad, aunque a veces se ignoran las dimensiones psicológicas, culturales y sociológicas de los usuarios. (Al horr et al. 2016)

El mínimo síntoma de disconfort en un ambiente interior significa, por ejemplo, una reducción en la productividad en el trabajo de los ocupantes (Stafford 2015). Como corrobora en sus investigaciones De Giuli, se establece de manera clara que los problemas de calidad de ambiente interior en edificios tienen efectos directos en el bienestar, la salud y la productividad. (De Giuli, Da Pos y De Carli 2012)

Estudiando estos aspectos, han surgido conceptos como el Síndrome del edificio enfermo (SEE) que la OMS define en 1982 como el conjunto de síntomas de salud derivados de factores presentes en el ambiente del edificio.

Un edificio se considera enfermo si al menos un 20% de ocupantes presenta síntomas, como náuseas, mareos, jaquecas o alergias y su alivio o desaparición ocurre a los pocos días o semanas de abandonar el inmueble.

El 30% de los edificios construidos o reformados actuales caracterizados por su hermeticidad, con ventanas no practicables, ventilación mecánica, muy tecnificados y con un uso generalizado de materiales sintéticos en su construcción, presentan este síndrome. (Higuero et al. 2016)

Esto no solo sucede en edificios de uso laboral. También se puede hablar del Síndrome de la casa enferma (Seki et al. 2007) referido a los problemas en el ambiente doméstico; puesto que se utilizan materiales de construcción que desprenden COV², interiores o mobiliario que emiten formaldehidos; se generan campos electromagnéticos y eléctricos; aparecen humedades y con ellas los mohos, hongos, etc. que suelen ser causa de alergias, asma, cefaleas, eccemas e incluso hipersensibilidad ambiental entre otras. (Silvestre 2014)

También, la EPA³ mostró en uno de sus estudios el incremento de COV a causa de productos de limpieza y mantenimiento en interiores —tanto de uso laboral como doméstico— de hasta 5 veces con respecto al aire exterior. No se sabe en general cuáles son todos los efectos que causan, pero sí que un 80% son irritantes de membranas mucosas y ojos y un 25% son sospechosos o comprobados cancerígenos. (Higuero et al. 2016)

² COV: Compuestos Orgánicos Volátiles.

³ EPA: Environmental Protection Agency.

Estos datos son clave para demostrar que la población sufre problemas de contaminación, que la contaminación del aire, tanto exterior como interior, es uno de los determinantes en la incidencia de las enfermedades respiratorias (OMS 2007) y que los inmuebles se han convertido también en causa del aumento de este tipo de afecciones.

Varios organismos establecen los porcentajes de estancias en los diferentes espacios. La EPA, la OMS o la Comisión europea en ciencia indican que pasamos aproximadamente un 85-90% del tiempo en espacios cerrados de los cuales más de un 60% es en vivienda [Fig. 2].

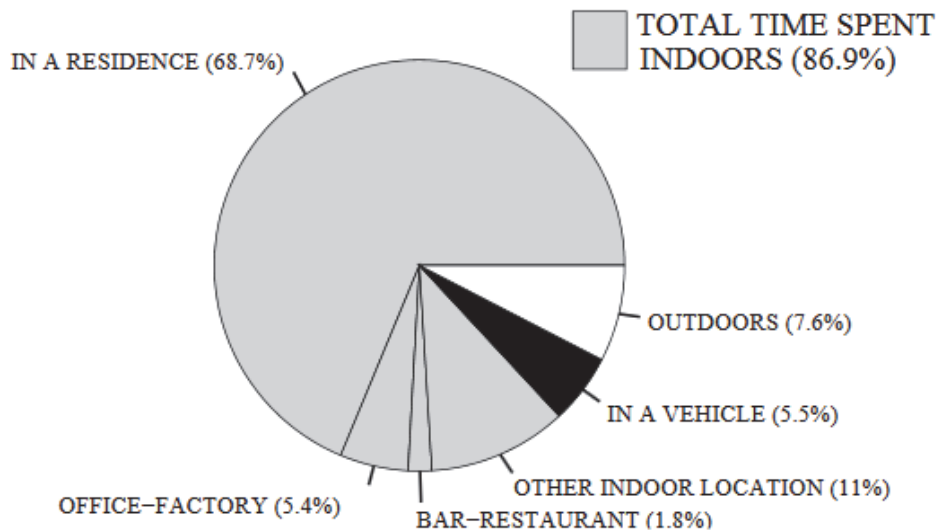


Figura 2. Porcentaje del tiempo en seis localizaciones. Fuente: <https://indoor.lbl.gov/sites/all/files/lbnl-47713.pdf>

Con estas revelaciones se ha ayudado a elevar la sensibilización pública, a aumentar las investigaciones y a tener mejor conocimiento de los contaminantes. También a realizar cambios en la legislación aportando nuevas medidas como la de establecer unos valores límite de presencia de contaminantes, cuyas leyes de riesgos laborales, tanto en Europa como en EEUU, fue la encargada de incluirlos en sus guías (Higuero et al. 2016).

En Europa, poco a poco se intenta hacer frente a las fuentes de contaminación atmosférica interior. Como indica Erik Lebre⁴ «Intentamos sustituir las sustancias más tóxicas por otras menos tóxicas o encontrar procesos que reduzcan las emisiones, como en el caso de las emisiones de formaldehído procedentes de la madera contrachapada. Otro ejemplo es la reducción de determinados materiales que emiten radón, utilizados en la construcción de paredes. Estos materiales se utilizaban antes, pero su uso se ha ido reduciendo» (AEMA 2013)

En cuanto a la legislación española en edificación, se establecen una serie de normativas que van compatibilizando la calidad de aire interior con la eficiencia energética.

⁴ Erik Lebre⁴ es profesor en el Instituto de Ciencias de Evaluación de Riesgos (IRAS) en la Universidad de Utrecht y jefe del departamento de Medio Ambiente y Seguridad del Instituto Nacional de Salud Pública y Medio Ambiente (RIVM) de los Países Bajos.

Por otro lado, se sitúan las certificaciones sostenibles de edificios de carácter voluntario que cada vez adquieren más popularidad, ya que intentan cuantificar y controlar los aspectos de la sostenibilidad de un modo más completo que las normativas nacionales. Éstas establecen como fundamental en los diseños sostenibles el uso de materiales de baja emisión, un mobiliario o moquetas que no emitan contaminantes e instalaciones con menor consumo que filtren y ventilen mejor; así como un planteamiento de seguimiento y monitorización del ambiente para, por ejemplo, gestionar la calidad de aire.

Se tiene cada vez mayor acceso a la información y un mayor conocimiento científico y tecnológico que permite la evolución del diseño de los edificios y ciudades. Todo ello debe encontrar un equilibrio para permitir dar a la calidad de aire interior, y a la salud del ser humano, la importancia que se merece.

3. JUSTIFICACIÓN

Se debe ser consciente de dos situaciones: que el medioambiente se encuentra en una situación delicada por culpa de la agresión de la actividad humana y que el entorno edificatorio se ha convertido en el hábitat actual, de forma que pasamos la mayor parte del tiempo dentro de edificios.

Esta preocupación nos hace ser sensibles ante la salud del entorno natural y la salud del ser humano. Por ello tiene que haber un compromiso con la sostenibilidad en la que la arquitectura juega un papel decisivo.

Tal y como formulaba el artista Friedensreich Hundertwasser en la teoría de las cinco pieles [Fig. 3], el ser humano está cubierto de varias capas, relacionadas entre sí y con el entorno de manera que conforma al ser humano como individuo, como parte de una sociedad y como parte del entorno natural.

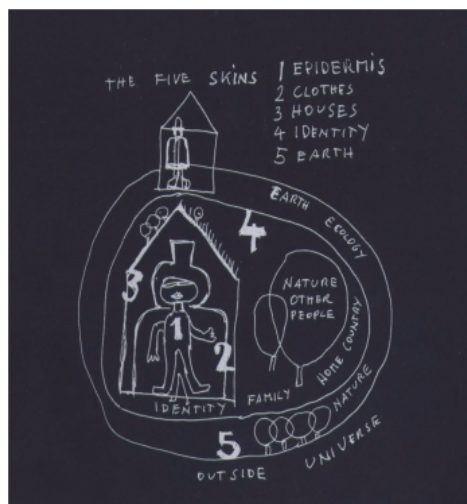


Figura 3. Boceto a mano de la teoría de las cinco pieles por Friedensreich Hundertwasser. Fuente: (Schneider 2012)

Con estas ideas y dentro de un ámbito académico, se elabora un trabajo de investigación documental para conocer las directrices que ayuden a crear un ambiente saludable a través de la disciplina de la arquitectura sostenible.

El planteamiento concreto hará referencia a medidas ante ciertos agentes físicos, químicos y biológicos que pueden producir asma y rinitis alérgica en ambiente interior.

Por un lado, el asma es una enfermedad crónica caracterizada por la hiperactividad de las vías respiratorias. Está causada por la inflamación de los bronquios debida a múltiples causas: irritantes como el tabaco, la contaminación, infecciones víricas o por alérgenos. Ocasiona disnea respiratoria de intensidad y duración variable, que se acompaña de tos, sibilancias y sensación de constricción debida al espasmo de los bronquios. Por otro lado, la rinitis es la inflamación de la mucosa de la nariz, caracterizada por estornudos, picor nasal y congestión.

Con frecuencia, estas dos enfermedades coexisten ya que, aunque una pertenezca a la vía aérea superior y otra a la inferior, no deja de ser un proceso inflamatorio de la vía respiratoria en su conjunto.

Esta relación directa hace considerar la rinitis como factor de riesgo para el asma y el empeoramiento —o tratamiento— de la primera, conlleva el agravamiento —o la mejora— de la segunda. Tras años de investigación, la estrategia terapéutica en conjunto de las dos afecciones, considerando la vía respiratoria como unidad, es la pauta médica actualmente más aceptada. (Feng, Miller y Simon 2012)

En relación a las características del ambiente, la humedad se define como vapor de agua contenido en la atmósfera del ambiente. Se genera por condensación, capilaridad o filtración hacia el interior de la vivienda y por una mala o nula impermeabilización.

En general, la mayor presencia de humedad en el hogar se produce en la estación invernal cuando se hace uso de la calefacción, ya que el aire caliente es capaz de tener más cantidad de agua en el interior que el aire frío.

Un exceso de aislamiento, junto con las actividades diarias que generan vapor de agua provocan un alto nivel de humedad interior que, sumada a la existente en el ambiente, crea un escenario ideal para cultivo de microorganismos como los mohos y hongos, sobre todo en lugares oscuros, con poca ventilación y escasa luz solar.

Existen varios estudios que muestran una relación directa entre vivir en ambientes con humedad y las enfermedades respiratorias (López-Silvarrey Varela et al. 2011), como las alergias o asma.

Así también lo publicó la OMS en 2009 en su “Guía sobre calidad de aire interior: humedad y moho”, en el que establecía evidencia epidemiológica suficiente como para concluir que los ocupantes de un edificio con humedad tenían un alto riesgo de padecer síntomas de tipo respiratorio, infecciones respiratorias, asma, falta de aire, bronquitis y rinitis alérgica.

La compleja cadena de eventos casuales que pueden constituir peligro para la salud se vincula a fuentes de agua a través del exceso de humedad que provoca un crecimiento biológico y la degradación física y química, además de la emisión de agentes biológicos y químicos peligrosos [Fig. 4]

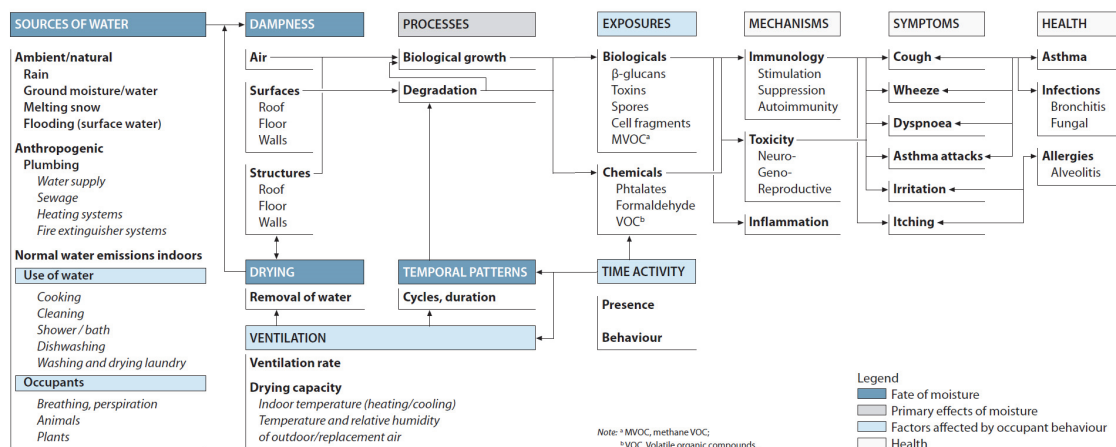


Figura 4. Fuentes que relacionan humedad y salud. Fuente: (OMS 2009)

Como se puede comprobar en el esquema anterior, la humedad crea una situación en la que los ácaros proliferan.

Los ácaros del polvo doméstico se alimentan de tejido humano muerto, caspa animal, hongos, bacterias y polen de plantas, mientras que los ácaros de productos de almacenamiento —más comunes en zonas rurales— se encuentran en granos de trigo, maíz, avena, cebada y derivados, alimentos para los animales, heno y paja. Estos microorganismos son inofensivos para el ser humano cuando se presentan en un número normal pero no cuando se concentran. La inhalación, ingestión o contacto de los ácaros, subproductos del metabolismo y las heces puede provocar asma alérgica⁵, rinitis alérgica, dermatitis de contacto y conducir a la anafilaxis. (Vogel, Morelo Dal Bosco y Juárez Ferla 2015)

No es posible eliminarlos totalmente, pero se pueden controlar si se mantienen unas condiciones de temperatura adecuada y en las que se disminuya la humedad excesiva.

Con respecto al otro tipo de contaminantes, según la EPA un 72% de la exposición en interiores es a químicos y se estima que más del 20% de europeos sufre asma y alergias causadas por sustancias presentes en ambientes interiores. (European Commission 2003)

Está comprobado que los riesgos son difíciles de evaluar, por ello se necesita de un consenso científico y una participación multidisciplinar que tenga como base los conocimientos de las relaciones entre el edificio y usuario —el sistema constructivo, materiales, estructura, mobiliario, ambiente exterior, dosis, tiempo de exposición, sensibilidad del usuario, usos, etc.— y las evidencias en cuanto a la salud y biología del ser humano. Es lo que Elisabet Silvestre⁶ denomina Biohabitabilidad, la disciplina que diseña soluciones constructivas más biocompatibles con los parámetros de la biología humana para promover espacios más saludables.

Puesto que una construcción sostenible disminuye la presencia de formas físicas, químicas, biológicas y los riesgos que puedan asociarse a ellas, este trabajo se va a centrar en las estrategias pasivas que se pueden implementar en arquitectura para mejorar la salud respiratoria y conseguir un ambiente saludable.

⁵ Asma alérgica es aquella que aparece en relación con la exposición a sustancias alérgicas como el polen de las plantas, los ácaros del polvo o el pelo de animales como perros y gatos.

⁶ Elisabet Silvestre es doctora en biología, experta en bioconstrucción y especialista en biohabitabilidad y salud ambiental.

4. OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es el de conocer cómo mejorar el ambiente interior a través de medidas pasivas y que así ayuden a reducir afecciones respiratorias.

Los objetivos específicos son:

- Conocer los criterios de la calidad de aire interior y su normativa.
- Saber cómo se produce la contaminación del aire interior y cómo afecta a la salud.
- Analizar la importancia del clima y el lugar —húmedo y con alta presencia de viento—.
- Plantear cómo se puede comprobar que la calidad de aire interior es la adecuada.
- Comprender los precedentes pasivos en la arquitectura vernácula.
- Estudiar las estrategias pasivas en arquitectura para un interior saludable y sostenible.
- Realizar una comparación y viabilidad sostenible de las estrategias.

5. MÉTODO

En primer lugar, se estudiarán los criterios que se establecen para una calidad de aire interior adecuada para un ambiente saludable.

Dependiendo de la ubicación y el clima donde esté situada nuestra vivienda, afectan una serie de condicionantes u otros, por lo que se analizará el clima concreto para el caso. Se tomará como población de estudio la arquitectura en costa o en lugares con gran cantidad de humedad y viento.

Se relacionará la arquitectura popular y la construcción sostenible con la salud como mejora al modo de vida.

Se verán las medidas pasivas que se pueden aplicar en arquitectura —características higroscópicas de materiales, procesos fotocatalíticos en pinturas o pavimentos, actuación de la ventilación y climatización sin consumo de energía— además de analizar los sistemas activos que se plantean como sostenibles con el medio ambiente.

Se considerará la viabilidad de las diferentes estrategias para definir un ambiente saludable y poder comprobar la calidad de aire.

Con estos datos se llegarán a unas conclusiones y a unas futuras líneas de investigación.

A continuación, se describe de manera gráfica [Fig. 5] el proceso de la metodología para poder realizar el trabajo.

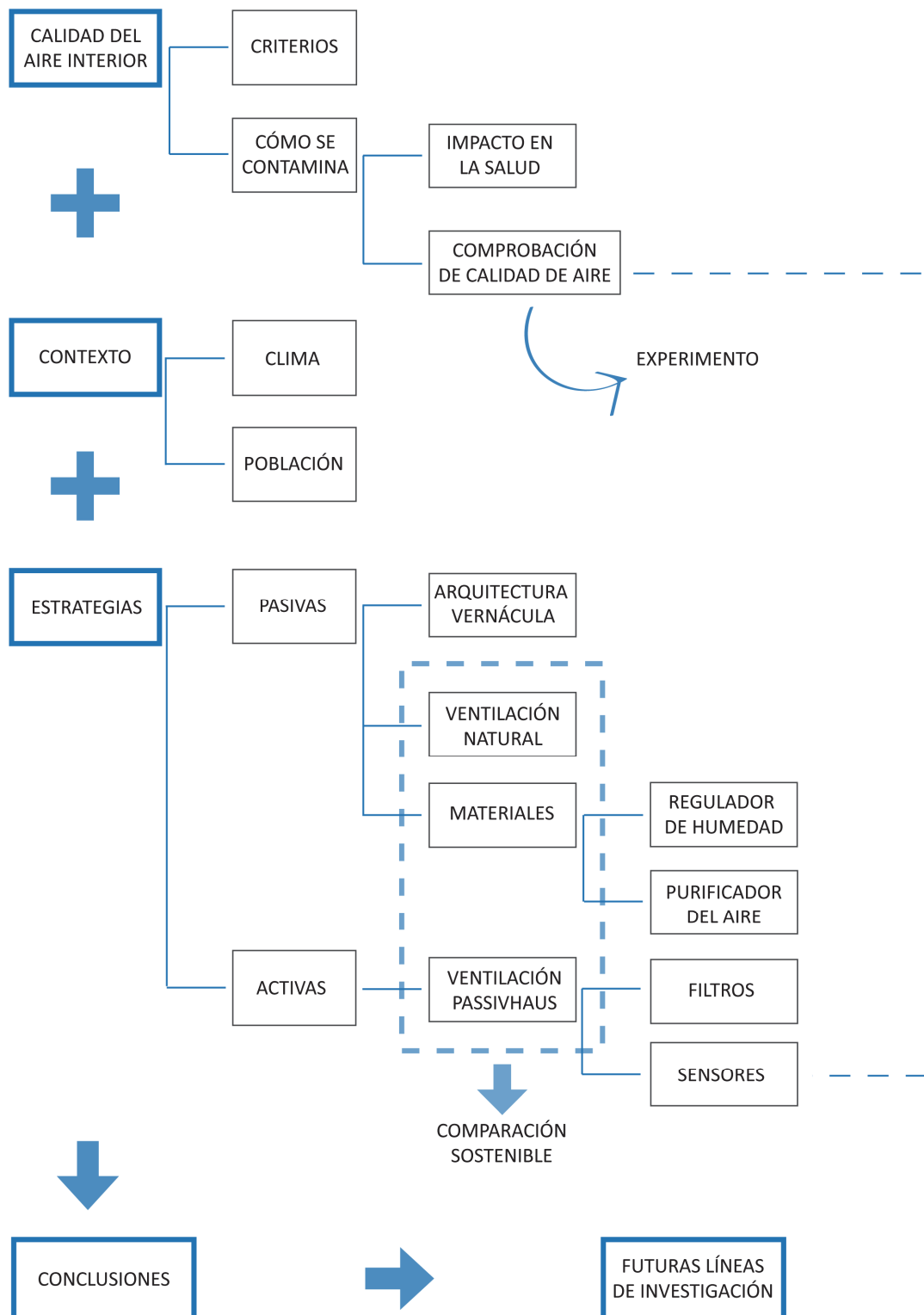


Figura 5. Esquema gráfico del proceso metodológico utilizado. Fuente: elaboración propia (2019)

6. ESTADO DEL ARTE

6.1 DEFINICIÓN DE CALIDAD DE AIRE

Se define la calidad de ambiente interior (CAI) como «el conjunto de condiciones ambientales del espacio interior; es decir, los niveles de contaminación microbiológica, química y física que rodean a las personas, que no perturban las capacidades de los usuarios, que no afectan adversamente su salud y sobre todo que promueven su bienestar» (Silvestre 2014)

La calidad de aire interior de un edificio depende de varios agentes como la calidad del aire exterior, el diseño de los sistemas de ventilación, de climatización y las fuentes interiores de contaminantes cuyas concentraciones suelen variar espacial y temporalmente más que las del exterior.

6.2 EXIGENCIAS NORMATIVAS RELACIONADOS CON LA CALIDAD DE AIRE INTERIOR

Hay varias normativas nacionales aplicables para garantizar la calidad de la misma.

Por un lado, existe una normativa técnica constituida por:

o El **Código Técnico de la Edificación (CTE)** con su Documento Básico relativo a la salubridad (DB-HS) en el que se establecen requisitos referidos a la calidad de aire interior.

La norma establece los requisitos para edificios de uso residencial y de uso terciario relativo a la calidad de aire interior de viviendas, almacenes de residuos, trastero, aparcamientos y garajes. Se fijan unos caudales mínimos de ventilación y unos criterios de diseño para el sistema de ventilación que varían según el tipo de estancia [Fig. 6] y [Fig. 7]

Tipo de vivienda	Caudal mínimo q_v en l/s				
	Locales secos ^{(1) (2)}			Locales húmedos ⁽²⁾	
	Dormitorio principal	Resto de dormitorios	Salas de estar y comedores ⁽³⁾	Mínimo en total	Mínimo por local
0 ó 1 dormitorios	8	-	6	12	6
2 dormitorios	8	4	8	24	7
3 o más dormitorios	8	4	10	33	8

(1) En los *locales* secos de las viviendas destinados a varios usos se considera el caudal correspondiente al uso para el que resulte un caudal mayor

(2) Cuando en un mismo *local* se den usos de *local* seco y húmedo, cada zona debe dotarse de su caudal correspondiente

(3) Otros *locales* pertenecientes a la vivienda con usos similares (salas de juego, despachos, etc.)

Figura 6. Caudales mínimos de ventilación en locales habitables. Fuente: <https://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/salubridad/DBHS.pdf>

Locales	Caudal mínimo q_v en l/s	
	Por m^2 útil	En función de otros parámetros
Trasteros y sus zonas comunes	0,7	
Aparcamientos y garajes		120 por plaza
Almacenes de residuos	10	

Figura 7. Caudales mínimos de ventilación en locales no habitables. Fuente: <https://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/salubridad/DBHS.pdf>

o El **Real Decreto 1027/2007**, de 20 de julio, que aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios y el Real Decreto 238/2013, de 5 de abril, por el que se modifica determinados artículos del RITE.

En él se indican las condiciones termo-higrométricas necesarias para el ambiente interior del edificio, así como las necesidades en eficiencia energética y seguridad que deben cumplir las instalaciones térmicas y de ventilación; estableciendo requisitos de calidad de aire interior [Fig. 8], complementando así la sección HS3 del documento básico de salubridad del CTE.

Categoría	Caudal de aire exterior por persona (L/s)		Categoría	Concentración de CO₂ (ppm)	
	Rango	Valores por defecto		Rango	Valores por defecto
IDA 1	> 15	20	IDA 1	≤ 400	350
IDA 2	10 ... 15	12,5	IDA 2	400 ... 600	500
IDA 3	6 ... 10	8	IDA 3	600 ... 1.000	800
IDA 4	< 6	5	IDA 4	> 1.000	1.200

Figura 8. Caudales de ventilación y concentración de CO₂ en locales según la categoría del ambiente interior. Fuente: https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10540_Comentarios_RITE_GT7_07_2200d691.pdf

A través de la institución AENOR, se distinguen una serie de normas UNE aplicables:

o Norma **UNE 171210-2008. Calidad ambiental en interiores. Buenas prácticas en los planes de desinsectación y desratización**, que se aplica en ambientes interiores y en el área de influencia exterior de las instalaciones interiores.

o Serie de normas **UNE 171330. Calidad ambiental en interiores**, compuesta por las siguientes:

- o **UNE 171330-1:2008. Calidad ambiental en interiores. Parte 1 Diagnóstico de la calidad ambiental en interiores**; que establece una metodología para identificar la situación de partida del edificio.
- o **UNE 171330-2:2014. Calidad ambiental en interiores. Parte 2 Procedimientos de inspección de calidad ambiental interior**; en la que se detallan la metodología de ensayos en análisis y criterios de valoración.

- **UNE 171330-3:2010. Calidad ambiental en interiores. Parte 3 Sistema de gestión de los ambientes interiores;** que describe el sistema de gestión para el control de la calidad ambiental.

Se aplica a todo tipo de recintos, instalaciones y edificaciones excepto las destinadas a actividades industriales y agrícolas. En general, establece la metodología de identificación de la situación de partida, la metodología de ensayos en análisis y criterios de valoración, además de establecer el sistema de gestión para el control de calidad ambiental compatible con otros tipos de sistemas de gestión como las establecidas en la ISO 50001 de gestión de energía o en las ISO 14001 de gestión medioambiental.

- Norma **UNE 171340:2012. Validación y cualificación de salas de ambiente controlado en hospitales.**

- Norma **UNE 171370-1:2014. Amianto. Parte 1 Cualificación de empresas que trabajan con materiales con amianto.**

- Norma **UNE 100012:2005. Higienización de sistemas de climatización.**

- Norma **UNE 171212:2008. Calidad de aire interior: buenas prácticas en operaciones de limpieza.**

Define los sistemas, productos de limpieza y procedimientos para evitar contaminar el aire interior, ya que dependiendo del tipo de superficie se usará un determinado producto o procedimiento para no difundir en el aire interior partículas en suspensión.

- Norma **UNE-EN 15251:2008. Parámetros del ambiente interior a considerar para el diseño y la evaluación de la eficiencia energética de edificios incluyendo localización del aire interior, condiciones térmicas, iluminación y ruido.**

Se aplica la norma a edificios no industriales cuyos criterios se establecen por la ocupación humana. Se especifican varias categorías y se selecciona para el espacio que debe ser acondicionado en función de distintos requisitos, según tipo de edificio, ocupantes, tipo de clima o diferencias a nivel nacional.

- Norma **UNE-EN 18779:2018. Ventilación de los edificios. Parte 3: para edificios no residenciales. Requisitos de eficiencia para los sistemas de ventilación y climatización.**

- Norma **UNE-EN ISO 11890-1:2007 y UNE-EN ISO 1189-2:2013. Pinturas y barnices. Determinación del contenido de compuestos orgánicos volátiles;** que describen los dos métodos de determinación de concentraciones

- Norma **UNE-ISO 16000-6:2006. Aire de interiores. Parte 6. Determinación de compuestos orgánicos volátiles en aire de interiores y de cámaras de ensayo.**

- Norma **UNE-EN 717-1:2006. Tableros derivados de la madera. Determinación de la emisión de formaldehído.**

Por otro lado, existen las normas del Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST) relativas a la calidad de aire interior. Este organismo dependiente del Ministerio de empleo y seguridad social elabora unas Notas Técnicas de Prevención referidos al problema de la calidad de aire interior.

- NTP 243. Ambientes cerrados: calidad del aire.
- NTP 289. Síndrome del edificio enfermo: factores de riesgo.
- NTP 290. El síndrome del edificio enfermo: cuestionario para su detección.
- NTP 315. Calidad del aire: gases presentes a bajas concentraciones en ambientes cerrados.
- NTP 343. Nuevos criterios para futuros estándares de ventilación de interiores.
- NTP 380. El síndrome del edificio enfermo: cuestionario simplificado.
- NTP 431. Caracterización de la calidad del aire en ambientes interiores.
- NTP 521. Calidad de aire interior: emisiones de materiales utilizados en la construcción, decoración y mantenimiento de edificios.
- NTP 549. El dióxido de carbono en la evaluación de la calidad del aire interior.
- NTP 607. Guías de calidad de aire interior: contaminantes químicos.
- NTP 972. Calidad de aire interior: compuestos orgánicos y volátiles, olores y confort.

6.3 PRINCIPALES AGENTES Y SUS EFECTOS EN LA SALUD

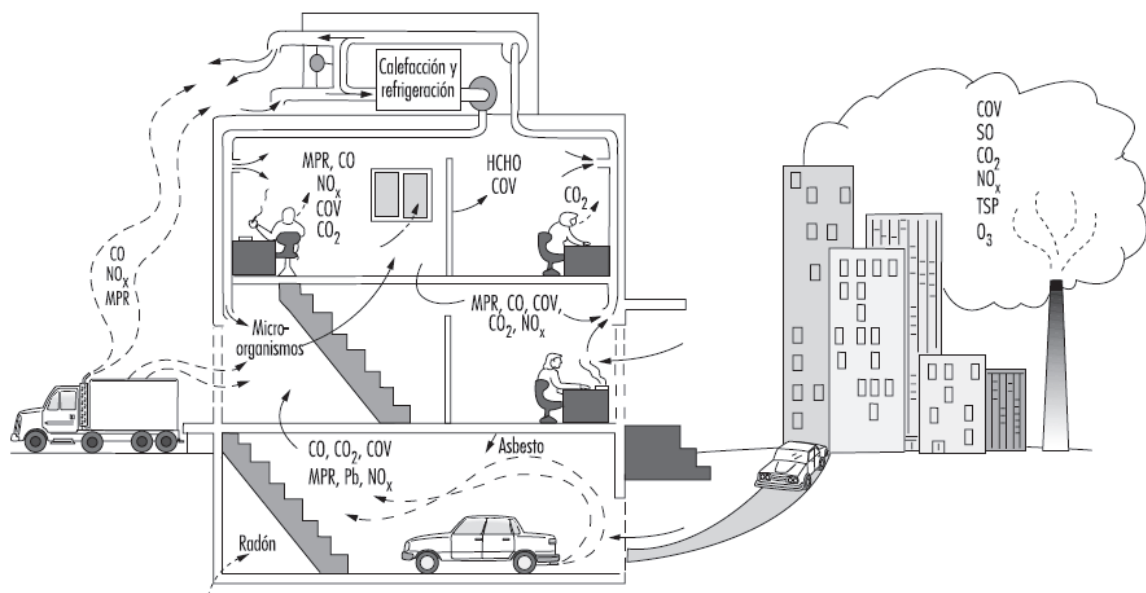
No hay un único factor que incida en la modificación de la calidad de aire interior, sino que los implicados son varios, clasificados en numerosos estudios según su origen de tipo físico, químico y biológico [Tabla 1].

FACTORES QUE MODIFICAN LA CALIDAD DE AIRE INTERIOR	FÍSICOS	Temperatura Humedad relativa Ventilación Acústica (ruido y vibraciones) Iluminación Electricidad estática Campos eléctricos alternos Campos electromagnéticos
	QUÍMICOS	Humos de contaminación Compuestos orgánicos volátiles Compuestos orgánicos persistentes Metales pesados Gases Olores

	BIOLÓGICOS	Moho Bacterias Parásitos Virus Ácaros Hongos Polen Pelos de mascotas
--	------------	---

Tabla 1. Factores que afectan la calidad de aire interior. Fuente: elaboración propia, 2019.

La contaminación ambiental se compone de una mezcla de sustancias de diferentes características que varían según la zona geográfica, zona de estudio, interior o exterior [Fig. 9], estación del año o incluso variaciones a lo largo del día.



CO = monóxido de carbono; CO₂ = dióxido de carbono; HCHO = formaldehído; NO_x = óxidos de nitrógeno; Pb = plomo; MPR = materia particulada respirable; COV = compuestos orgánicos volátiles.

Figura 9. Diagrama de edificio con fuentes de contaminantes de interior y de exterior. Fuente: <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo2/44.pdf>

Su concentración puede variar desde que se origina la contaminación, ya que parte de los contaminantes se pueden eliminar a través de procesos de autodepuración por deposición, precipitación y absorción por el suelo, el agua y la vegetación.

Esto puede provocar una acumulación de contaminantes en la vegetación, en suelos, ríos, lagos o en las aguas subterráneas, transportando la polución a otro sitio. Por otro lado, la acumulación de contaminantes en la atmósfera puede mezclarse con las masas de aire y ser trasladada a varios kilómetros, provocando niveles de contaminación lejos del lugar de origen.

Efectos sobre la salud

De forma habitual, las vías de interacción de un agente tóxico con el organismo son la inhalación, el contacto, la ingestión y los procesos inductivos:

- Inhalación de monóxido de carbono, humo de tabaco, gas radón, etc. afectando principalmente al sistema respiratorio.
- Contacto, a través de piel y mucosas que se pueden ver afectadas por los productos químicos de limpieza o radiaciones.
- Ingesta de alimentos o agua en malas condiciones.
- Inducción en piel, tejidos y órganos internos a causa de campos eléctricos alternos y electromagnéticos.

Es cierto que ante un mismo factor de riesgo, no todos los organismos reaccionan de la misma manera: depende de la dosis, el tiempo de exposición, la naturaleza del tóxico, la sensibilidad de la persona, el pertenecer o no a un grupo de riesgo, la edad, sexo, la combinación con otras sustancias, la exposición a dos o más agentes distintos, etc. (Silvestre 2014)

Además, teniendo en consideración esa variabilidad en la respuesta biológica ante exposiciones a dosis bajas de tóxicos, ciertas personas pueden responder con desequilibrios muy altos, como si estuvieran expuestos a dosis mucho más elevadas, lo que se denomina hipersensibilidad excesiva.

Todos estos parámetros se deben tener en cuenta para determinar los efectos a corto y largo plazo.

Centrando los posibles efectos en un ambiente interior, los contaminantes se dispersan y pueden depositarse en la epidermis, introducirse en el tracto respiratorio, afectar a las mucosas y, en algunos casos, pueden ser absorbidos y acumularse en los tejidos y órganos internos. Una exposición prolongada a interiores con contaminantes elevados puede producir cefaleas, irritación de ojos y garganta, mareos, fatiga, piel seca, náuseas, congestión nasal y tos. Además, pueden aparecer síntomas psicológicos producidos por esa mala calidad de aire como estrés, irritabilidad o cambios de ánimo, afectando de manera negativa al usuario. (Álvarez Díaz 2017)

FACTORES FÍSICOS Y SUS EFECTOS SOBRE LA SALUD

Las condiciones ambientales que establece el RITE como valores de confort se sitúan en una **temperatura** operativa de 21-23 °C en invierno y 23-25 °C en verano, siendo la humedad relativa correspondiente del 40-50% en invierno y 45-60% en verano.

El valor más generalizado para la **humedad relativa** ideal se establece entre el 40 y 60% [Fig. 10], ya que a partir de humedades de más del 70% se favorece el crecimiento de hongos y agentes microbiológicos mientras que menos del 30% se produce la sequedad de las mucosas.

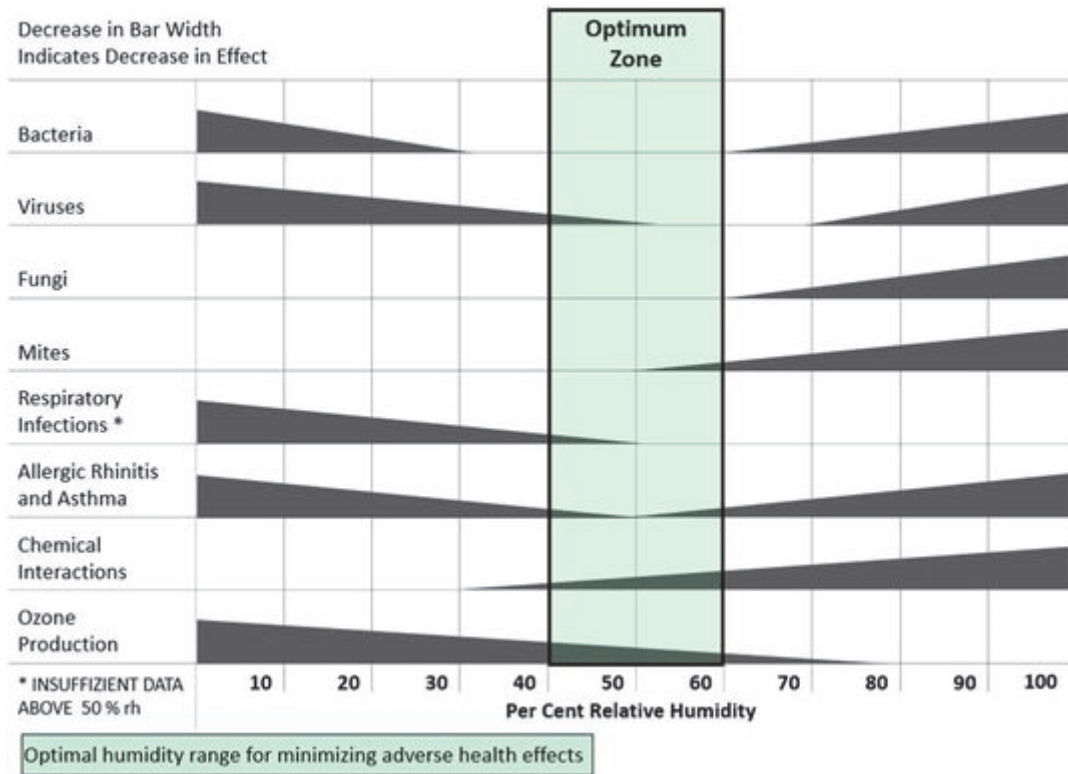


Figura 10. Rango óptimo de humedad relativa en interior de edificios. Fuente: <https://www.humidification.com/humidity-health-wellbeing/scientific-studies/criteria-for-human-exposure-to-humidity-in-occupied-buildings>

La **ventilación** insuficiente es una de las causas más frecuentes del SEE y como se ha visto en las normativas anteriores, se deben aplicar los aportes mínimos de 4 a 20 l/s por persona.

Hay que considerar que los contaminantes del aire interior tienen menos oportunidades de diluirse que las emitidas en el aire exterior a causa de la diferencia de volumen de aire. (Guardino 1998)

Por ello se debe realizar una ventilación adecuada que, según la Norma UNE-EN 15665:2009 de ventilación de edificios, se establecen unos criterios de rendimiento para los sistemas de ventilación residencial con los objetivos de:

- La dilución y/o retirada de los contaminantes de fondo (CO_2 metabólico, vapor de agua (H_2O), compuestos orgánicos volátiles (TVOCs), formaldehído (HCHO), amoníaco (NH_3) ...)
- La dilución y/o retirada de contaminantes específicos de fuentes locales (materia particulada, olores...)

- *La provisión de aire exterior para los ocupantes.*
- *La provisión de control sobre los efectos de la temperatura (sobrecalentamiento y corrientes de aire)*
- *La provisión de aire para los aparatos de combustión.* (Rodríguez Trejo 2016)

Con respecto al **ruido** ambiental, puede provocar distracción e incluso situaciones de estrés. Además, cada vez se asocian más efectos nocivos en la salud respiratoria, clasificando su impacto como de riesgo medio-alto (Recio et al. 2016). De este modo se establecen las exigencias básicas de protección frente al ruido con el DB-HR del CTE, así como la UNE-EN 15251 que considera parámetros referentes al ruido para un ambiente interior, aconsejando un nivel límite en 65 dbA en actividad normal y 55 dbA si se requiere un nivel de concentración.

FACTORES QUÍMICOS Y SUS EFECTOS SOBRE LA SALUD

Para centrarse en el estudio de la calidad de aire interior se muestran a continuación los principales contaminantes [Tabla 2] que se introducen en el ambiente interior desde el exterior o bien se generan dentro del propio edificio. Pueden encontrarse en forma de partículas, gases y vapores inorgánicos y orgánicos.

PRINCIPALES CONTAMINANTES	DE EXTERIOR	Partículas PM ₁₀ Partículas PM _{2,5} Ozono Dióxido de sulfuro Dióxido de nitrógeno Monóxido de carbono Plomo
	DE INTERIOR	Partículas finas Monóxido de carbono Hidrocarburos aromáticos policíclicos Óxidos de nitrógeno Óxidos de sulfuro Arsénico Flúor Compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles Aldehídos Pesticidas Asbestos

		Plomo Contaminantes biológicos Radón Radicales libres y otros compuestos altamente reactivos
--	--	---

Tabla 2. Principales contaminantes de exterior e interior. Fuente: modificado de (Jiang, Mei y Feng 2016)

Las sustancias consideradas por la OMS en 2010 como químicos comúnmente presentes en el aire interior son el benceno, monóxido de carbono, formaldehídos, naftaleno, dióxido de nitrógeno, hidrocarburos aromáticos policíclicos, el radón, el tricloroetileno y el tetracloroetileno, cuyas fuentes internas generan peligro para la salud. (OMS 2010)

Sin embargo, para enfocar la investigación en aquellos contaminantes que afectan a la respiración causando asma, se presentan las fuentes más relevantes y comunes resumidas en el proyecto REVIHAAP [Tabla 3], base de estudio de varios investigadores para conocer los efectos de la contaminación ambiental en el aparato respiratorio.

CONTAMINANTE	FUENTE DE CONTAMINANTE
PM _{2.5} PM ₁₀	Uso de combustibles sólidos, velas
OZONO (O ₃)	Impresoras láser, purificadores de aire electrostáticos, ozonizador
DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO ₂)	Aparatos de gas mal ventilados
MONÓXIDO DE CARBONO (CO)	Aparatos de combustión mal ventilados o utilizados de forma no adecuada
DIÓXIDO DE AZUFRE (SO ₂)	Quema de carbón residencial, calentadores y lámparas de parafina
BENCENO	Garajes, solventes en algunos compuestos químicos de uso doméstico
BENZOPIRENO	Uso de combustibles sólidos
NAFTALENO	Bolas de alcanfor, impermeabilizantes, uso de combustibles sólidos

ARSÉNICO	Pinturas antiguas, polvo
CADMIO	
NÍQUEL	
PLOMO	

Tabla 3. Principales fuentes contaminantes del aire interior. Fuente: modificado de (OMS 2013)

A parte, el **dióxido de carbono (CO₂)** es el gas que cumple las características para ser gas trazador y poder establecer caudales y fugas en la envolvente, así como para determinar la calidad ambiental interior ya que está demostrada su presencia junto con bioefluentes y sustancias que deterioran la percepción del ambiente. Por esto muchas normas y guías toman de referencia el CO₂ metabólico como indicador de referencia de calidad de aire interior en entornos donde las emisiones de los usuarios sean las principales fuentes de contaminación. (Rodríguez Trejo 2016)

Por otro lado, diferentes estudios demuestran el aumento de síntomas de asma por la exposición de los seis primeros componentes de la Tabla 3. Tanto en niños, adolescentes o adultos los resultados son similares; exposiciones a niveles elevados de PM_{2,5}, PM₁₀, O₃, NO₂, CO y SO₂ provocan más riesgo de hospitalización por asma. (Strickland et al. 2010) (Samoli et al. 2011) (Zheng et al. 2015) Además, diversos autores refieren también la exposición al benceno, a los hidrocarburos aromáticos policíclicos y a los compuestos orgánicos volátiles, sobre todo en niños y adolescentes, como una causa del aumento de los síntomas del asma. (Jedrychowski et al. 2014) (Buchdahl et al. 2000)

A pesar de la relación que existe entre ellos, a continuación, se describen de manera individual las fuentes, el comportamiento y el efecto que pueden provocar a la salud humana los citados agentes químicos.

El **material particulado (PM)** es muy representativo de la contaminación del aire, los principales componentes son los sulfatos, los nitratos, el amoníaco, el cloruro de sodio, el hollín, los polvos minerales y el agua. Esta mezcla de partículas sólidas y líquidas queda suspendida en el aire pudiendo introducirse en el interior de edificios sin ningún impedimento.

Las partículas son emitidas por la quema de combustibles fósiles y de biomasa, por las emisiones de tráfico, la oxidación de COVs o del polvo acumulado en las carreteras debido a vehículos y a la construcción; aunque la principal fuente de PM en medio urbano son los motores diésel. (Jiang, Mei y Feng 2016)

La composición varía según la zona geográfica, así como el tamaño, clasificándose en PM₁₀ aquellas con un diámetro de 2,5-10 μm ⁷, PM_{2,5} las de diámetro de 0,1-2,5 μm y las partículas ultrafinas (PUF) de tamaño inferior a 0,1 μm .

PM₁₀ suelen ser de origen natural derivados del suelo y otros materiales de la corteza (Liu et al. 2016). La mayor emisión de esta partícula tiene su fuente principal en actividades del

⁷ μm : micrones de metro (milésima parte de un milímetro o millonésima parte de un metro)

interior, siendo el exterior portador de menos del 25% de los niveles recogidos en el interior. (Morawska et al. 2017)

PM_{2,5} tienen su origen principal en procesos de combustión del transporte, en fábricas y plantas productoras de energía, así como en reacciones en la atmósfera. Su impacto en la salud es mayor, puesto que son más pequeñas que las PM₁₀, son más activas, están más tiempo en suspensión en la atmósfera, alcanzan mayores distancias y pueden transportar más fácilmente las sustancias nocivas como metales pesados o gérmenes. Son responsables del 40-70% de los niveles interiores.

El origen exterior de las **PUF** suele ser el tráfico y las plantas de producción de energía; pero predominan más en interior (Morawska et al. 2017), siendo las fuentes de origen las que se muestran en la tabla 4, como las impresoras y fotocopiadoras (Gaffin et al. 2018), productos de cocinado, calefacción, quema de madera o incluso la nanotecnología. (Liu et al. 2016)

FUENTES DE INTERIOR	Quema de velas de cera	24×10^4	CONCENTRACIÓN (p/cc)⁸
	Tabaco (10 min)	21×10^4	
	Freír carne (45 min)	15×10^4	
	Ambientador en spray (20 g)	3×10^4	
	Usar la aspiradora (50 min)	2.1×10^4	
	Estufa de propano	7.9×10^4	
	Radiador eléctrico	22×10^4	
	Estufa eléctrica	11×10^4	
	Calefactor eléctrico	12×10^4	
	Planchar tejidos de algodón	0.055×10^4	
	Usar secadora de ropa a gas	10×10^4	
	Imprimir (10 min)	$10^8 - 10^{12}$	

Tabla 4. Fuentes de emisión de PUF en interior. Fuente: modificado de (Li et al. 2016)

En general, contribuyen al desarrollo de enfermedades cardiovasculares y respiratorias, así como cáncer de pulmón. (OMS 2018a)

⁸ p/cc: partículas/cm³

El **ozono (O₃)** a nivel de suelo se forma por la reacción con la luz solar de los contaminantes NO_x y los COV que proceden de vehículos, disolventes y la industria, siendo el origen exterior principalmente el responsable de la concentración en interiores. Puede ocasionar asma, reducción de la función pulmonar y causar diversos problemas respiratorios. (OMS 2018a)

El **óxido de nitrógeno (NO_x)** procede de procesos de combustión siendo los motores diésel los emisores más importantes, generando NO y NO₂. El **dióxido de nitrógeno (NO₂)** es originado por los motores de combustión y por las centrales térmicas; en interior se produce por procesos de combustión en calefacción, estufas de gas y de calderas sin buenos sistemas de ventilación; aunque el NO₂ de interior generalmente tiene su origen en el exterior. Puede ocasionar irritación de ojos, nariz y garganta y dificultad para respirar, aumentando síntomas de bronquitis y una disminución del desarrollo de la función pulmonar. (OMS 2018a)

El **monóxido de carbono (CO)** se produce cuando los combustibles que tienen carbono se queman en condiciones donde el oxígeno es limitado. La fuente principal en el exterior suele ser los motores de gasolina, el tráfico, las centrales eléctricas y las incineradoras de residuos, y en interior, las calderas de gas defectuosas, estufas de carbón o braseros y consumo de tabaco. Es incoloro, inodoro e insípido, por lo que puede ocasionar sin que la persona se dé cuenta: cefaleas, cansancio, náuseas, mareos, desorientación, ralentización del movimiento, falta de aire, incluso vómitos y palpitaciones.

El **dióxido de azufre (SO₂)** es un gas incoloro de olor penetrante, presente en la atmósfera en pequeñas cantidades. La fuente principal son los combustibles fósiles que tiene sulfuro, producido por calderas de queroseno o chimeneas donde se generan combustiones de carbón y petróleo. Lo habitual en la Unión Europea es que esas fuentes de interior de combustión de carbón o lámparas de parafina sean muy poco frecuentes (OMS 2013). Puede causar irritación ocular, además de provocar tos y secreción mucosa, y agravar los síntomas de asma y de bronquitis crónica, elevando la predisposición a adquirir enfermedades respiratorias. (OMS 2018a)

El **benceno** en ambientes interiores procede del exterior en un 80%. Principalmente son del tráfico, aunque también de gasolineras o industria relacionada con el carbón, petróleo, gas natural, acero o productos químicos. Las fuentes de interior son los materiales de construcción, garajes que albergan el vapor de combustibles de vehículos y productos químicos de hogar, plásticos, disolvente y pinturas. También el uso de estufas y biocombustibles de baja eficiencia, calefacción sin ventilación y la quema de incienso. La inhalación puede provocar dolor de cabeza, mareo, insomnio, náuseas, fatiga y desmayos. A niveles elevados puede producir diferentes síntomas neurológicos, efectos hematológicos e inmunológicos. (OMS 2010)

Los **hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)** pueden presentarse en forma de vapor (naftaleno) o como partículas (benzopireno). Son contaminantes que se forman en el proceso de combustión de materiales carbonosos a alta temperatura. Las mayores fuentes en interior provienen de la calefacción con estufas de combustible, de chimeneas abiertas, de cocinas de combustible fósil, así como del incienso, emisiones de velas y del humo de tabaco. En el exterior se presentan en el transporte con motores de gasolina, la industria de aluminio, carbón y acero y de las incineradoras de residuos. Su inhalación aumenta el riesgo de padecer, entre otras enfermedades, bronquitis y asma. (OMS 2010)

Dentro de los contaminantes químicos, los **COV** son de especial importancia puesto que, aun teniendo una gran presencia en los ambientes interiores —en un ambiente no industrial pueden llegar a estar presentes entre 50 y 300 COV (INSST 2013)— son los contaminantes menos estudiados y, por tanto, de los que se limitan los efectos negativos que causan en la salud.

Tienen en común su base química de carbono y se caracterizan por la capacidad de volatilizarse, de forma más o menos rápida en el aire, en estado gaseoso a temperatura ambiente. Pueden ser adsorbidos por las superficies y liberarse más tarde por las mismas, prolongando su estancia en el interior. Las fuentes de emisión pueden ser de origen natural o de origen humano, de las que destacan las emisiones de los compuestos a partir de materiales de construcción, de decoración, productos de limpieza, humo de tabaco y actividades internas o externas, como se refleja en la tabla siguiente [Fig. 11]

Aire exterior	Materiales de construcción	Productos de consumo	Actividades
Industrias Tráfico Garajes adyacentes Plantas de producción de energía Refinerías Incineradoras Plantas de tratamiento de residuos	Maderas Espumas Recubrimientos de paredes Recubrimientos de techos Recubrimientos de suelos Productos de sellado Papeles de pared y colas de empapelado Masillas	Pinturas, barnices y ceras Plásticos Disolventes Alfombras y moquetas Fibras textiles Pesticidas Repelentes de insectos Productos de limpieza Cosméticos Ambientadores Antipollas Muebles	Humo de tabaco Climatización Cocinar Limpiar Manualidades Actividades profesionales

Figura 11. Fuentes de COV más frecuentes en el aire interior de edificios. Fuente: <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/NTP/NTP/Ficheros/961a972/972w.pdf>

Por otro lado, estos contaminantes son responsables de los olores o malos olores percibidos por los usuarios, generando situaciones de disconfort y afectando al estado de ánimo.

El **formaldehído (HCHO)** es un compuesto orgánico volátil pero sus efectos son tan notorios y es tan frecuente su presencia en ambientes interiores que se debe tratar de manera individual. Es el más simple del grupo de los aldehídos y tiene un olor acre muy característico, es soluble en agua y, aunque su ingestión no es un problema sanitario, sí se considera contaminante como partícula en el aire de respiración. (Rodríguez Trejo 2016)

Está presente en productos y en procesos de fabricación de plásticos, medicamentos, telas, cosméticos y detergentes (OMS 2009) así como de mobiliario, materiales de acabado interior y maderas aglomeradas y contrachapadas. Además de tener como fuente de emisión el tabaco, la calefacción, la cocina o la combustión de velas o incienso; las mayores fuentes son los materiales de construcción y productos de consumo. (Rodríguez Trejo 2016)

Los estudios realizados demuestran que los formaldehidos pueden provocar irritación de las membranas mucosas, de los ojos y de la piel y sequedad de las vías nasales, además de ser una gran mayoría sospechosos o comprobados CMR⁹.

FACTORES BIOLÓGICOS Y SUS EFECTOS EN LA SALUD

Este grupo de factores lo forman los microorganismos, fragmentos orgánicos y toxinas, bacterias, parásitos, virus, ácaros, hongos, polen, pelos, caspa, etc.

La exposición a estos agentes microbianos está asociada clínicamente con síntomas respiratorios, alergias, asma y reacciones inmunológicas. A pesar de la complejidad de la exposición, puesto que suele ser a múltiples agentes simultáneamente, se puede identificar que algunas alergias comunes se atribuyen a los agentes específicos como los ácaros del polvo y las mascotas. (OMS 2009)

El crecimiento de este tipo de contaminantes depende de las condiciones ambientales, es decir, de la temperatura, la humedad relativa, la luz y la renovación de aire de la estancia.

Por ejemplo, a una temperatura baja con una humedad alta se desarrollan los mohos; y a una temperatura alta con una elevada humedad puede aparecer la legionela.

Los contaminantes más importantes asociados a espacios interiores húmedos que afectan a la salud son los alérgenos, bacterias, endotoxinas, micotoxinas, compuestos orgánicos volátiles microbianos y virus. A pesar de que cualquier agente puede inducir una respuesta inmune específica, resultando un posible alérgeno, en ambientes interiores los más relevantes son los alérgenos de los ácaros del polvo doméstico y los alérgenos fúngicos. (OMS 2009)

Los **ácaros del polvo doméstico** (*Dermatophagoides*) son unos artrópodos de tamaño inferior a 0.3mm que suelen acumularse en las cortinas, la tapicería, en el colchón, las almohadas, la ropa de cama, peluches y alfombras. Las especies más relevantes en la vivienda son *D.pteronyssinus* y *D.farinae* que crecen en ambientes con humedad superior a 70% y a una temperatura de 25°C, alimentándose sobre todo de restos de piel muerta. Su población aumenta significativamente en zonas costeras debido a la elevada humedad y el efecto modulador de las temperaturas del mar. (SEAIC 2017)

Los **hongos** son organismos que reciclan partes de los desechos orgánicos, transformando la materia muerta y devolviendo al medio ambiente sustancias que pueden asimilar otros seres vivos como plantas o animales.

Se originan a partir de esporas, pequeñas células que, en condiciones adecuadas de temperatura, humedad, luz y nutrientes básicos, germinan. En el proceso se genera una estructura de filamentos que se ramifican y forman una masa algodonosa llamada micelio que se extiende sobre el medio o la superficie. Así, los hongos pueden generar y emitir al aire millones de esporas por minuto. Pueden ser transportados por el aire exterior el cual contiene polen, esporas fúngicas o bacterias; por el aire recirculado del interior del edificio o por el agua destinada a humedecer ese espacio interior.

⁹ CMR: cancerígenos, mutagénicos y/o tóxicos de la reproducción.

En los edificios se dan las situaciones idóneas para la generación de hongos [Tabla 5] ya que es un soporte orgánico, contiene una humedad mayor del 70% durante 12-24h y puede tener sistemas y conductos de ventilación, climatización y aire acondicionado en malas condiciones higiénicas o de mantenimiento.

FUENTE	MICROORGANISMOS
Materiales aislantes Pinturas de pared/techo Papel de pared/techo Revocos de pared/techo	Hongos
Alfombras y otros textiles	Bacterias y hongos
Sistemas de agua caliente	Legionella
Polvo doméstico	Ácaros y hongos
Seres humanos	Bacterias y hongos
Sistemas de aire acondicionado	Bacterias, endotoxinas, hongos y amebas
Humidificadores	Legionella y hongos
Filtros de agua	Levaduras, hongos y bacterias
Lavadoras, lavavajillas, secadoras, frigoríficos	Levaduras, hongos, bacterias

Tabla 5. Origen de microorganismos en interior de edificios. Fuente:
<https://higieneambiental.com/sites/default/files/images/pdf/guia-cai-madrid.pdf>

Estas situaciones pueden estar provocadas por:

- Materiales con mala higroscopicidad que acumulan humedad y desarrollan hongos, especialmente si hay juntas al aire defectuosas.
- Materiales de obra nueva que no han secado lo suficiente.
- Humedad en cerramientos por causa de capilaridad.
- Fugas de agua.
- Puentes térmicos y condensaciones en materiales orgánicos y condiciones deficientes de ventilación y temperatura.
- Condensaciones intersticiales por la mala elección de los materiales del cerramiento.

- Mala calidad de filtros instalados y mal mantenimiento; así como limpieza deficiente de los equipos que pueden almacenar mohos.
- Falta de estanqueidad y suciedad acumulada en conductos de aire.
- Mal diseño y disposición de las bocas de extracción del aire exterior.

Los agentes biológicos pueden generar riesgo sanitario cuando están presentes en el ambiente interior en gran cantidad, de manera que, en condiciones óptimas de nutrientes, humedad y temperatura, pueden proliferar. (Higuero et al. 2016)

Un bioaerosol es aquella partícula transmitida por el aire que contiene contaminantes biológicos, por lo que se puede considerar que un ambiente interior tiene síntoma de contaminación microbiológica si contiene bioaerosoles que produzcan irritaciones, alergias, inflamaciones o enfermedades.

Cuando se inhalan las esporas de los hongos se producen los síntomas. Según la NTP 313, se establecen dos patologías referidas a los agentes biológicos:

- De tipo alérgico como el asma, rinitis, irritación de ojos, pneumonías, etc. referidas a distintos microorganismos.
- De tipo infeccioso como la enfermedad del legionario y la fiebre de Pontiac, provocadas por una bacteria legionela.

De hecho, cada vez hay más alergias derivadas de la exposición a contaminantes microbiológicos y además de generar afecciones en la salud de los usuarios, generan posibles daños en los materiales de construcción y en las instalaciones. Por lo que hay que dedicar atención a los factores causantes, para un buen diseño y poder evitar estos problemas.

6.4 ACCIONES ANTE LOS CONTAMINANTES

Dentro del ambiente de la vivienda, y como se ha indicado anteriormente, los problemas que se asocian a la calidad de aire interior dependen de varios factores, por lo que para obtener una solución concreta primero se tiene que realizar una inspección inicial del edificio y de sus instalaciones.

Dependiendo del tipo de edificio y de la información obtenida del análisis, se realizan las mediciones y comprobaciones adecuadas para aportar las acciones de corrección.

El aire exterior que se introduce a través del sistema de ventilación o por infiltraciones, está influenciado por la ubicación del inmueble. En los últimos años se ha ido reduciendo el número de infiltraciones debido al aumento de aislamiento en los edificios, pero los sistemas de renovación de aire atrapan microbios y hongos en los filtros de los conductos de ventilación pudiendo generar focos de emisión de partículas y de COV.

Ya se ha visto que los materiales de construcción como pinturas, disolventes, barnices, madera, textiles, recubrimiento de suelos, papel, productos de limpieza y materiales de

conservación pueden emitir COV, así como en ambientes profesionales el mobiliario y equipo de ordenadores, impresoras y fotocopiadoras.

Si no se pueden eliminar estas fuentes y concentraciones de COV, se pueden aplicar varios métodos como la filtración de la fase particulada del aire y la absorción de química —las más tradicionales para la mejora del CAI—, así como la oxidación fotocatalítica del aire. Aunque por viabilidad y sencillez son el uso de materiales y mobiliario con baja emisividad en acabados interiores y el aumento de renovación de aire para diluir los contaminantes. (Rodríguez Trejo 2016)

Ante los agentes microbiológicos se debe, primero realizar una comparación entre aire interior y exterior y saber qué tipología de agente contaminante está presente. Después se deben suprimir las fuentes, quitar y sanear los elementos afectados de las instalaciones, eliminar con medios mecánicos cualquier residuo que haya quedado para evitar futuras contaminaciones, teniendo en cuenta que el procedimiento de desinfección y saneamiento ha de acompañarse de unas condiciones de humedad —humedad relativa y humedad relativa superficial— y de temperatura —temperatura ambiente interior y exterior y temperatura superficial— adecuadas.

Una calidad de aire interior no consiste en conseguir espacios en condiciones de vida estéril y libre de gérmenes; sino de evitar que las esporas y venenos procedentes de fuentes del interior del espacio afecten a la salud del usuario. (Higuero et al. 2016)

Las medidas a tomar para eliminar los ácaros consisten en una ventilación eficaz y una iluminación natural: lo ideal es ventilar de forma natural eliminando o reduciendo al máximo los sistemas de ventilación mecánica —se puede implementar por medio de la propia estructura arquitectónica del edificio con patios o galerías internas y a través de las envolventes arquitectónicas— y que la estructura del edificio permita el paso de radiación solar a todos los espacios, de manera que se iluminen de forma natural y con la intensidad adecuada.

Los hongos se pueden eliminar con desinfectantes, pero las esporas pueden sobrevivir en ambientes con sequedad y humedad extrema, frío y calor. Se conservan durante años, vuelan y se adhieren al polvo, alfombras, superficies y, generalmente, un poco de humedad es suficiente para que puedan nacer nuevos hongos.

Lo fundamental es suministrar aire fresco, sin agentes microbiológicos, evitar acumular agua y suciedad estancada en los materiales y sistemas de climatización, garantizar la humedad relativa interior entre 40-60%, realizar un mantenimiento y limpieza de los sistemas de ventilación y climatización y promover el uso de materiales de construcción que regulen las condiciones de humedad. (Higuero et al. 2016)

6.5 MEDICIÓN DE LA CALIDAD DE AIRE

Según la directiva 2008/50/CE, 11 de junio 2008, se define contaminante como toda sustancia presente en el aire ambiente que pueda ser nocivo para la salud humana y el medio ambiente en su conjunto. La calidad de aire se valora según la concentración de esos contaminantes, de esas sustancias químicas y biológicas albergadas en el aire. Para ello se establecen unos valores

límite de concentración que no deben superarse, conocidos como parámetros límite de corto o largo plazo (STEL¹⁰ y TLV¹¹)

La primera tarea para analizar el CAI es tener la información del aire exterior, puesto que, como se ha leído en capítulos anteriores, el aire interior se ve condicionada por el exterior a causa de la ventilación, ya sea natural o forzada. Para ello se puede recoger la información de los medidores de calidad de aire exterior proporcionado por los ayuntamientos. Esto mismo es definido por el RITE como ODA¹², clasificando de 1 a 3, siendo 1 la mejor calidad y 3 la peor.

No obstante, en poblaciones pequeñas o rurales que no disponen de este tipo de medidores, hay que pensar en los elementos contaminantes del entorno como la vegetación, si hay industria cerca o no, si se trata de zona granítica, si hay focos de contaminantes en los patios de edificios —por ejemplo de calderas— o en el interior; al igual que parámetros como la humedad relativa y la temperatura, que influyen indirectamente.

Existen varios métodos y equipos en el mercado actual que ayudan a conocer la atmósfera interior de un edificio. A continuación, se exponen los tipos de medición según los agentes más comunes teniendo en cuenta las principales fuentes contaminantes del aire interior citadas en el apartado 6.3, adjuntando una tabla resumen de los valores límite de cada contaminante en el Anexo I.

Por un lado, están los métodos basados en lectura directa, en la que se toma una muestra de aire y se determina la concentración de contaminantes en el instante y, por otro lado, los métodos que toman muestras para realizar un análisis posterior. (Guardino 1998)

Los clasificados en la **lectura directa** pueden ser tubos coliométricos y monitores específicos.

Los **tubos coliométricos** basan el cambio de color de un reactivo al entrar en contacto con el contaminante. Normalmente se utiliza un reactivo sólido por el que se hace pasar el aire mediante una bomba. Es útil para determinar emisiones de forma esporádicas ya que tiene una sensibilidad baja.

En el caso de los **monitores específicos**, se detecta el contaminante a través de principios físicos, eléctricos, térmicos, electromagnéticos y quimio electromagnéticos. Se pueden determinar mediciones de corta o larga duración, la precisión viene determinada por el fabricante y necesita de una calibración periódica para asegurar su buena utilización.

- Medidor de **CO₂** y **CO**. [Fig. 12]

A través de sondas y medido en % o en ppm¹³ la concentración dependerá de la cantidad de personas que se encuentren en el interior del edificio y de la renovación de aire del mismo.

Según el INSST en ámbito laboral se establece un nivel máximo de 1.000 ppm de CO₂, sabiendo que a 600 ppm ya se notan ciertas molestias, somnolencia o ralentización del movimiento. En casos en que la concentración sea mayor se requiere un menor tiempo de exposición, por ejemplo, en garajes en los que se fija un valor máximo de 50 ppm. (Higuero et al. 2016)

¹⁰ STEL: Short-Term Exposure Limit.

¹¹ TLV: Threshold Limit Values.

¹² ODA: Outdoor Air Damper.

¹³ ppm: partes por millón.



Figura 12. Medidor de CO, CO₂, temperatura y humedad. Fuente: (Higuero et al. 2016)

- Medidor de **formaldehidos**. [Fig. 13]

Este tipo de monitores indican la información en tiempo real. Ante este gas se establece un valor óptimo 0 ppm ya que no existe legislación para regular la exposición a larga duración, aunque sí la hay para una exposición corta en la que el INSST establece un límite de 0,3 ppm para 30 min de exposición —ver Anexo I—. (Higuero et al. 2016)



Figura 13. Medidor de formaldehidos. Fuente: (Higuero et al. 2016)

- Medidor de **material particulado**. [Fig. 14]

La OMS establece unos umbrales para PM_{2.5} de 10 µg/m³ media anual y 25 µg/m³ media 24h. Y para PM₁₀ 20 µg/m³ media anual y 50 µg/m³ media en 24h. (Higuero et al. 2016) (OMS 2018a)



Figura 14. Medidor de partículas. Fuente: (Higuero et al. 2016)

Los sistemas para la **toma de muestra y el análisis** pueden ser activos o pasivos.

Dentro de los **activos**, se hace pasar el aire por un soporte que atrapa el contaminante. Consta de un captador, una bomba para el movimiento del aire y un sistema que mide el volumen de aire de la muestra. Por ejemplo:

- Medidor de otros compuestos como **metales o HAP**

Para este tipo de compuestos se utiliza la bomba de muestreo [Fig. 15]. Las mediciones de esta herramienta son llevadas a cabo por expertos y personal cualificado y que se basan en los límites de higiene industrial y la norma UNE 171330. Posteriormente, se llevan las muestras a un laboratorio para que sean analizadas. (Higuero et al. 2016)



Figura 15. Equipos para medición con bomba de muestreo. Fuente: (Higuero et al. 2016)

Los sistemas **pasivos** se basan en la difusión del contaminante sobre una base que puede ser un adsorbente sólido, ya sea solo o con un reactivo específico impregnado. Son más cómodos y sencillos que los anteriores puesto que no necesitan una bomba para la muestra, ni personal

muy preparado y la toma de muestra se puede realizar en tiempos largos, dando como resultados concentraciones medias.

Otra de las opciones con las que se cuentan actualmente es la del uso de la tecnología a través de **sensores**, elementos que permiten recoger información del entorno y lo envían a un sistema de control centralizado para una posterior actuación.

La monitorización de esos datos permite observar la situación de los posibles cambios que se pueden producir a lo largo del tiempo.

Para el caso de la monitorización de la calidad de aire se han desarrollado numerosas investigaciones que permiten el uso de sensores inalámbricos y redes de conexiones capaces de medir parámetros del aire.

A pesar de no ser objetivo del trabajo, se explora la opción de conocer la calidad del aire en el interior de una vivienda ubicada en la ciudad de A Coruña a través de un experimento con varios sensores. La descripción del ensayo se posiciona como capítulo final.

7. CONTEXTUALIZACIÓN

7.1 CLIMA

Se puede entender el clima como los fenómenos ambientales que actúan sobre los usuarios de un edificio y que influyen en su bienestar y percepción.

En general, los climas son muy variados y cambian según la época del año, incluso pueden variar en el día. Hay aspectos distintos dependiendo de si se trata de una región cálido-seca, una cálido-húmeda, una región fría o un clima templado. (Serra 1999)

Para delimitar los distintos tipos de clima se usa la clasificación de Köppen¹⁴. Según ella, dentro de climas templados tipo C; la denominación Csb —templado con verano seco y templado— es la que abarca la mayor parte del noroeste de la península [Fig. 16].

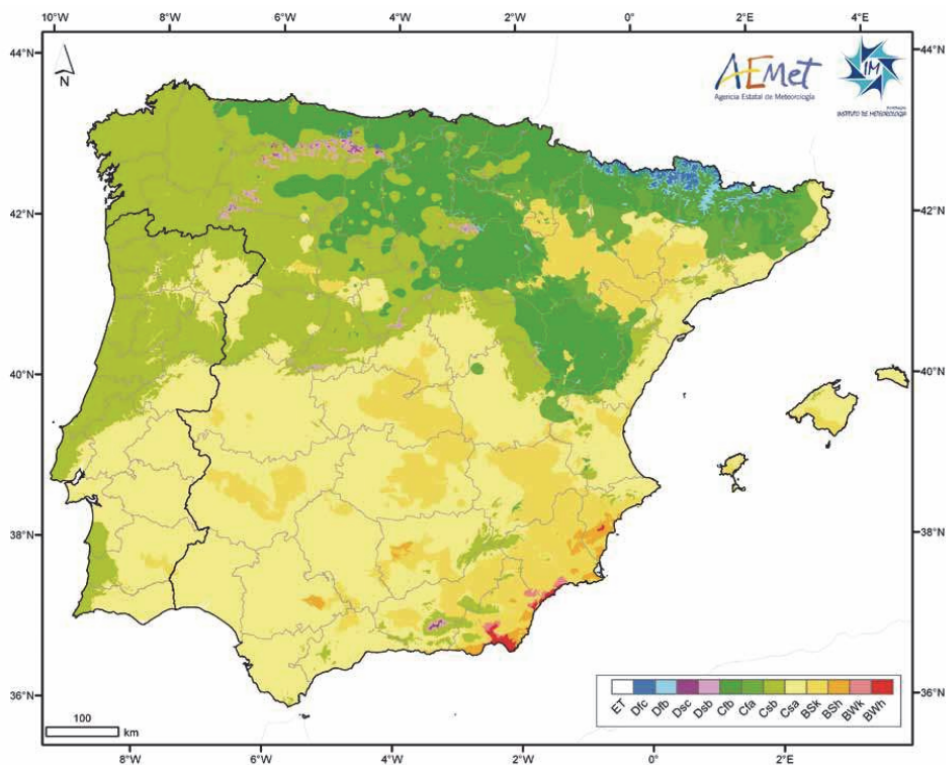


Figura 16. Clasificación climática de Köppen-Geiger de la península ibérica. Fuente: (AEMET, 2000)

Precisamente en ese clima templado se sitúa Galicia entre latitudes con exceso y con déficit de energía. Este emplazamiento provoca diversos procesos atmosféricos y oceánicos.

¹⁴ Clasificación de Köppen: creada en 1900 por Wladimir Peter Köppen, meteorólogo y científico que estableció la clasificación del clima natural mundial a partir de valores medios de precipitación y temperatura, identificándolos con una sucesión de letras.

Además de la ubicación, es importante destacar lo que varía el relieve del terreno ya que hay un continuo contraste del mismo desde la costa hacia el interior.

La forma recortada de la costa y las barreras montañosas próximas a ella, provocan que el sistema de nubes procedente del océano se dirija hacia el interior a través de las rías y ascienda forzosamente al llegar a las cordilleras, provocando las precipitaciones. Otro factor a tener en cuenta son las masas de aire marítima que llegan a Galicia y que son forzadas a elevarse ante los obstáculos montañosos, formando los vientos que soplan hacia el interior afectando a la temperatura y a la humedad de las zonas de costa, sobre todo en el sur, suavizando las temperaturas en verano. Las brisas marinas permiten que el aire fresco y húmedo se dirija hacia el interior donde contribuye a disminuir el contraste térmico y a aumentar la nubosidad.

El clima gallego es de tipo oceánico [Fig. 17], con una temperatura media de 14 °C y máxima de 37 °C y con humedad relativa del 74%. Aun así, se diferencian tres áreas —además de las zonas de transición entre éstas—: el litoral caracterizado por lluvias todo el año y temperaturas suaves, el área de interior que cuenta con menos lluvias y más frío en invierno, y por último el sur y sudeste donde el clima oceánico mediterráneo otorga inviernos suaves y veranos secos. (Caamaño Suárez 2006)



Figura 17. Dominios climáticos de Galicia, recogidos de Pérez Alberti. Fuente: (Caamaño Suárez 2006)

Puesto que se busca un área de clima que contenga humedad, se va a hacer una primera selección de la zona de estudio como la compuesta por el litoral de clima oceánico húmedo e hiper-húmedo.

Centrándonos en la parte de costa, que presenta diferentes orientaciones y características físicas, se puede hacer una clasificación atendiendo a las delimitaciones principalmente por la

existencia de cabos o puntas [Fig. 18]: la Mariña lucense, las Rías Altas, Golfo Ártabro, el Arco Bergantiñán, Costa da Morte, Rías Baixas y la Costa Sur.

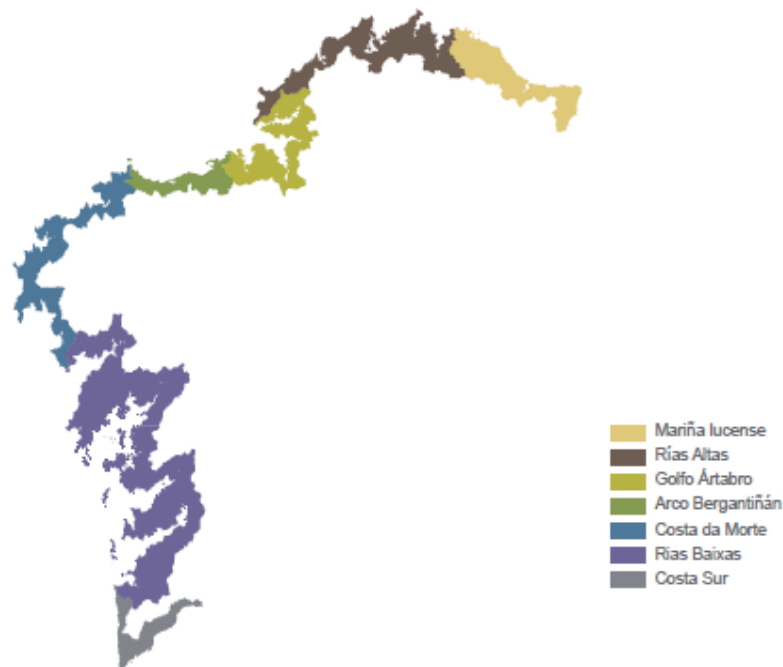


Figura 18. Comarcas costeras. Fuente: (Xunta de Galicia 2010)

Por otro lado, la delimitación climática de Galicia se puede presentar desde un punto de vista de diseño pasivo, de forma que la población de estudio que se va a seleccionar para este trabajo tendrá unas características climáticas clave en la elección de los criterios constructivos.

De acuerdo con la cualidad del clima que pueda influir más, surgen variables como la radiación solar, la continentalidad, la termicidad invernal, la estival, la inercia térmica y el viento.

Su cuantificación, facilitada en mapas en la Guía de arquitectura pasiva para viviendas en Galicia (2017), pueden relacionar las estrategias pasivas según la zona climática, por ejemplo:

Orientación: el requisito básico de orientar la construcción es que, en la parte opaca de la envolvente, en especial los huecos, se pueda tener una menor superficie expuesta en períodos de exceso de sol y una mayor superficie en los períodos de menos sol. Lo ideal es vincular la fachada mejor orientada a espacios de uso habitual y no a aquellos usos ocasionales.

Por lo que el mapa de la radiación solar [Fig. 19] advierte de la ganancia en energía solar que se puede obtener.

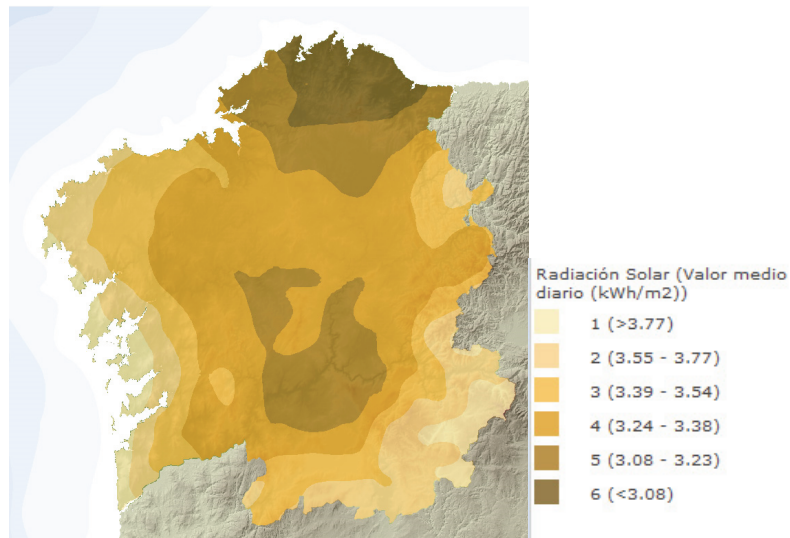


Figura 19. Valor medio diario de radiación solar (kWh/m²). Fuente: (Hábaco y IGVS 2017)

Continentalidad: cuantifica la amplitud térmica estacional.

Por lo que la solución constructiva de la envolvente deberá tener la capacidad de adaptarse a cambios entre las estaciones. El mapa de **continentalidad** [Fig. 20] sirve para conocer la mayor diferencia térmica entre verano e invierno.

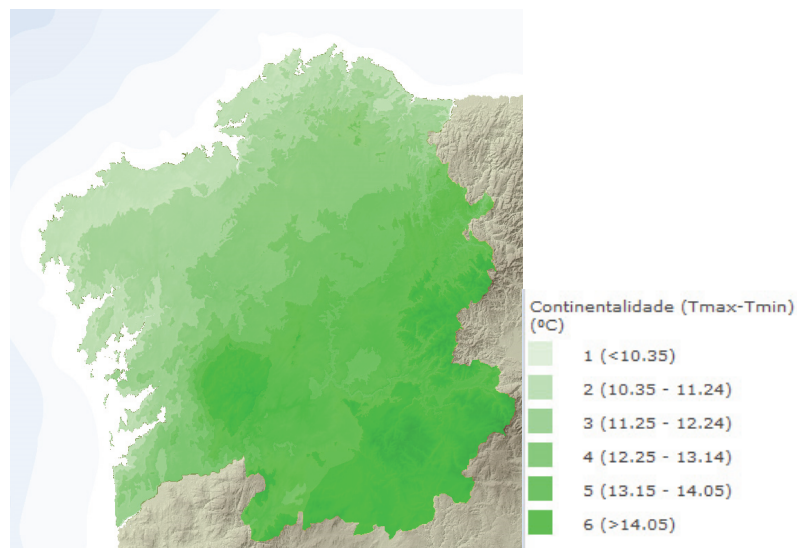


Figura 20. Valor medio anual de continentalidad (°C). Fuente: (Hábaco y IGVS 2017)

Compacidad: es la relación entre el volumen y la superficie de su envolvente. Este concepto se asocia a una menor pérdida energética.

La característica del clima en cuanto al índice de **termicidad invernal** [Fig. 21] indicando la intensidad de frío, indicará la mayor necesidad de compacidad y de *aislamiento*.

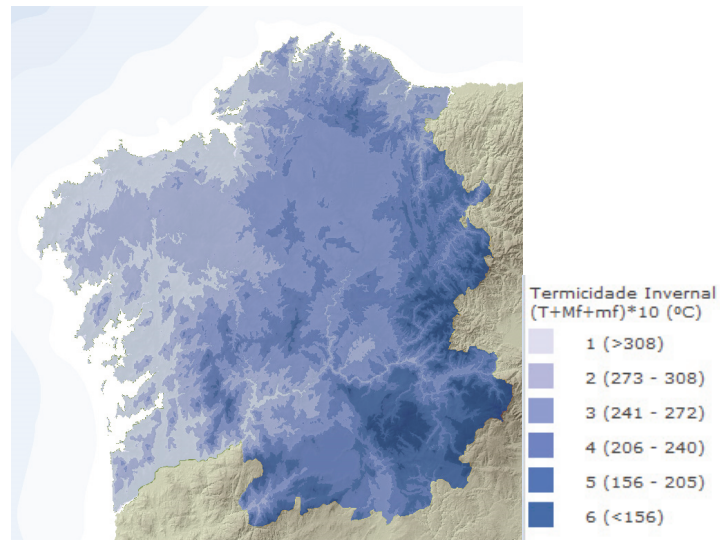


Figura 21. Valor medio de termicidad invernal (°C). Fuente: (Hábaco y IGVS 2017)

Ventilación: será necesaria la disipación del calor a través de una ventilación natural cuanto mayor sea la severidad del clima en verano, representado en el mapa de **termicidad estival** [Fig. 22].

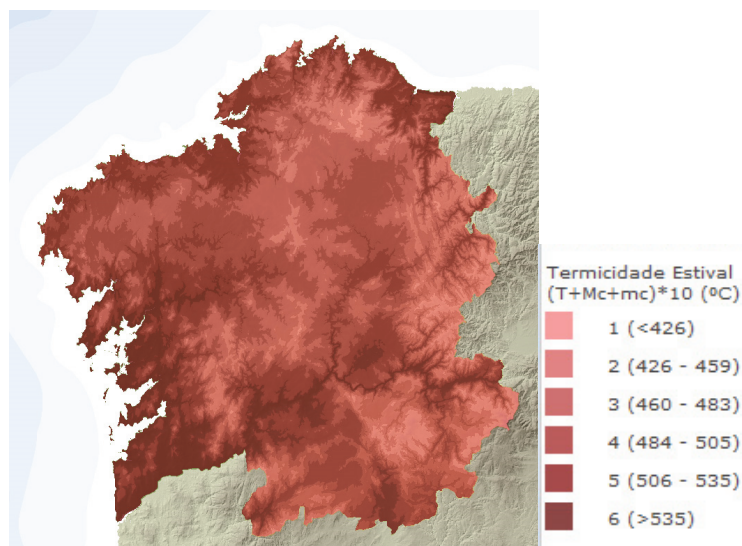


Figura 22. Valor medio de termicidad estival (°C). Fuente: (Hábaco y IGVS 2017)

Inercia térmica: en zonas con amplitud térmica se considera fundamental que la envolvente tenga la suficiente capacidad de absorber la energía solar para realizar un control pasivo reduciendo la variabilidad térmica interior.

A través del mapa de **diurnalidad** [Fig. 23] se relaciona el tipo de construcción con la amplitud térmica diaria.

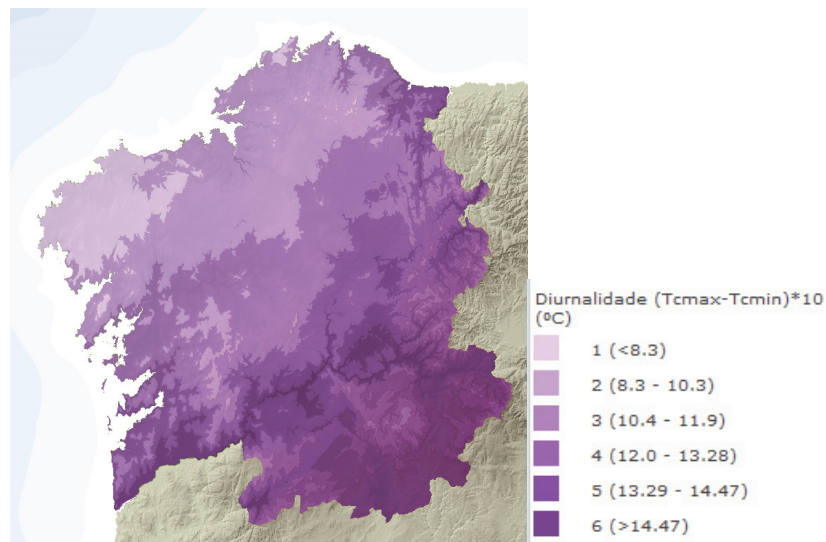


Figura 23. Valor medio de diurnalidad (°C). Fuente: (Hábaco y IGVS 2017)

Infiltración: las pérdidas de energía por infiltración se deben a diferencias de presiones entre interior y exterior. En zonas con gran elevada velocidad de **viento**, mostradas en [Fig. 24], es necesaria una hermeticidad de la envolvente para reducir los efectos de las masas de aire.

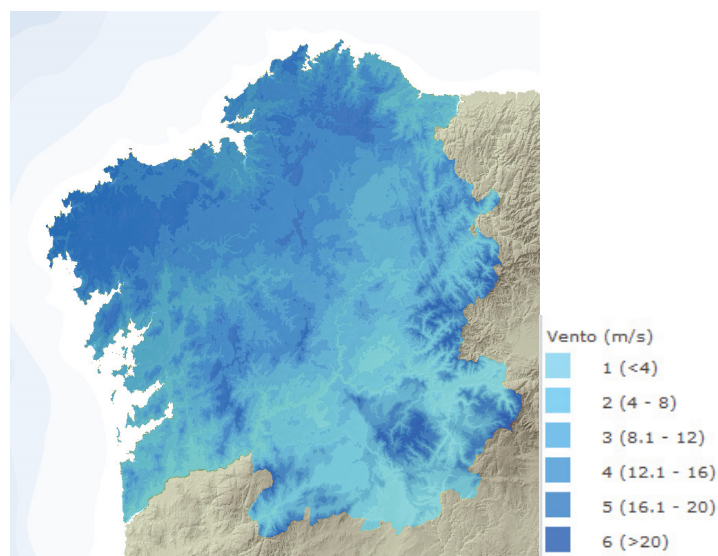


Figura 24. Valor medio anual de viento (m/s). Fuente: (Hábaco y IGVS 2017)

Así pues, teniendo en cuenta la relación entre variables y el entorno se valorarán ciertas características para ser objeto de estudio.

7.2 POBLACIÓN

La elección de la población en este trabajo no es casual, ya que varias investigaciones ponen de relieve la influencia de la zona climática en las situaciones de afecciones respiratorias.

El equipo de García Marcos en 2009 establece la influencia de las condiciones geoclimáticas en la prevalencia de síntomas de asma en adolescentes y niños —bajo el estudio ISAAC¹⁵— siendo mayor la presencia de síntomas en costa que en la meseta y siendo la humedad relativa el factor de riesgo significativo para la presencia de sibilancias. (García Marcos et al. 2009)

Unos años después, el equipo de Arnedo Pena relaciona a través de un estudio ecológico, la prevalencia de síntomas de asma con el clima en países del oeste de Europa. Teniendo en cuenta las variables meteorológicas, junto con otras socioeconómicas y sanitarias, son capaces de establecer una comparación en la que muestran cómo las tasas de asma en general aumentan con clima lluvioso y disminuyen en un clima soleado. (Arnedo Pena et al. 2012)

En concreto para Galicia, los estudios reflejan la prevalencia de asma y rinitis en la población de A Coruña dentro del marco ISAAC (López-Silvarrey Varela et al. 2007) así como también revelan que las cifras mayores de casos de asma se presentan en zona costera frente al interior y que podría ser debido a factores medioambientales de los cuales destacan los climáticos en general y la humedad en particular. (López-Silvarrey Varela et al. 2011)

Así pues, la población de estudio será el ambiente interior de la arquitectura situada en costa con altos niveles de humedad [Fig. 25] y de viento [Fig. 26], aproximadamente desde el golfo Ártabro hasta la sierra de Barbanza.

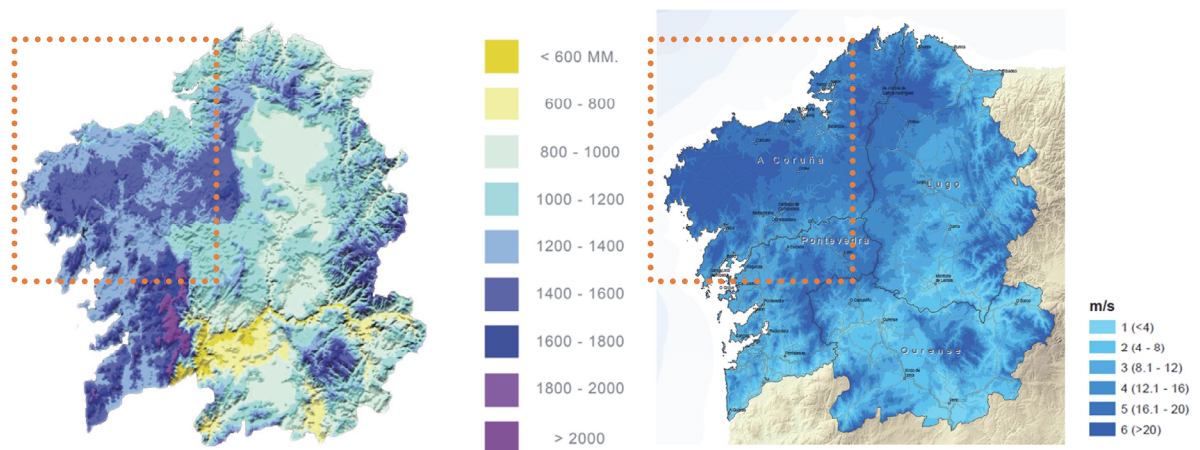


Figura 25. Precipitación anual acumulada (mm). Fuente: (Xunta de Galicia 2010)

Figura 26. Valor medio anual de viento (m/s). Fuente: (Hábaco y IGVS 2017)

Por un lado, el tiempo lluvioso implica menos sol, un aumento de humedad y más tiempo dedicado a estar en interior, lo que supone un incremento del período de exposición al riesgo de padecer asma por ácaros del polvo, productos químicos, mohos y mascotas. (Chavarría 2001)

¹⁵ ISAAC: International Study of Asthma and Allergies in Childhood. Es un programa único de investigación epidemiológica creado en 1991 para investigar el asma, la rinitis y eccema en niños. Su objetivo es conocer la prevalencia y gravedad del asma y enfermedades alérgicas y comparar los resultados entre ciudades y países. A través de una metodología estandarizada —cuestionario escrito y vídeo—, se estudian dos grupos, niños de 6 a 7 años y adolescentes de 13 a 14 años, para conocer la evolución de la enfermedad y las medidas que pueden reducir la carga de estas enfermedades.

Por otro lado, en el interior de la vivienda, la temperatura y la humedad suelen ser algo superiores al exterior debido al efecto de ocupación y la inmovilidad del aire, por lo que es importante establecer una ventilación adecuada y un control de la velocidad de las corrientes. La zona escogida muestra un alto grado de infiltraciones debido a la velocidad del viento, lo que supone mayor posibilidad de introducción de contaminantes del exterior al interior de la edificación, y se considera como aspecto importante a considerar para equilibrar la hermeticidad sin generar problemas mayores en cuanto a la calidad de aire.

Además, como se aclara en el capítulo anterior sobre los factores biológicos y sus efectos en la salud, el exceso de humedad en los materiales de interior provoca el crecimiento de microbios —moho, hongos y bacterias— que posteriormente emiten esporas, células y fragmentos al aire interior. También genera una degradación química o biológica de los materiales que puede contaminar el aire interior, por lo que se sugiere que la humedad es un indicador importante de riesgo ante síntomas e infecciones respiratorias y exacerbación del asma. (OMS 2009)

Otro aspecto que justifica la selección de la población es en relación a los contaminantes químicos ya que, en el año 2017, Galicia tenía la concentración media anual en $PM_{2,5}$ en tercer lugar con respecto al resto de comunidades, con unos valores de $13,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y de PM_{10} en $23,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, superando los umbrales establecido por la OMS, más restrictivos que la norma europea, de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respecto a cada tipo de partícula. (INE 2018b)

7.3 CRITERIOS DE CONFORT

Confort se refiere al estado en el que el usuario se encuentra ante unas condiciones ideales de bienestar, salud y comodidad, y en la que no existe ninguna molestia en el ambiente que altere física o mentalmente a esa persona.

La idea de comodidad en el interior de un edificio se ha asociado comúnmente a la regulación térmica e higrométrica, teniendo el ábaco de Givoni¹⁶ [Fig. 27] como uno de los métodos habituales de cuantificación, en los que la zona de confort aparece delimitada entre dos humedades relativas y dos temperaturas.

¹⁶ Baruch Givoni: arquitecto israelí especialista en arquitectura bioclimática. Avanza en los trabajos sobre diagramas psicométricos realizados por los hermanos Olgyay.

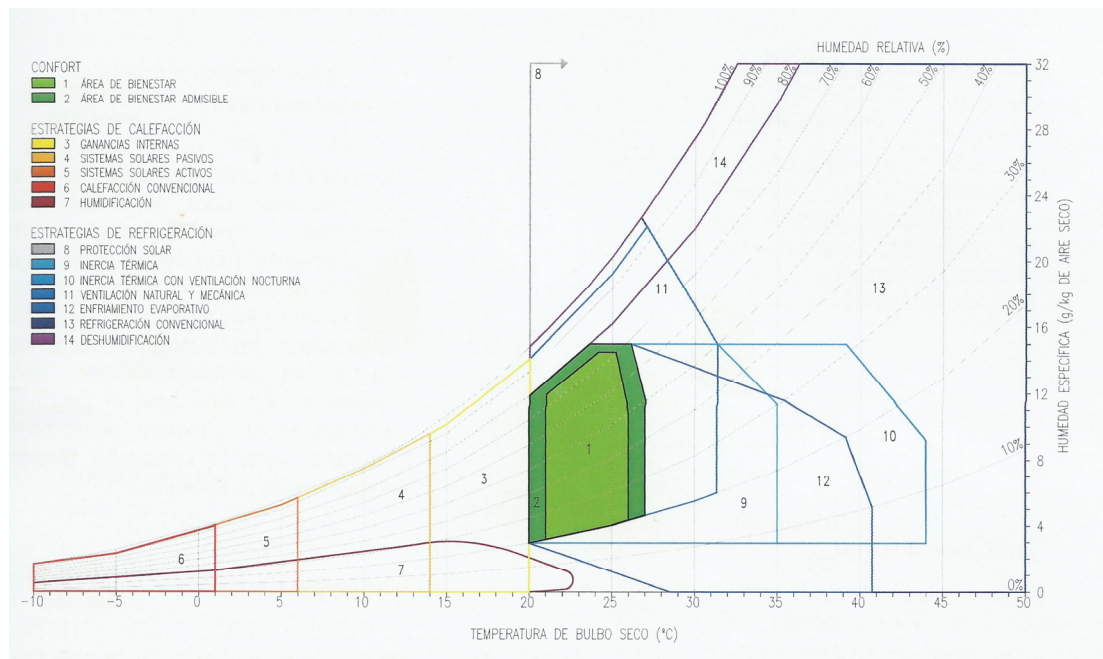


Figura 27. Climograma de bienestar de Givoni. Fuente: (Alonso Monterde 2014)

Este ábaco ayuda a determinar las estrategias bioclimáticas para alcanzar el bienestar en función de las condiciones del edificio y de la época del año; aunque, teniendo en cuenta la diversidad de factores que pueden afectar al bienestar del ambiente se puede intervenir además en el aspecto lumínico, acústico, olfativo, visual y psicológico. Así pues, a día de hoy, las condiciones de comodidad interior que se establecen como aceptables o por normativa son distintas de las que se toleraban antiguamente.

Tal y como definió la OMS en 1946, el confort también está asociado a la salud no solo como la ausencia de enfermedad sino también en el estado físico, mental y social del usuario (OMS [sin fecha]), que es lo que va a definir el grado de satisfacción con el medio que lo rodea.

Las contribuciones en investigación llegan a desarrollar la relación del confort con diversas áreas: con la tecnología y sociedad, con el ambiente interior, el ambiente exterior, la salud y bienestar, la cultura y con el cambio climático (Chappells y Shove 2004).

Por ejemplo, las investigaciones que estudian la relación del ambiente interior-exterior, la relación entre edificios, el clima y la cultura han demostrado que el urbanismo y las condiciones del clima pueden afectar a la hora de crear zonas de diversidad térmica en las ciudades y esto influye en la percepción y acciones de los usuarios.

Tal y como indican Chappells y Shove (2004), los estándares de bienestar se consideran características fundamentales para el mantenimiento de la salud humana.

Muchos de los estudios epidemiológicos tratan de clarificar la relación entre las condiciones ambientales internas con patrones de enfermedad como por ejemplo la exposición a un aire interior contaminando por combustión de biomasa o la mala ventilación con las infecciones respiratorias. Otros, tratan de identificar factores de riesgo significativos para la salud humana asociados con las tecnologías cotidianas, como el aire acondicionado, utilizadas para ofrecer confort en diferentes entornos.

8. ESTRATEGIAS EN ARQUITECTURA SOSTENIBLE

La sostenibilidad tal y como la entendemos hoy en día —basada en los tres pilares de sostenibilidad ecológica, económica y social— y la arquitectura vernácula, están relacionadas puesto que se pueden reconocer las características y principios del concepto en el patrimonio construido.

8.1 ARQUITECTURA VERNÁCULA

La arquitectura vernácula se compone de edificaciones tradicionales que responden a unas restricciones ambientales, climáticas, socioculturales y económicas. Emplea materiales locales que suelen proporcionar un buen confort térmico y un ambiente saludable debido a ser naturales, cuyos restos se pueden reintegrar en la naturaleza —una vez derruida la vivienda— o aprovecharlos para nuevas construcciones; el diseño se adapta al clima y a la ubicación más por necesidad que por elección. Es una arquitectura que transmite la cultura constructiva y favorece la cohesión social, ya que muchas veces es construida por los propios usuarios; es una arquitectura económica, autosuficiente en recursos naturales y con un bajo impacto ambiental; por lo que este tipo de arquitectura responde a los principios de sostenibilidad [Fig. 28].

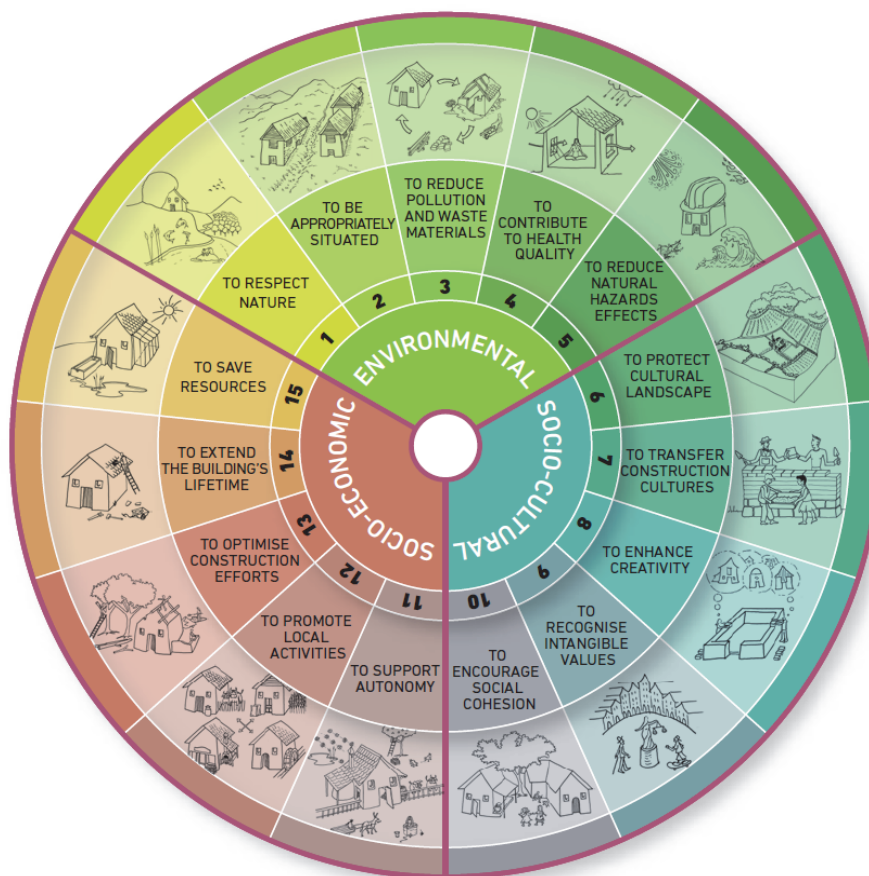


Figura 28. Principios de sostenibilidad de arquitectura vernácula. Fuente: (Achenza et al. 2014)

Las soluciones que otorga la arquitectura popular a los problemas planteados por el clima y sus variaciones son varias de acuerdo con la influencia de diferentes culturas y en equilibrio con la naturaleza. (Coch 1998)

Por un lado, se pueden encontrar varias soluciones a un mismo problema. Por ejemplo, en el desierto se realiza cierta arquitectura subterránea y también se utilizan las tiendas de campaña de los pueblos nómadas. En el primer caso, la radiación se combate con inercia térmica y oscuridad y en el segundo, con diversas pantallas solares y ventilación.

Por otro lado, se pueden observar modelos arquitectónicos idénticos en climas similares, pero con culturas muy diferentes y ubicaciones distantes.

También lo indica de esta manera John S. Taylor en su libro *Arquitectura anónima*; en la que la protección frente al medio, la humedad, el viento [Fig. 29], la calefacción, la refrigeración y la salubridad unidas a la respuesta ante las necesidades humanas básicas, se resuelven con lo que él denomina los principios de sentido común.

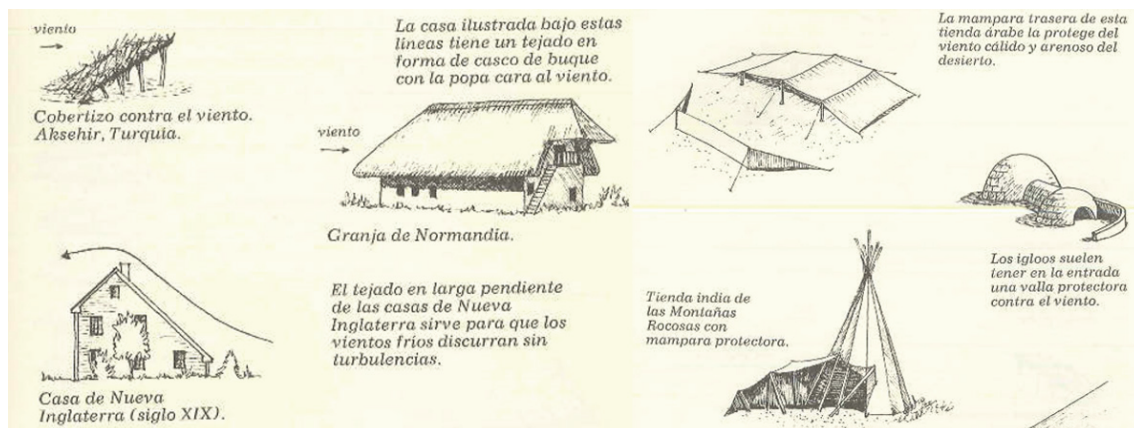


Figura 29. Técnicas de protección frente al viento en Turquía, Normandía y Nueva Inglaterra; barreras frente al viento en tienda árabe, en tienda india y en iglú. Fuente: (Taylor 1984)

De vuelta a Galicia, la arquitectura popular se desenvuelve condicionada por los medios físicos del clima, la geografía y los materiales, y por los medios socioculturales como la economía, la tecnología, los oficios, la cultura y las creencias. Según estos límites se va a producir una tipología determinada de construcción —casa-vivienda, construcción de almacenamiento, hornos o molinos, construcción para la cría, etc—, con una base común sobre la que se realizan variaciones. (Caamaño Suárez 2006)

Analiza y describe, igual que Pedro de Llano, la tipología marinera: la casa terrera, la casa de pincho, casa con patín y la casa de dos plantas entre medianeras y sus variantes. Todas con características constructivas y espaciales similares, pero con ciertas diferencias. (De Llano 2006)

Teniendo en cuenta la descripción del clima en el apartado 7.1, las principales preocupaciones en la vivienda gallega situada en costa era la de protección contra la humedad, contra el viento, la ventilación y la salubridad, que se resolvían con unos métodos específicos [Tabla 6].

TÉCNICAS CONSTRUCTIVAS Y MATERIALES	CIMENTACIÓN	<p>Excavación de una franja rellena de mampuestos.</p> <p>Las piedras más grandes y lisas se colocan en el plano de comienzo de los muros.</p>
	MUROS (altura 2-3 m condicionada por la estabilidad al viento)	<p>Más abundante la mampostería de granito, piedra sin labrar, de dimensiones irregulares pero manipulables por una persona.</p> <p>Trabados con mortero de barro y con piedras más pequeñas en los huecos, además de una pieza que trababa la cara exterior con la interior, dotando de cierta resistencia al muro.</p> <p>El espesor de 60-70 cm aporta alta inercia que ayuda a estabilizar la temperatura interior.</p> <p>Los revestimientos al exterior suele ser un enlucido de barro, posteriormente caleado. Con ello se protegía de la salinidad, además de facilitar la impermeabilidad y evitar infiltraciones de agua de lluvia.</p>
	CUBIERTA	<p>La cantería solía ser para edificios civiles o religiosos.</p> <p>Los sillares de granito tallados en piezas regulares de 30-60cm grosor x 50-80cm longitud y más de 30cm de alto, colocadas en seco con piedras más pequeñas en los huecos y algo de cal.</p> <p>Aporta inercia térmica y protección ante la lluvia y el viento.</p> <p>Lo más extendido era el uso de teja sobre un entramado de madera.</p> <p>Por su peso y estanqueidad protege de la lluvia y el viento.</p> <p>Ofrece un buen acabado debido a su geometría y facilidad de colocación.</p> <p>El entramado de madera permite la ventilación del interior.</p> <p>Suele ser de doble vertiente, sin grandes aleros.</p>

	<p>HUECOS</p>	<p>Ventanas</p> <p>Contorno de cantería, huecos de 80x100cm, cerrados con vidrios de escasa dimensión y contras de madera.</p> <p>Enrasadas al exterior del muro para desalojar más rápidamente el agua de lluvia y evitar humedades.</p> <p>Puerta</p> <p>La pieza interior de la puerta se elevaba para evitar la entrada de agua.</p> <p>La partición horizontal permitía la ventilación.</p> <p>Tragaluces</p> <p>Pequeñas aberturas en horizontal o vertical para ventilar los establos.</p>
<p>TÉCNICAS ESPACIALES DE PROTECCIÓN</p>	<p>ELEMENTOS SINGULARES</p>	<p>Corredor</p> <p>En la costa norte sirve como protección de viento y lluvia, en el sur como estancia.</p> <p>Situado debajo del voladizo de la cubierta.</p> <p>Crea espacio de transición entra calle y vivienda.</p> <p>Soportal</p> <p>En planta baja, para guardar embarcaciones y aparejos de pesca.</p> <p>Crea relación entre interior y exterior.</p> <p>Protección frente a la lluvia de los muros de la vivienda y de los transeúntes.</p> <p>Galería</p> <p>Estancia cerrada.</p> <p>Protección de huecos ante viento y lluvia.</p> <p>Permite mejorar el aislamiento y ventilación</p>

Tabla 6. Técnicas constructivas de la arquitectura vernácula marinera en Galicia. Fuente: modificado de (De Llano 2006)

Con el paso del tiempo, los avances tecnológicos han permitido conseguir el confort, sobre todo térmico, en casi cualquier zona y tipología de vivienda. Esto ha sido posible, sobre todo, a través del consumo de energía, aunque con cierta despreocupación sobre el medio ambiente.

Esta situación ha llevado a planteamientos e investigaciones sobre el proceso contemporáneo de la arquitectura en relación a la resiliencia del patrimonio vernáculo y a los parámetros de la sostenibilidad.

Una aproximación internacional a esta cuestión la realiza, por ejemplo, el arquitecto Luis Barragán a comienzos del siglo XX, ya que revalorizaba la arquitectura vernácula como

elemento esencial en sus proyectos a la vez que prestaba atención a los patrones de sol, la iluminación diurna, el control de ruido y la ventilación. Para él, el diseño teniendo en cuenta el ambiente natural y el contexto cultural abarcaba todos los niveles, desde la planificación urbana hasta los detalles interiores. Identificaba los elementos esenciales del diseño tradicional para luego darle una imagen más contemporánea, recuperando métodos constructivos y materiales de acabado y enfatizando las cualidades ópticas y térmicas de los mismos. (Figueroa y Castorena 2006)

«La raíz con la tierra y el empleo de materiales constructivos que se integran en el territorio son constantes en sus primeras obras. Barragán decía que “la arquitectura era parte de la tierra.”» (López Viso 2012)

Por ejemplo, para la casa González Luna (1928-30) [Fig. 30], ubicada en Guadalajara, utilizó materiales propios de la zona mexicana: muros de carga de piedra y adobe, suelos de mosaico y de madera oscura, pinturas de cal y ladrillo “perón” al exterior por su dureza; teja para la cubierta, las puertas de madera oscura, la pérgola de la terraza de listones de madera y suelos cerámicos. (Colaboradores de WikiArquitectura [sin fecha])



Figura 30. Casa González Luna, 1928-30. Fuente: (Figueroa y Castorena 2006)

Entre otros nacionales, José Antonio Coderch también estudia las posibilidades de la vivienda con referencias a la construcción tradicional mediterránea. Como en la casa Ugalde (1951-53) en Caldes d’Estrac, en la que respeta al máximo el entorno y la naturaleza a través del lenguaje moderno y partiendo de la arquitectura popular catalana. La vivienda [Fig. 31] se adapta al terreno en varios niveles, una única planta que diferencia las tres áreas funcionales en las que

las terrazas son continuidad del espacio interior. El uso de los materiales típicos de la arquitectura mediterránea como la mampostería encalada para los muros o las baldosas de tierra cocida para los pavimentos, crean el conjunto de volúmenes blanco que se asienta sobre un zócalo de piedra encalada.



Figura 31. Casa Ugalde en Caldes d'Estrac. Fuente: <https://www.casaugalde.com/>

Más cercano en tiempo y lugar, podemos encontrar otro modelo en la casa Baltanás en Paderne [Fig. 32] de Carlos Quintáns Eiras, en la que reinterpreta la arquitectura popular de esa zona de Lugo a través de un lenguaje con elementos contemporáneos, integrándose en el paisaje sin ningún impedimento.

Sobre la construcción masiva de muro de piedra existente, coloca una estructura de madera laminada con cubierta inclinada a dos aguas. La estructura interior y la mayoría de los revestimientos son en madera, la cubierta en pizarra de la construcción original y la fachada es de paneles de madera de castaño de la zona.

Los materiales y formas autóctonas se combinan para crear un espacio de dos plantas, con una fachada trasera opaca que da cara al pueblo y la fachada principal que contiene un gran ventanal encajado en el entramado de madera que aporta la luz y ventilación natural además de las vistas de O Courel.



Figura 32. Casa en Paderne 2010. Fuente: <http://carlosquintans.com/casa-en-paderne/>

8.2 ARQUITECTURA PASIVA

La arquitectura pasiva se define como aquella que se adapta a las condiciones climáticas del entorno (Wassouf 2017). Sus estrategias se refieren a medidas que afectan al diseño en cuanto al aprovechamiento de las condiciones del lugar, el aislamiento, la inercia térmica de los materiales y la forma de climatización de la manera más natural posible.

Teniendo presentes estas características y la tabla 6 de técnicas constructivas y materiales, se pueden identificar varias de las estrategias pasivas en la arquitectura popular marinera gallega (De Llano 2006):

- La protección de la vivienda del viento marcaba la **orientación** de la edificación, con la vegetación colocada estratégicamente.

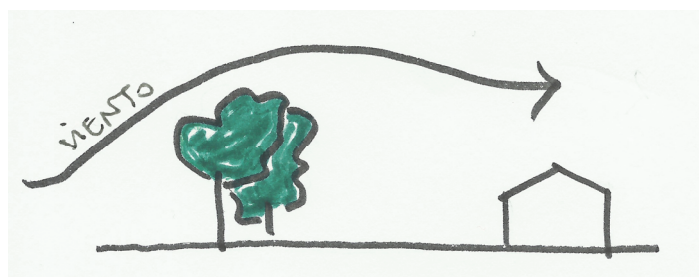


Figura 33. Diagrama del efecto de la vegetación como cortaviento. Fuente: elaboración propia (2019)

- La construcción de tipo rectangular, sin volúmenes complicados aportaba **compacidad** a la estructura.

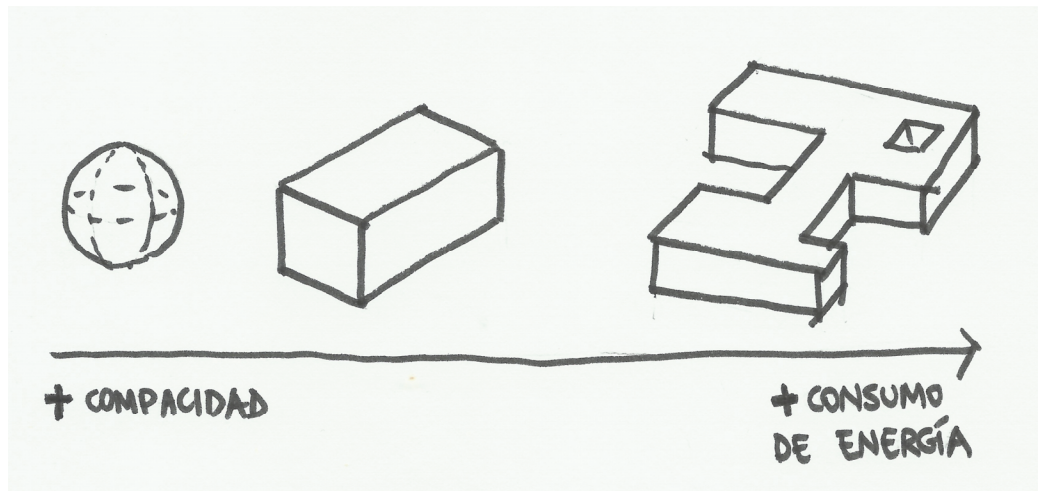


Figura 34. Relación de compacidad y consumo de energía. Fuente: elaboración propia (2019)

- Los muros gruesos de piedra que absorben calor durante el día y lo disipan por la noche ofrecían la **inercia térmica**. Al ser el único material en el muro no tiene buena transmitancia térmica, pero añadir el barro y la cal al exterior ayudaba a **minimizar las pérdidas por infiltraciones**. Además, el hecho de estar muchas veces entre medianerías se obtiene menor fachada expuesta.

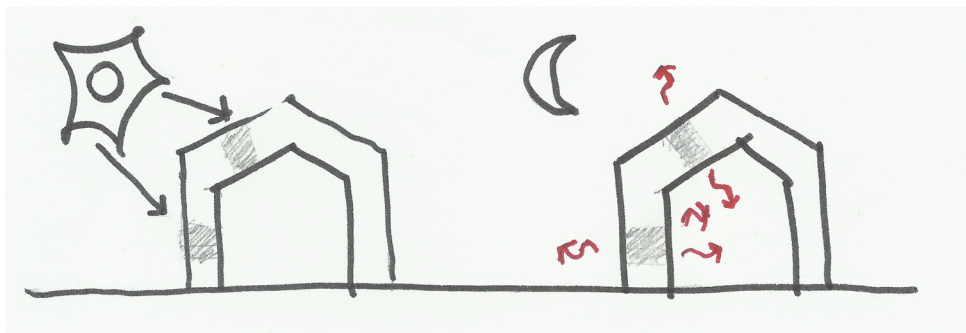


Figura 35. Diagrama de inercia térmica en muros gruesos. Fuente: elaboración propia (2019)

- La **producción de calor** en el interior era en torno a la cocina. A veces se tenía aporte de calor si en planta baja se situaban las cortes.
- También se empleaban los elementos singulares para **controlar la temperatura, la humedad y la ventilación**: la galería como espacio cerrado por el vidrio protege la fachada de la lluvia y el viento a la vez que permite el control de la ventilación y temperatura en el interior; el soportal permite la ventilación y protección frente a lluvia y viento; el patín evita la entrada de la humedad del suelo y; el pasillo como espacio abierto y ventilado que puede servir como protección de viento y lluvia además de ser una zona protegida del sol y cuyo área inferior aporta sombra.

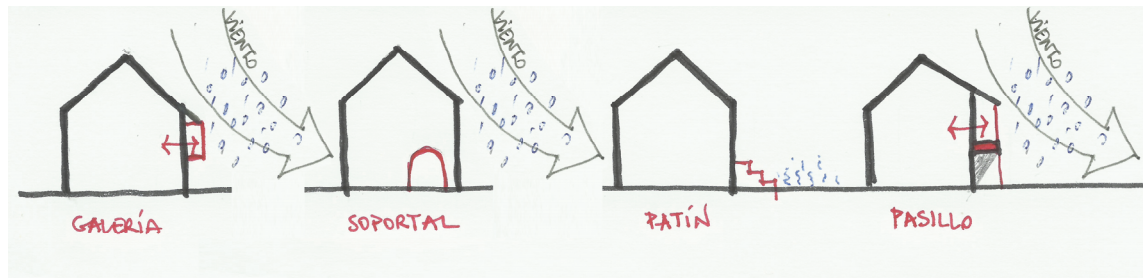


Figura 36. Diagrama de elementos singulares para controlar agentes físicos. Fuente: elaboración propia (2019)

- La **ventilación** para reducir la humedad y aumentar la sensación de confort se establecía a través de la partición de las puertas, las pequeñas ventanas y huecos e incluso el entramado de la cubierta. Los huecos en la fachada frontal eran de pequeño tamaño para **evitar infiltraciones de agua y pérdidas térmicas**.

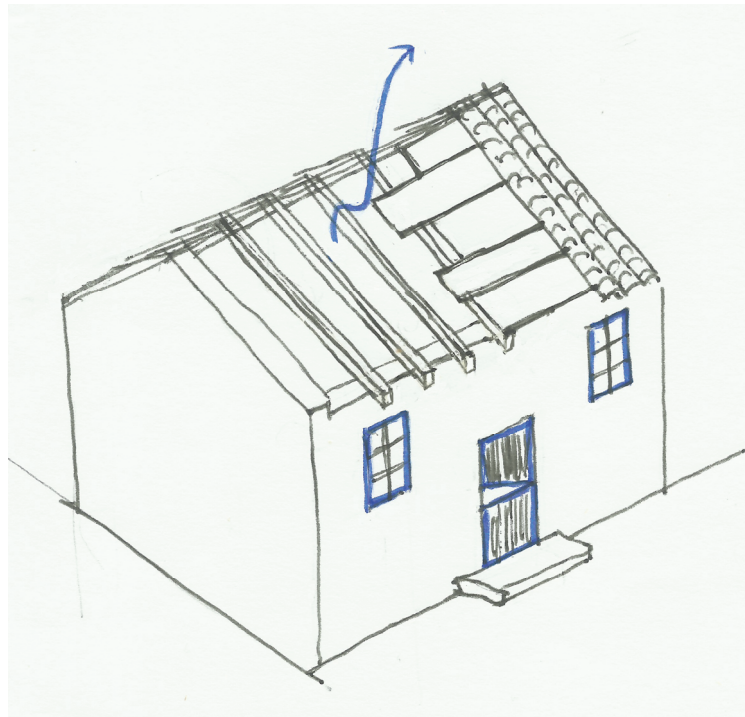


Figura 37. Diagrama de elementos de ventilación en vivienda. Fuente: elaboración propia (2019)

A lo largo de los años, los edificios se han acondicionado con aportación de energía —a través de procesos de combustión y/o de captación de energías naturales, ventilación, etc.— y conservándola durante el mayor tiempo posible. (Neila González 2004)

Poco a poco, la posibilidad de adquirir combustibles fósiles y los métodos de calefacción y climatización, incrementaron la demanda de confort térmico, de manera que se distribuía el calor a cada recinto habitable dejando de lado la preocupación por el aislamiento y por evitar las pérdidas térmicas a través de los cerramientos.

Tras una serie de crisis energéticas¹⁷ en los '70, se da paso a un mayor interés por las técnicas que ya planteaban una gestión en la economía energética y, en concreto, por las técnicas naturales. (Camous 1986)

Se comienza a introducir el concepto de ahorro de energía y se desarrollan una serie de normas de obligado cumplimiento para concienciar y regular el gasto energético.

En la actualidad, a través de la directiva 2010/31/UE del Parlamento y de Consejo Europeo de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios, se introduce el término de energía neta casi nula (nZEB¹⁸) en el sector de la construcción, que indica que «La cantidad casi nula o muy baja de energía requerida debería estar cubierta, en muy amplia medida, por energía procedente de fuentes renovables, incluida la energía procedente de fuentes renovables producida in situ o en el entorno» (Wassouf 2017)

Esta medida tiene el objetivo para 2020, de reducir la emisión de gases de efecto invernadero un 20%¹⁹, fomentar la eficiencia energética para que la energía procedente de fuentes renovables sea el 20% del consumo de energía total de la Unión y reducir en un 20% el consumo de energía primaria²⁰. La medida establece los siguientes puntos (Pless y Torcellini 2010):

- Energía casi nula en parcela: la cantidad de energía que se consume es la misma que la que se genera.
- Energía casi nula en fuente: la energía renovable que se genera o se compra es la misma cantidad que la energía primaria que se consume.
- Energía casi nula en costes energéticos: el dueño paga lo mismo por la energía no renovable consumida que la que recibe por la venta de la renovable producida en su parcela.
- Energía casi nula en emisiones: se produce la energía renovable que es capaz de contrarrestar las emisiones producidas por el uso del inmueble.

Como se puede ver, la arquitectura pasiva trata de conseguir elevados niveles de confort interior a través de un consumo de energía casi nulo. Con esta premisa, y siguiendo los principios del sentido común de John S.Taylor, los requisitos del diseño pasivo se deben centrar en recuperar los conceptos de compacidad, orientación, continentalidad, aislamiento,

¹⁷ La primera crisis energética internacional fue en 1973-74 con la devaluación del dólar y el aumento del precio del petróleo. Se comienza a analizar el impacto medioambiental y a buscar recursos energéticos alternativos.

En 1979 se vuelve a incrementar el precio del crudo además de iniciarse las críticas sobre su contaminación.

¹⁸ «En la actualidad no existe una definición exacta del concepto nZEB y es muy probable que se desarrollen diferentes estrategias según las zonas climáticas y culturas constructivas para este tipo de edificios» (Wassouf 2017)

¹⁹ Directiva 2010/31/UE: «Las medidas adoptadas para reducir el consumo de energía en la Unión permitirán reducir para el 2020 las emisiones totales de gases de efecto invernadero en un 20% como mínimo con respecto a los niveles de 1990 y en un 30% en caso de lograrse un acuerdo internacional»

²⁰ La energía primaria es aquella energía disponible que no está transformada.

ventilación, inercia térmica o infiltración; de manera que no se confía todo el ahorro energético al alto rendimiento de unas instalaciones.

Teniendo en cuenta esto, lo que pretende este trabajo es estudiar las opciones que ofrece la arquitectura pasiva para mejorar la calidad de aire interior en zona costera gallega de clima húmedo y con viento. Además, se relacionarán con querer disminuir los problemas de asma y rinitis, de manera que esas medidas actuarán frente a unos agentes físicos, químicos y biológicos determinados.

Para conseguir este ambiente interior saludable se decide investigar varias estrategias. Por un lado, las soluciones de ventilación como principal correctora de malas condiciones de aire. Por otro lado, cómo controlar la humedad relativa interior a través de los materiales y cómo reducir la contaminación por medio de los materiales limpiadores. Finalmente, se verá el funcionamiento de un sistema activo que utiliza el estándar Passivhaus para mejorar la calidad de aire.

9. MEDIDAS PASIVAS

Como se ha visto en el capítulo anterior, las estrategias pasivas pueden ofrecer una mejora en el bienestar del usuario de manera sostenible.

Siguiendo el principio de economía, a condiciones idénticas, se prefieren las soluciones más simples. Por ello se explican a continuación tres estrategias pasivas que se consideran técnicas sencillas y saludables: las soluciones de ventilación natural, los materiales capaces de controlar la humedad relativa interior y los materiales capaces de disminuir la concentración de contaminantes del ambiente interior.

9.1 VENTILACIÓN

Como se ha indicado al inicio del trabajo, el bienestar depende de muchos factores y, dentro del confort térmico, la temperatura y la humedad relativa son los principales condicionantes modificables con el movimiento del aire, el cual también ayuda a la eliminación de contaminantes químicos y biológicos.

Las posibilidades de la ventilación natural pasan por la capacidad de reducir la humedad relativa interior, de aportar frescor al ambiente debido a su velocidad o frío por evaporación, dando como resultado, por ejemplo, reducciones importantes de energía de refrigeración de sistemas artificiales convencionales [Fig. 38].

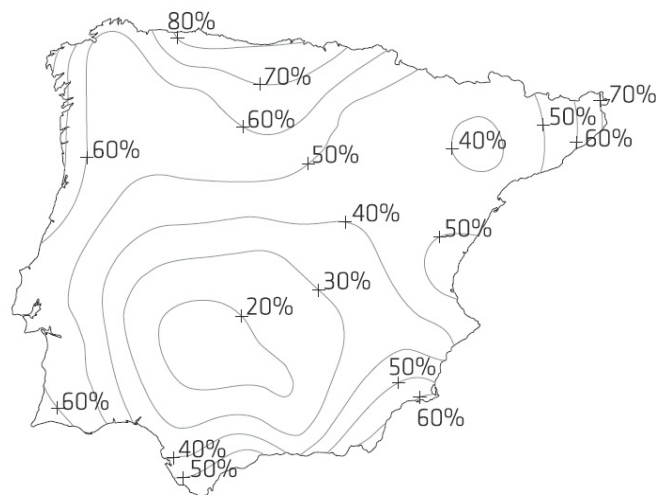
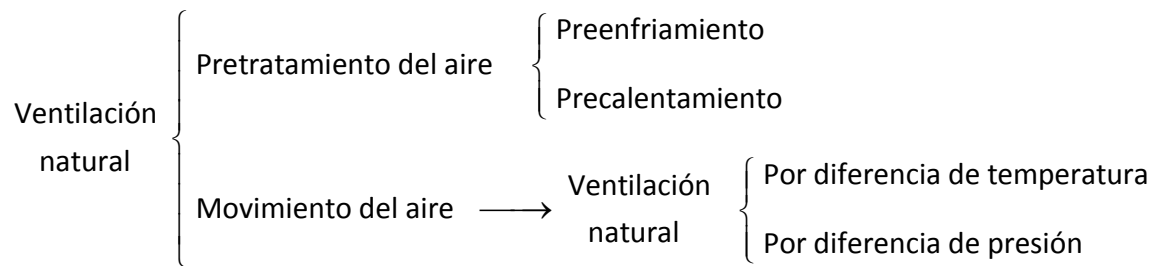


Figura 38. Potencial de las estrategias de ventilación natural en reducción de consumo del acondicionamiento térmico estival. Fuente: (Velasco Roldán 2011)

En España, la mayor parte de los edificios tienen un sistema de ventilación natural con un control escaso sobre las condiciones de la calidad de aire y sistemas de extracción poco eficientes. (Rodríguez Trejo 2016)

A pesar de que los sistemas de ventilación mecánicos en general tienen una buena relación potencial/coste y los artificiales complementan cualquier estrategia, como medida pasiva se hablará de la ventilación natural que además tiene un menor coste de implantación y promueve la relación del usuario con el entorno.

Los mecanismos que hay para el intercambio de aire se van a estudiar referidos al acondicionamiento previo de la propia masa de aire y al control de la forma de circulación interior



PRETRATAMIENTO DEL AIRE

Las técnicas para la climatización sin el consumo de recursos están fundamentadas en pretratar el aire para disminuir la demanda de calefacción y refrigeración.

CLIMATIZACIÓN NATURAL: PRETRATAMIENTO	PREENFRIAMIENTO	Conductos enterrados Refrigeración nocturna	Todos Cálido seco, moderado	CLIMA
		Agua - sistemas directos	Cálido seco, moderado	
		Agua – sistemas indirectos Vegetación	Cálido seco, moderado Cálido seco, moderado	
	PRECALENTAMIENTO	Invernadero o atrio	Frío, moderado	

Tabla 7. Estrategias del pretratamiento del aire. Fuente: (Velasco Roldán 2011)

En clima templado se requieren dos formas de actuación, en verano y en invierno (Serra 1999) así que cualquiera de las medidas se podría aplicar a la población seleccionada teniendo en cuenta la clasificación por clima que realiza Velasco Roldán.

Distinguir entre medidas de verano y de invierno supone que el edificio necesite una adaptación de la forma a los requerimientos de cada momento del año, por lo que la selección de las medidas deben ser resultado del estudio de las condiciones más desfavorables.

En el caso de la población escogida, las estrategias de invierno tienen más interés que las de verano puesto que el exceso de humedad y de temperatura baja hace que la ropa se humedezca provocando la sensación de frío y la humedad puede suponer un riesgo de proliferación de contaminantes biológicos.

Por ello, los procedimientos de precalentamiento del aire se van a analizar también desde el punto de vista de salud y no estrictamente de aclimatación y confort térmico.

Las medidas de Velasco Roldán (2011) se completan con las que describe Neila González (2004) como estrategias de diseño pasivo, Alonso Monterde (2014) en la guía de arquitectura sostenible y García Lasanta (2004) sobre captación solar pasiva:

- Invernadero, galería o porche acristalado
- Suelo acumulador de grava
- Sistema de doble piel
- Muro trombe
- Pozo canadiense

El principio del funcionamiento del **invernadero** [Fig. 39], la **galería** y del **porche acristalado** es similar: son espacios acristalados adosados a la vivienda y orientados al sur que captan y acumulan el calor para transmitirlo gradualmente al interior. La energía de la radiación solar calienta la masa de aire y se transmite de manera indirecta a través del cerramiento que los separa, el cual debe tener aberturas situadas en la parte superior e inferior para que pueda circular el aire.

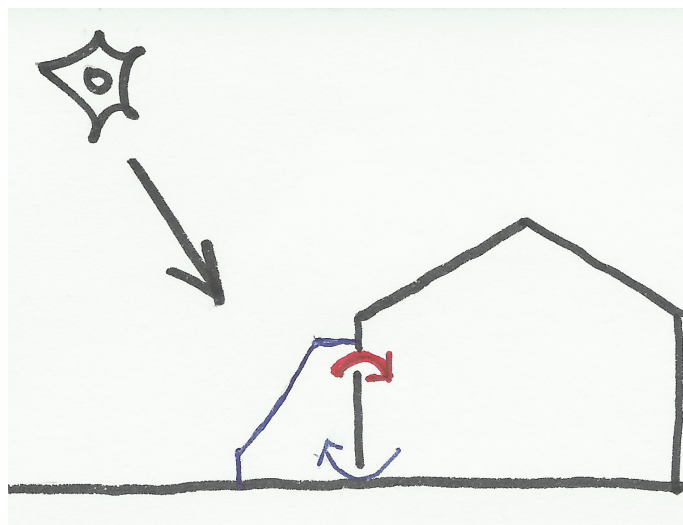


Figura 39. Esquema de invernadero. Fuente: elaboración propia (2019)

Suelo acumulador de grava [Fig. 40]: colocar un lecho de grava bajo el edificio permite conservar el calor mientras se distribuye bajo todas las estancias. La captación se realiza a través de un vidrio y la energía almacenada se conduce por radiación o haciendo circular el aire por el interior de la solera.

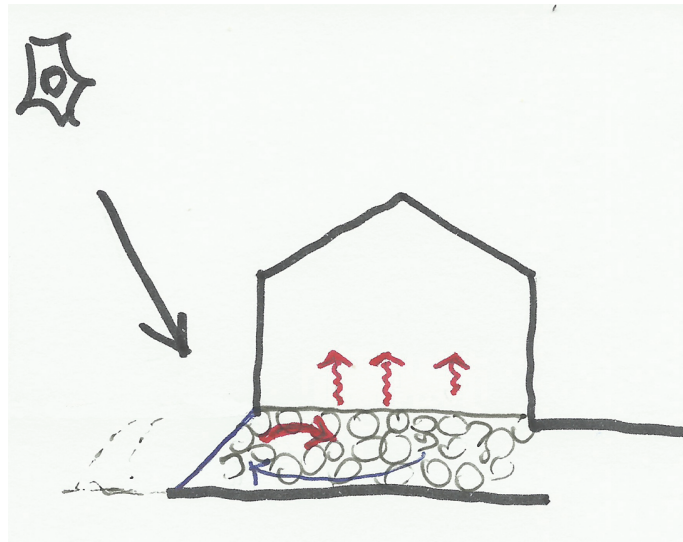


Figura 40. Esquema de suelo acumulador de grava. Fuente: elaboración propia (2019)

Sistema de doble piel o la casa dentro de la casa [Fig. 41]: basado en configurar los cerramientos, o los más importantes, en dos capas —la exterior aislada para que no pierda la energía que transporta el aire y la interior de masa suficiente para acumular el calor— y con una cámara de aire entre ellos de mínimo 20cm para que pueda circular el aire sin problema y distribuir el calor por radiación.

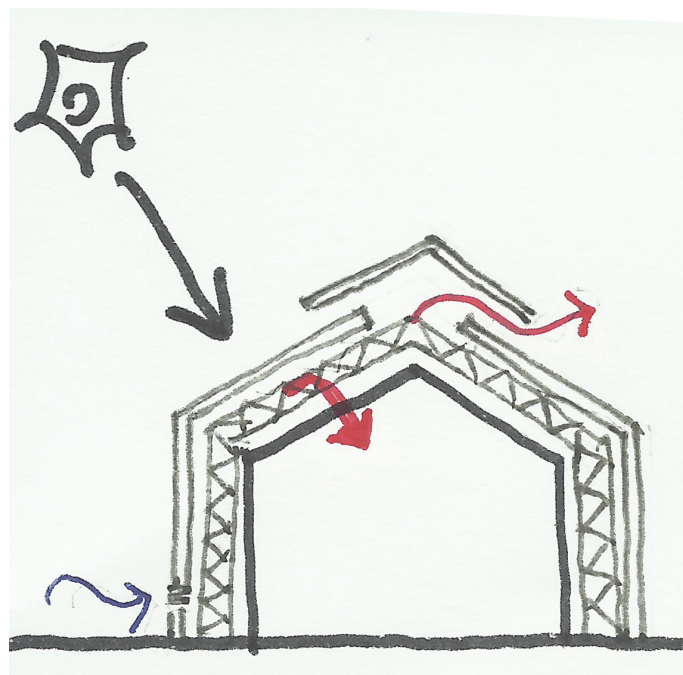


Figura 41. Esquema de sistema de doble piel. Fuente: elaboración propia (2019)

Muro trombe [Fig. 42]: se fundamenta en la captación solar indirecta construido con materiales de gran masa. El muro de 30-40 cm se orienta al sur detrás de una fachada de vidrio y por medio de unos orificios en la parte superior e inferior del muro, se distribuye el calor a la estancia.

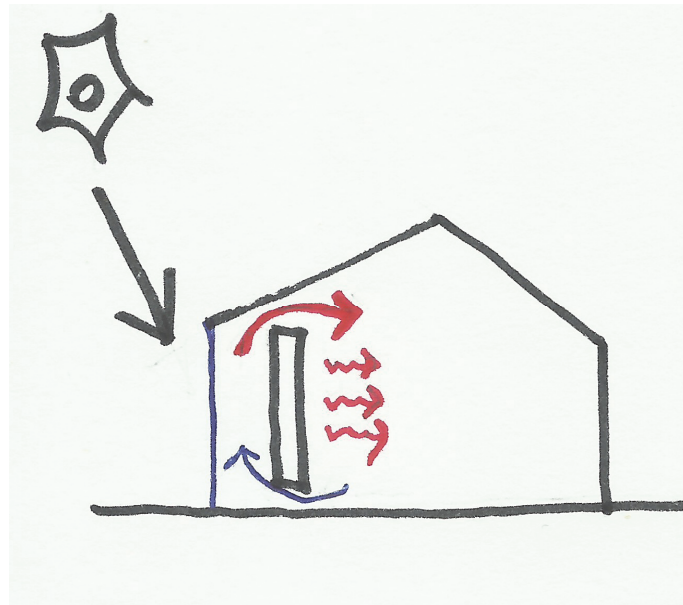


Figura 42. Esquema de muro trombe. Fuente: elaboración propia (2019)

Pozo canadiense [Fig. 43]: se apoya en la inercia del terreno que hace que la temperatura sea estable a determinada profundidad, de manera que se puede calentar el aire en invierno al hacerlo pasar por los conductos enterrados.

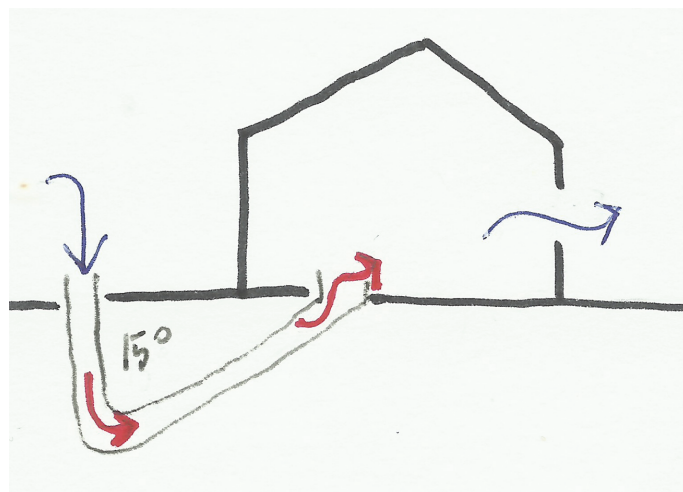


Figura 43. Esquema de pozo canadiense. Fuente: elaboración propia (2019)

Igual que se ha visto en la arquitectura vernácula, la principal medida en la arquitectura gallega marinera es la de conservar el aire caliente en el interior, además de regular la humedad a

través de la renovación de aire y controlar el movimiento del mismo en el interior. Para esto se explica a continuación el movimiento del aire

MOVIMIENTO DEL AIRE

La forma natural de movimiento de aire se basa en fenómenos físicos de diferencias de presión entre interior-exterior o entre zonas de la edificación, causada por diferencias de temperatura, por la presión dinámica del viento o por métodos mecánicos, aunque frecuentemente es combinación de varios.

La mayoría de las explicaciones sobre la ventilación se refieren a ella como una estrategia para eliminar el calentamiento y reducir la sensación de calor en el interior. Sin embargo, el objetivo de hablar de ella para la población seleccionada de estudio será el de la renovación del aire interior para garantizar una calidad higiénica y no porque exista un sobrecalentamiento excesivo en el ambiente.

La **ventilación natural pura** se produce cuando existen presiones diferentes entre el interior y el exterior de una estancia. La acción del viento sobre un frente del edificio crea sobrepresiones en él respecto al interior.

La **ventilación natural directa** se da a través de las ventanas abiertas por un período de tiempo. Se equilibran las presiones de los ambientes intercambiando las masas de aire [Fig. 44].

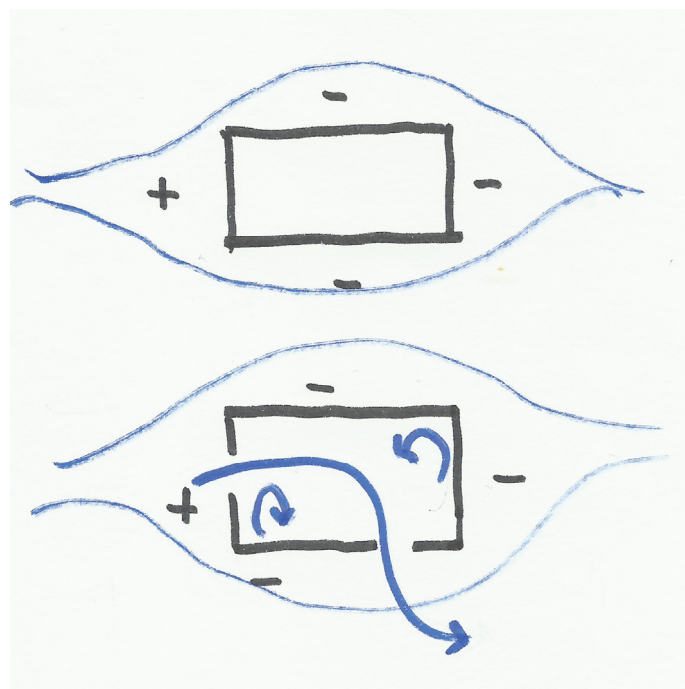


Figura 44. Esquemas de ventilación natural directa. Fuente: elaboración propia (2019)

La **ventilación natural cruzada** se refiere a la que se realiza entre huecos de fachadas distintas. De nuevo funciona bajo el concepto de equilibrar las diferencias de presión, siendo más eficiente cuando son opuestas —generando presión y sobrepresión— o cuando los huecos

están a diferentes alturas en los frentes —siendo la más eficaz cuando la salida se produce por cubierta, sobre todo en verano— [Fig. 45].

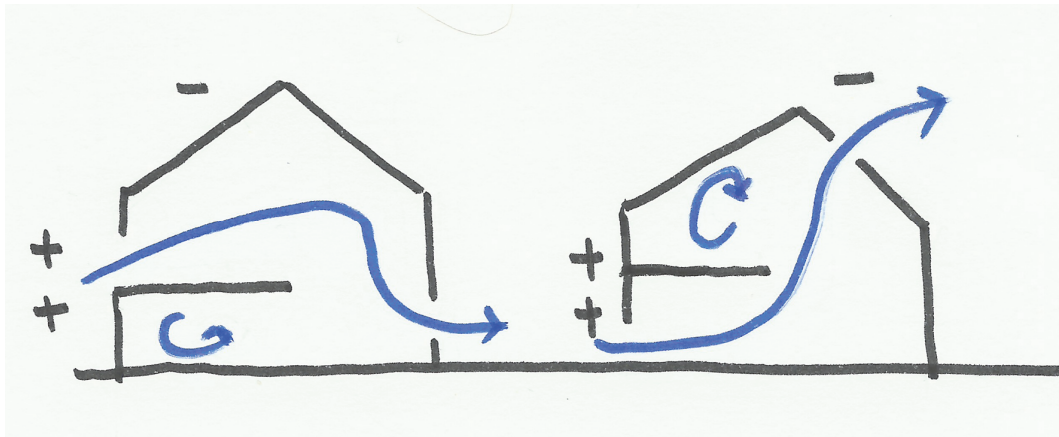


Figura 45. Esquemas de ventilación natural cruzada a diferentes alturas. Fuente: elaboración propia (2019)

La adecuada combinación de obstáculos en las fachadas, la distribución interior y el tamaño de los huecos caracterizarán una buena ventilación cruzada [Fig. 46].

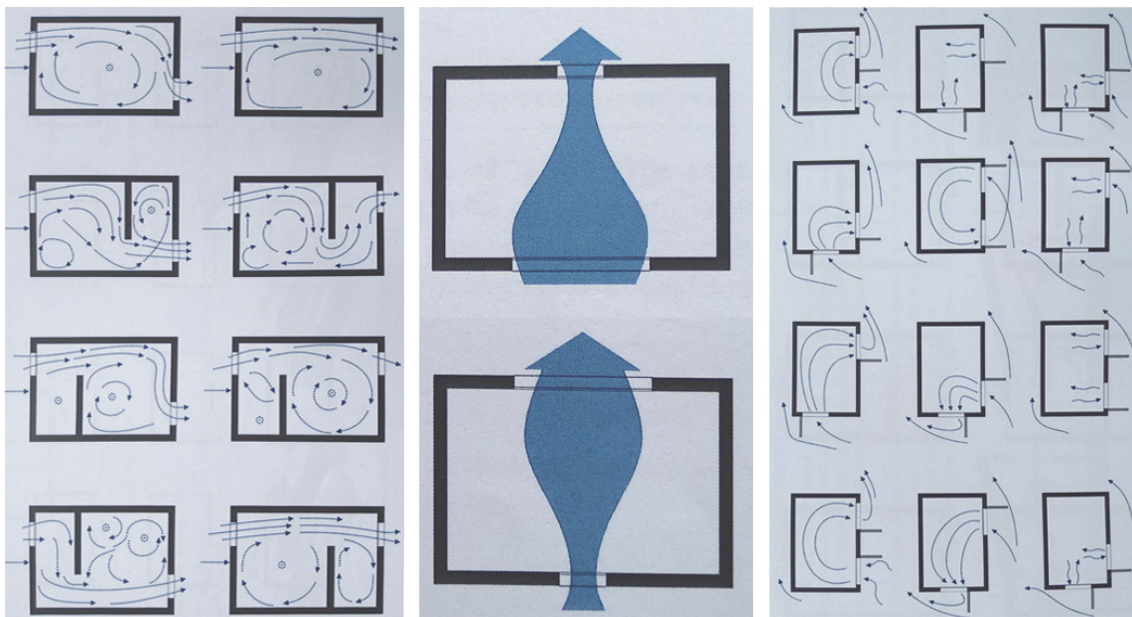


Figura 46. Esquemas de combinación ventilación natural cruzada, aleros, tamaño de huecos y distribución interior. Fuente: modificado de (Alonso Monterde 2014)

Según Velasco Roldán (2011), se podría hacer la siguiente clasificación:

VENTILACIÓN NATURAL	POR DIFERENCIA DE TEMPERATURA	Patio como piscina de aire refrigerado	Cálido seco	CLIMA
		Patio como elemento de extracción	Cálido seco, cálido húmedo moderado	
		Atrio	Frío, moderado	
		Patinillo	Todos	
		Conducto vertical	Todos	
		Exutorio	Todos	
		Aireador de cubierta	Cálido seco	
		Forma de la cubierta	Todos	
		Compartimentación de espacios en planta y sección	Cálido húmedo, cálido seco, moderado	
		Infiltraciones	Cálido húmedo	
	INDUCTORES DE DIFERENCIA DE TEMPERATURA	Chimenea térmica solar	Frío, moderado	
		Invernadero	Frío, moderado	
		Muro trombe	Frío, moderado	
		Doble carpintería, hoja interior ventilada	Frío	
		Torre de refrigeración	Cálido seco, moderado	
		Sistemas radiantes de calefacción o refrigeración	Cálido seco, moderado, frío	
	POR DIFERENCIA DE PRESIÓN DINÁMICA DEL VIENTO	Ventana	Todos	
		Doble carpintería, ambas hojas ventiladas	Frío	
		Persiana	Todos	
		Permeabilidad de los cerramientos	Cálido seco, cálido húmedo, moderado	

		Ventana aireada	Frío
		Rejilla de ventilación exterior	Todos
		Túnel de viento	Cálido húmedo, moderado
		Compartimentación interior	Todos
	INDUCTORES DE PRESIÓN DINÁMICA DEL VIENTO	Resaltes, balcones, voladizos	Todos
		Captador unidireccional/multidireccional	Cálido seco, cálido húmedo, moderado
		Extractor unidireccional/multidireccional	Todos

Tabla 8. Estrategias del movimiento del aire. Fuente: (Velasco Roldán 2011)

Considerando esta clasificación, y sin incluir los inductores de diferencia de temperatura y de presión, se podrían aplicar las siguientes medidas:

- Patio como elemento de extracción
- Atrio
- Patinillo
- Conducto vertical, efecto chimenea
- Exutorio
- Forma de la cubierta
- Compartimentación de espacios
- Chimenea térmica solar
- Ventanas
- Persianas
- Permeabilidad de los cerramientos
- Rejilla de ventilación exterior
- Túnel de viento
- Compartimentación interior

Conociendo las características específicas del clima de la población de estudio, hay varias medidas consideradas de clima templado que no serían del todo eficaces; como el **patio** — funciona mejor en clima continental del interior de Galicia—, la **permeabilidad de los**

cerramientos —puesto que ante los vientos y la humedad se busca la estanqueidad— o el **túnel de viento** —ya que el aire no fluye de manera constante y en la misma dirección y el clima seleccionado no es seco—.

El **atrio** es un patio interior con cubierta de vidrio que ventila e ilumina el interior. Controlando las aberturas ubicadas en la zona alta del atrio, se fuerza la circulación del aire por efecto de tiro térmico al salir el aire caliente al exterior. Las aberturas deben sobresalir por encima de la última planta para que sea eficaz en zonas de mayor altura, así como suficiente dimensión y ubicarse a sotavento.

El **patinillo** extrae el aire por diferencia de densidades a través de un espacio pequeño de gran altura, desde la parte inferior por medio de conductos se dirige hacia zona de cubierta ubicada en área de presiones negativas.

La ventilación por un **conducto vertical** está basada en la diferencia de densidades, aumenta la capacidad de succión según se aumente la altura y la diferencia de temperatura. El efecto chimenea [Fig. 47] depende de la flotabilidad del aire y funciona siempre que la diferencias entre las temperaturas interior y exterior supere los 2 °C

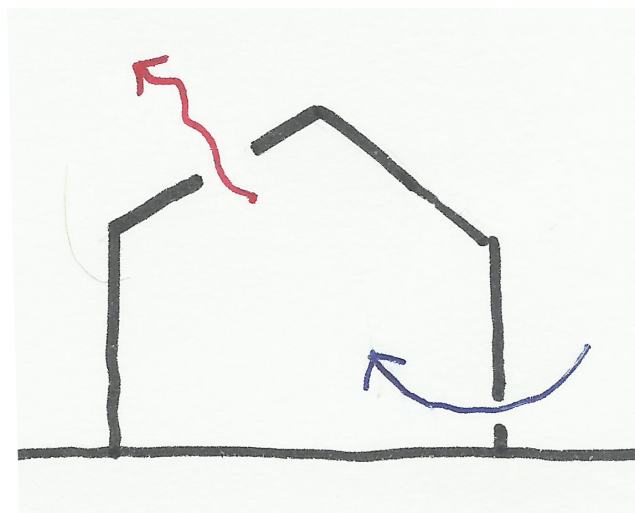


Figura 47. Principios de ventilación por efecto chimenea. Fuente: elaboración propia (2019)

El **exutorio** fundamenta la ventilación a través de aberturas en la cubierta ubicadas en zona de presión negativa. Al extraer el aire caliente acumulado se generan succiones capaces de introducir aire desde la parte inferior.

La **forma de la cubierta** [Fig. 48] puede favorecer la circulación del aire caliente ascendiendo hasta la abertura de extracción y sustituyendo el aire por otro renovado procedente de niveles inferiores

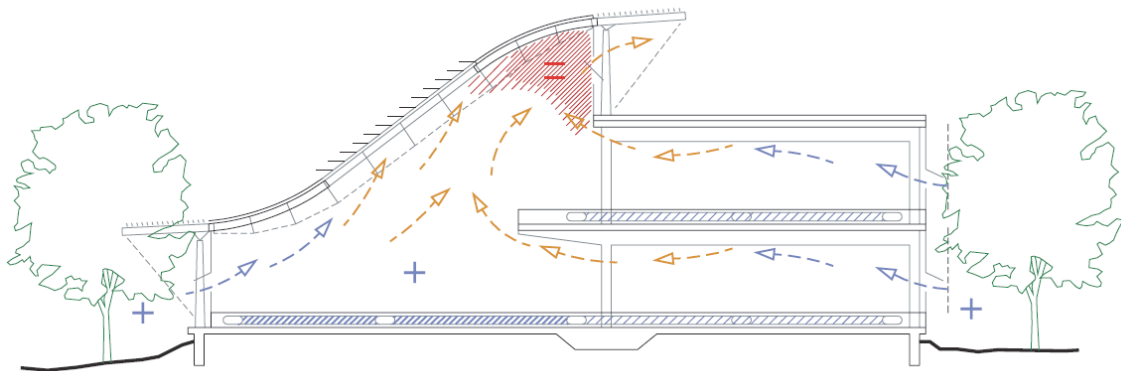


Figura 48. Principios de ventilación natural favorecido por la forma de la cubierta. Fuente: (Velasco Roldán 2011)

La **compartimentación interior** de plantas y secciones abiertas permiten la ventilación.

La **chimenea térmica solar** funciona igual que la chimenea de extracción de humos, pero elimina el aire caliente. Para facilitar la salida, la chimenea [Fig. 49] tiene expuesta al sol un tramo que ayuda a crear succión por recalentamiento.

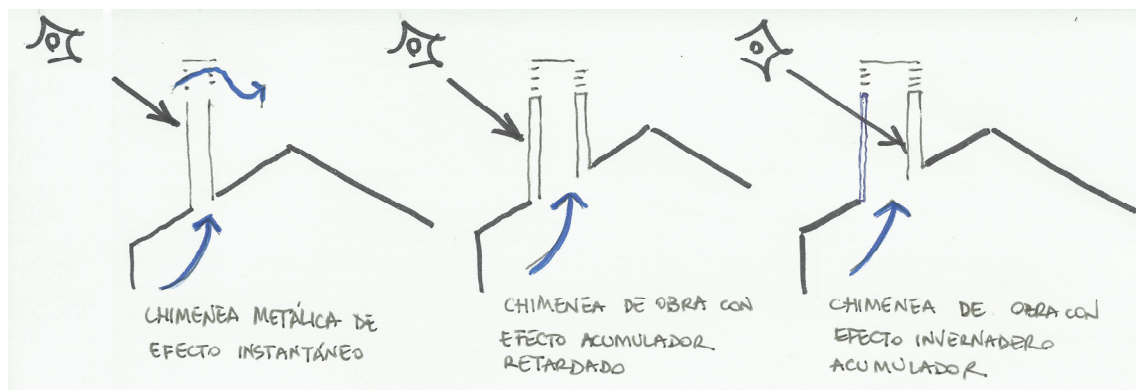


Figura 49. Ventilación natural con chimenea térmica solar. Fuente: elaboración propia (2019)

Las **ventanas** son el componente por excelencia para la ventilación natural por presión dinámica del viento. Las diferentes formas de abertura, —guillotina, corredera, batiente, pivotante, abatible, de lamas, de cubierta— su posición y dimensiones caracterizarán la circulación del aire.

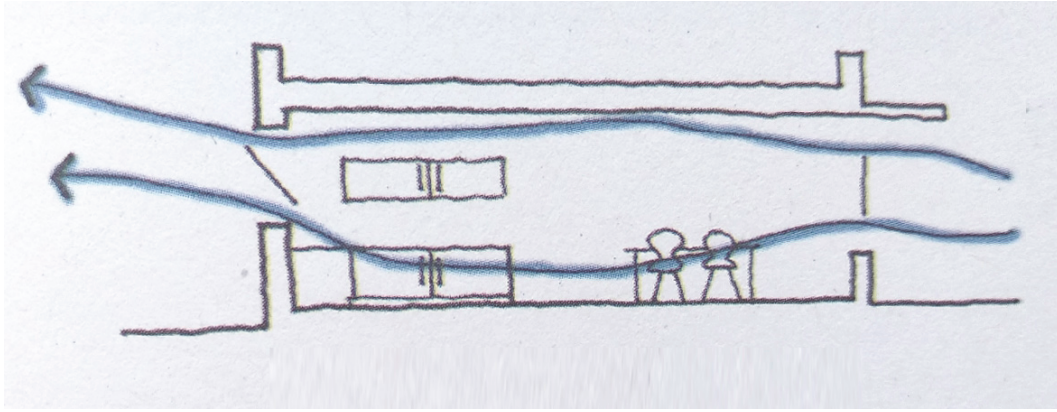


Figura 50. Ventilación a través de ventanas. Fuente: (Heywood 2012)

La **persiana** es un elemento que ayuda a controlar la ventilación ya que, dependiendo de su porosidad, variará el volumen de aire de entrada.

Con las **rejillas de ventilación** instaladas en la fachada —evitando la apertura de ventanas— se puede conseguir una circulación de aire continua. En zona de costa el aire que entra por estas rejillas o por las de gas, de ventanas o de las ventilaciones de baños, suele ser mayor de lo deseable. Por ello en invierno se puede regular con rejillas móviles bien a motor o manuales, además de evitar un punto crítico en cuanto a aislamiento acústico.

Se escogerá una u otra opción o combinaciones dependiendo de la orientación, ubicación, entorno y de los caudales necesarios correspondientes a la vivienda. Con este estudio se pueden optimizar las necesidades de ventilación que garanticen la calidad ambiental y también repercutir positivamente en la reducción de la demanda energética.

9.2 REGULACIÓN DE LA HUMEDAD

La zona de estudio tiene una humedad media del 80% y controlarla en el interior de la vivienda resulta complicado cuando además nuestras actividades diarias añaden humedad a ese aire interior, por lo que es imprescindible el uso de mecanismos de regulación de la misma.

En general, hay bastante investigación sobre regulación pasiva de la temperatura, sin embargo, el enfoque en cuanto a la regulación pasiva de la humedad es menos común.

Para la mayoría de los materiales de construcción es habitual conocer las propiedades térmicas, pero no sus propiedades higroscópicas y su comportamiento frente a la humedad. Cuando los materiales de construcción están en contacto con el aire interior, tienen cierta capacidad para moderar las variaciones de humedad interior.

Para caracterizar esa capacidad de amortiguación de humedad de los materiales se define una cantidad estandarizada denominada MBV²¹.

²¹ MBV: Moisture Buffer Value, indica la cantidad de agua que es transportada dentro y fuera de un material por área de superficie abierta, durante un cierto periodo de tiempo en el que se aplican variaciones en la humedad relativa del aire que le rodea [g/m²%HR].

Este estándar se ha utilizado para analizar el rendimiento de humedad en diferentes materiales [Fig. 51] lo que permite su categorización (Rode et al. 2006)

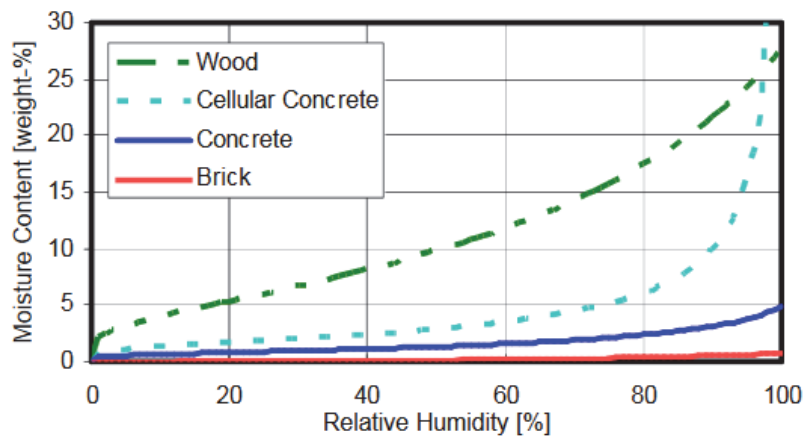


Figura 51. Curvas de sorción de diferentes materiales típicos en construcción. Fuente: <https://portal.research.lu.se/portal/files/6366616/1003621.pdf>

Cuando el material posee un MBV alto, significa que permite absorber más humedad cuando la humedad relativa sea mayor y liberar más humedad al medio cuando los valores de humedad relativa son más bajos; es decir, a mayor MBV mejor amortiguador de la humedad en ambiente interior, por ejemplo, los tableros de madera de píceas y de abedul o el hormigón celular [Fig. 52].

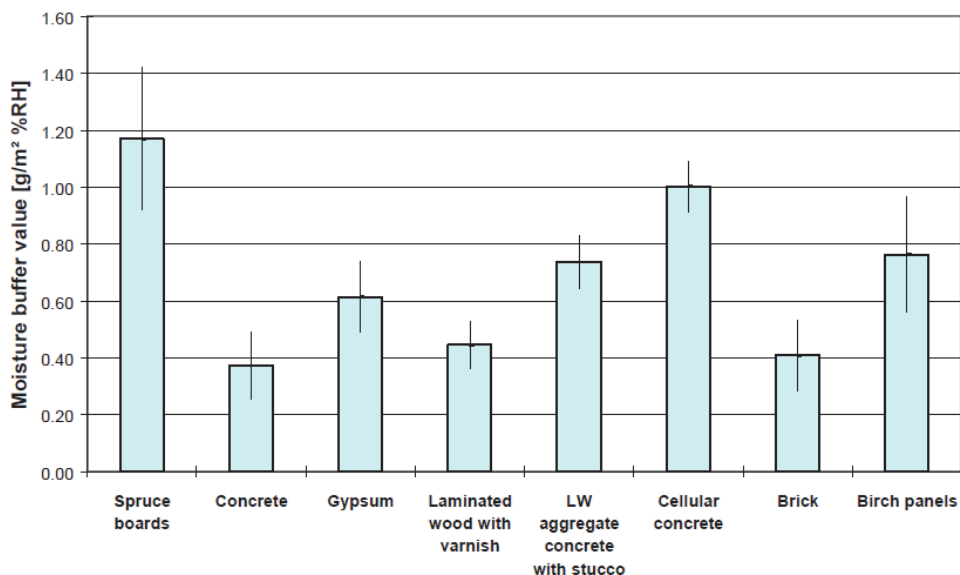


Figura 52. Comparación del MBV de 8 materiales. Fuente: (Rode 2005)

Se asumen las condiciones normales de flujo de aire interior con una velocidad del aire de 0.05-0.15m/s y exposiciones de humedad de 8h a 75% y 16h a 33%. El proyecto Nordtest ofrece también el protocolo de pruebas que indica cómo se deben analizar los materiales. (Rode et al. 2006)

Sin embargo, cuando hay un contenido de humedad alto o si el material está recubierto, la capacidad de amortiguación de humedad de ese material puede ser insuficiente y no se consigue el adecuado control de la humedad y por tanto del confort interior.

En este sentido resulta muy interesante analizar materiales de construcción que puedan regular la humedad para conseguir un ambiente saludable y no depender de instalaciones como sistemas de climatización o deshumidificadores.

MATERIALES REGULADORES DE HUMEDAD RELATIVA

El bienestar de los ocupantes y la calidad de aire interior se han convertido en parámetros importantes para la selección de materiales de construcción y para su uso interior, de manera que varias investigaciones examinan las posibilidades y características de los materiales en cuanto a sus propiedades higrotérmicas.

En general, los materiales naturales con estructura de poro abierto son los más higroscópicos: revocos de cal, de arcilla, de cáñamo o el yeso; la madera maciza y los tableros de virutas, la celulosa y las fibras naturales. Los revestimientos y mobiliario de estos materiales pueden jugar un papel importante en la regulación de la humedad interior.

Existen diversos análisis acerca de materiales con bajo impacto ambiental y buenas propiedades higroscópicas, como la tierra, así como publicaciones sobre materiales biológicos a base de fibras de bambú, de palmera datilera o cáscara de arroz. Sin embargo, para contribuir a la sostenibilidad, se debe pensar en los materiales que sean más similares a los empleados en la zona de estudio o a investigaciones cuyas condiciones climáticas sean parecidas a las de la ubicación seleccionada y que tengan en cuenta el MBV en su estudio.

Los materiales de madera que almacenan y liberan la humedad ayudando a regular el ambiente interior de forma natural, se ejemplifican en la investigación realizada sobre la influencia del **recubrimiento de un panel de *Pinus Sylvestris L.*** en la capacidad de regulación de la humedad. El estudio presenta los resultados de experimentos realizados en paneles de pino escocés recubierto, revelando el gran impacto que tiene el recubrimiento en la capacidad reguladora del panel. El intercambio de humedad entre el ambiente interior y el material de madera se limita a pocos milímetros detrás de la interfaz aire-madera. (Hameury 2007)

Otro estudio se centra en la capacidad higroscópica de tres materiales: el abeto noruego no tratado *Picea Abies*, el panel de yeso no revestido y el hormigón, bajo varios protocolos de humedad dentro de una caja de prueba simulando un espacio interior. La temperatura superficial debida al aumento de la humedad relativa se mostraba más alta en el **abeto noruego y en el panel de yeso**, por lo que su selección ante el hormigón implica una mayor capacidad de regulación de humedad y por tanto una menor demanda de ventilación del ambiente. (Charisi et al. 2016)

También se evalúa el comportamiento del **tablero de fibra de media densidad modificado con cáscara de nuez**, demostrando que, gracias a la microestructura porosa de los dos materiales y de la composición química, se puede regular la humedad relativa además de la eliminación de formaldehídos en ambientes interiores. (Da Silva et al. 2017)

Siguiendo en la línea de la arquitectura pasiva y considerando que la capacidad de amortiguación de humedad de los materiales de construcción es insuficiente, algunos investigadores se enfocan en integrar desecantes pasivos en los materiales de construcción, buscando una combinación de materiales comunes para facilitar su adquisición y la integración en edificios actuales. Por ejemplo, un caso de estudio se centra en el yeso, material muy empleado en construcción, con un MBV de 0.61 g/m²%HR —nivel moderado según la clasificación [Fig. 53]—, y por otro lado en el cloruro de calcio como desecante doméstico. Así pues, experimentan con un sistema de deshumidificación que consiste en un **panel compuesto de yeso y de sal de cloruro cálcico**. Llevados a cabo los ensayos, con humedades del 75-76% establecen efectiva la capacidad de deshidratación de la sal y la viabilidad del panel como regulador de humedad en recubrimientos de interiores consiguiendo reducir un 10% y 15% la humedad relativa, según la densidad del yeso del panel (Melero, García y Neila 2015). Otro aspecto a tener en cuenta en un revestimiento de **yeso** es el grosor óptimo para poder amortiguar la humedad el aire interior, ya que estudios demuestran que a partir de un espesor determinado no aumenta la capacidad de regulación de humedad. (Maskell et al. 2018)

MBV _{practical} class	Minimum MBV level	Maximum MBV level
	[g/(m ² % RH) @ 8/16h]	
Negligible	0	0.2
Limited	0.2	0.5
Moderate	0.5	1.0
Good	1.0	2.0
Excellent	2.0	...

Figura 53. Rangos de clasificación de MBV. Fuente: (Rode 2005)

Además, se plantean casos de estudio de **revestimientos continuos de varias capas**, la primera con características de barrera de vapor —aceite de linaza hervido, emulsión bituminosa sin polímero y la imprimación epoxi con cemento— y una segunda capa higroscópica —revestimiento de yeso— para poder regular la humedad relativa en ambientes interiores. La adherencia entre las dos capas consiste en una película impermeable al vapor con un producto adhesivo comercial. A pesar de que las simulaciones realizadas no ofrecieron diferencias significativas en cuanto a la aplicación o no aplicación del revestimiento, ni el efecto de la barrera de vapor comparado con la solución tradicional de aplicación de la misma en la cámara de aire, esta experimentación sienta las bases de estudios para encontrar soluciones naturales con capas de aceite de linaza hervido y revestimientos de yeso con aditivos naturales, sin recurrir a una adherencia sintética. (Coutinho Mesquita 2012)

Un material típico en construcción y empleado en arquitectura gallega —véase la tabla de técnicas constructivas y materiales de la arquitectura popular— es la **cal**. Además de los revocos de cal se investiga acerca de las propiedades de combinar por ejemplo el **cáñamo y la cal**, tanto en revocos (Mazhoud et al. 2016) como en hormigones (Moujalled et al. 2018), capaces de tener un gran rendimiento en cuanto a la amortiguación de humedad.

También los paneles de **cañamo con almidón de trigo** como aglutinante, cuyos resultados de la experimentación demostraron que puede usarse para mejorar el confort higrotérmico en interiores al amortiguar las variaciones de humedad relativa. (Maalouf et al. 2015)

Las nuevas líneas de investigación se centran en materiales específicos que incorporan desecantes de sílice y zeolitas²², materiales con poliacrilato de sodio cuyo MBV de 8,97 g/m²%, materiales con celulosa con MBV de 3,07 g/m² % [Tabla 9] o materiales que combinan la gibbsita²³ con minerales de arcilla (Marco 2014) cuyos resultados experimentales han sido satisfactorios en revestimientos interiores para asegurar el control de la humedad además de absorber formaldehídos.

MATERIAL	AHR [%]	CICLOS	MBV [g/m ² %]	CLASIFICACIÓN
Poliacrilato de sodio	33-75	8-16h	8,97	EXCELENTE
Celulosa	33-75	8-16h	3,07	
Enlucido de yeso (sin pintar)	65-75	12-12h	2,7	
Enlucido de cemento (sin pintar)	65-75	12-12h	1,61	BUENO
Cerámica puzolánica autoclavada	33-75	8-16h	1,34	
Enlucido de yeso	65-75	12-12h	1,30	
Placa de yeso laminado	65-85	12-12h	1,25	
Enlucido de yeso	65-85	12-12h	1,13	
Tablero de abeto	33-75	8-16h	1,16	
Yeso	33-75	8-16h	1,06	
Hormigón celular	33-75	8-16h	1,04	
Madera de abedul	33-75	8-16h	0,85	
Enlucido de cemento (pintura común 1 / pintura común 2)	65-85	12-12h	0,815 / 0,765	
Hormigón de áridos ligeros estucado	33-75	8-16h	0,75	
Madera contrachapada	33-75	8-16h	0,73	

²² Zeolitas o ceolitas, mineral microporoso utilizado como adsorbente y catalizador.

²³ Gibbsita: mineral de hidróxido de aluminio.

Ladrillo	33-75	8-16h	0,48	LIMITADO
Madera laminada barnizada	33-75	8-16h	0,46	
Hormigón	33-75	8-16h	0,38	
Perlita	33-75	8-16h	0,08	

Tabla 9. Valores de MBV de materiales de construcción y su clasificación según el proyecto Nordtest.

Fuente: modificado de (Higuero et al. 2016)

9.3 ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES

Actualmente existen varias tecnologías que pueden purificar el aire de ambientes interiores, algunas en fase experimental y otras disponibles en el mercado. Entre las más comunes se encuentran: la filtración, la radiación ultravioleta, los purificadores de aire electrónicos, la adsorción, la ozonización, el control de la presurización y la oxidación avanzada.

La **filtración**, consiste en emplear filtros de fibra de vidrio, algodón y materiales sintéticos que recogen la materia particulada. Por ejemplo, los HEPA²⁴ que captan partículas de 0,3 micras, aunque no eliminan los COVs y se suelen utilizar en ambientes industriales u hospitalarios. La desventaja que tiene este sistema es que los filtros tienen que ser renovados para que no se acumulen microorganismos y moho; aunque este inconveniente se soluciona incorporando lámparas de luz UV para inactivar los microorganismos.

La **radiación ultravioleta**, se fundamenta en la radiación solar de rango 225-302nm²⁵ que es letal para los microorganismos, denominada radiación ultravioleta germicida (UVGI) que se usa en áreas pequeñas —techos, paredes o en conductos de aire—. La radiación UVC²⁶ que emiten las lámparas germicidas comerciales dañan el ADN de los microorganismos evitando que se repliquen. La limitación de esta tecnología es que puede producir daños en ojos y piel de las personas, por lo que no debe realizarse una exposición directa ante este método.

Los **purificadores de aire electrónicos**, son precipitadores electrostáticos que atrapan partículas cargadas a causa de una atracción electrostática. El aire pasa por la zona de ionización, las partículas se cargan con electricidad que, al atravesar por la zona de retención, quedan capturadas en una placa con carga eléctrica opuesta. Se utiliza a nivel industrial y su inconveniente es la complicada limpieza de las placas colectoras y la posible producción de ozono, tóxico para el ser humano.

La **adsorción** consiste en pasar el aire por medio de fibra de carbón activo (ACF) silicagel²⁷ o zeolitas para retener los contaminantes. Son capaces de retener COVs y son de larga duración si se regeneran periódicamente; sin embargo, no es eficaz para eliminar formaldehídos.

²⁴ HEPA: High Efficiency Particulate Air

²⁵ nm: nanómetro, equivale a la millonésima parte de un milímetro.

²⁶ UVC: radiación ultravioleta C. Radiación cuya longitud de onda es de 100-280nm y la que tiene más energía asociada.

²⁷ Silicagel o gel de sílice es el producto absorbente en forma granular y porosa del dióxido de silicio.

El método de **ozonización** consiste en eliminar los contaminantes químicos y biológicos con el ozono ya que es un fuerte oxidante, con la limitación de que este gas es perjudicial para la salud del ser humano y se pueden provocar reacciones entre el ozono residual y COVs produciendo aldehídos u otro tipo de componentes. La intención de los sistemas de desinfección que utilizan ozono es reducir las concentraciones de contaminantes a niveles ambientales o inferiores.

El **control de la presurización** se emplea en zonas donde se trabaja con patógenos y en salas de aislamiento, con el uso de una presión positiva se evita que los microorganismos vayan de un espacio a otro.

Los **procesos de oxidación avanzada** (POAs) se fundamentan en cambiar la estructura química del contaminante a través de procesos fisicoquímicos, siendo la **fotocatálisis** uno de los procedimientos más investigados y utilizados para tratar el aire. Este método se basa en el principio de descontaminación que se lleva a cabo en la propia naturaleza, a través de una reacción fotoquímica basada en la oxidación, transforma un contaminante orgánico e inorgánico tóxico en sustancias nocivas, a través de la energía solar o artificial.

La reacción fotoquímica transforma la energía solar en energía química en la superficie de un catalizador —el más utilizado es el dióxido de titanio (TiO₂)—, un material semiconductor que acelera la velocidad de las reacciones de oxidación y de reducción. De manera que se pueden eliminar CO₂ para generar materia orgánica, así como otros contaminantes como NOx, SOx, COVs, CO, formaldehído, compuestos orgánicos clorados o compuestos poli aromáticos. (Asociación Ibérica de la fotocatálisis [sin fecha])

El inconveniente de este método es la posible formación de otras especies químicas, resultado de oxidaciones incompletas, que puedan ser más tóxicos que los contaminantes iniciales. A pesar de ello, sigue siendo una solución eficaz y viable para la desinfección de contaminantes interiores. (Sánchez Muñoz 2013) Su eficiencia va a depender de:

- El tipo de contaminante, siendo más sensibles dentro de los microorganismos los virus, seguidos de las bacterias y de los hongos.
- El rango de concentración del mismo.
- La humedad, siendo más eficaz con altas humedades por la posición de hidroxilos —un átomo de oxígeno y otro de hidrógeno— en la superficie.
- La temperatura, que aumenta o disminuye la humedad relativa.
- El tiempo de residencia, que es el tiempo que tarda una partícula en pasar del reactor hasta la salida. Será más eficaz cuanto mayor tiempo estén en contacto los contaminantes con el catalizador.

Se han realizado investigaciones para la desinfección del aire con reactores de recirculación de aire colocados en sistemas de climatización. También, estudios sobre la mejora de las instalaciones basadas en la fotocatálisis con equipos en ambulancias, vehículos funerarios o de rescate para evitar olores, contaminación química, biológica y de alérgenos como ácaros o polen. Una de las líneas interesantes de esta tecnología es analizar las posibilidades de aplicar este método a los materiales de construcción por sus ventajas ante otras técnicas convencionales:

- Transforman químicamente el contaminante.
- En general oxida completamente el contaminante.
- Pueden tratar bajas concentraciones de contaminantes.
- Sirve para desinfección, reduciendo la concentración de compuestos.
- Consumen menos energía que otros métodos.
- Velocidad de oxidación alta por el radical hidroxilo (HO[•]) es el oxidante más energético después del flúor.
- El uso de la técnica solar supone un ahorro de economía en cuanto a energía y medioambiente. En climas soleados, como nuestro caso con un índice de radiación solar²⁸ alto (UV = 8), es fácil la activación de fotocatalizador por rayos UV.
- La posibilidad de uso con luz artificial se traduce en poder usar una sola longitud de onda, escogiendo la que más excite al fotocatalizador.

(Lisbona García 2016)

Por otro lado, tal y como explican Rojo et al. (2012) los métodos en experimentación son la separación de membranas, la oxidación enzimática, la purificación botánica y los métodos de filtración biológicos.

La **separación de membranas** consiste en pasar los contaminantes COVs, a través de una membrana y trasladarlos a un fluido, con el inconveniente de que no elimina el contaminante, sino que simplemente lo transfiere.

La **purificación botánica** se trata de eliminar los contaminantes gracias a microorganismos que se desarrollan en ciertas plantas, aunque estas necesitan del espacio para poder desarrollarse.

La **oxidación enzimática** se basa en pasar los contaminantes por una fase acuosa donde se destruyen gracias a la acción de enzimas, el inconveniente es la eficacia limitada que existe por la solubilidad en fase acuosa.

Los **métodos biológicos** se fundamentan en la capacidad de los microorganismos en usar los contaminantes como fuentes de carbón, nutrientes y/o energía y así destruirlos mediante enzimas. La ventaja de la completa eliminación y no transferencia de contaminantes y su economía se contraponen a las limitaciones del tratamiento simultáneo de los contaminantes y por la necesidad del mantenimiento de la biomasa.

A continuación, se presenta como medida pasiva la aplicación de la fotocatálisis en materiales de construcción.

²⁸ Índice de radiación solar (índice UV) es el indicador de la intensidad de radiación ultravioleta del sol en la superficie terrestre, siendo riesgo bajo un valor de <2, moderado 3-5, alto 6-7, muy alto 8-10 y extremadamente alto >11. Los valores máximos de UVI entre 9 y 11 son comunes en la Península Ibérica al mediodía de los días despejados de verano, siendo nivel alto 8 en la zona de estudio en esas condiciones (AEMET)

MATERIALES FOTOCATALÍTICOS

Como se ha indicado anteriormente, la fotocatalisis es un proceso de descontaminación simple, basado en la fotogeneración de especies oxidantes reactivas que actúan sobre un grupo de contaminantes, tanto en aire como en el agua.

La técnica sigue en continuo estudio y desarrollo, sin embargo, se han determinado las pruebas realizadas con las partículas de TiO_2 , como satisfactorias para otorgar unas propiedades antibacterianas, activándose simplemente con la iluminación interior. Incluso en laboratorio se ha experimentado y resaltado la acción de las partículas en la oscuridad. (Verdier 2016)

Hacia finales de los '70 se empezaron a aplicar las nanopartículas del TiO_2 en materiales de construcción para descontaminar el aire, para crear un efecto auto-limpieza y para tratar el agua, además de demostrar propiedades antivirica, antibacteriano, anti hongos, desodorizante, anti polvo y reductor del efecto albedo²⁹.

El uso de este semiconductor, TiO_2 , es debido a su fuerte poder oxidante bajo radiación ultravioleta cercana, su estabilidad química ante compuestos ácidos y básicos, su inercia química en ausencia de luz ultravioleta y su ausencia de toxicidad (Cassar 2004). Sin embargo, tiene ciertas limitaciones: el titanio como materia prima también se consume en gran cantidad en la aeronáutica y el dióxido de titanio como pigmento para la industria del papel, pintura o plásticos; por lo que puede haber un problema de disposición de recursos —el reciclaje de titanio aún está en una situación temprana—. (Verdier 2016)

Los materiales basados en TiO_2 son variados y se pueden aplicar tanto en exterior como en interior. Aunque, cumpliendo con el interés de este estudio, se prestará atención a aquellos que se puedan utilizar en ambientes interiores.

Entre ellos, uno de los materiales más empleados en construcción es el **cemento**, y por ello, diversos grupos comerciales tienen patentados materiales a base de cemento con el principio activo de la fotocatalisis, como en pinturas o morteros. (Laplaza Guerra 2011) Estos materiales de acabados de **cemento, hormigón y mortero** fotocatalíticos tienen las propiedades suficientes para descontaminar el aire de los NO_x y parte de los COVs, amoníacos y aldehídos. (Cassar 2004) (Lisbona García 2016)

No obstante, hay que tener en cuenta ciertas limitaciones: los rendimientos van a depender de la iluminación y de la disponibilidad de las partículas, se pierde cierta cantidad de catalizador en la masa del material (Verdier 2016), la durabilidad es reducida cuando se acumulan los contaminantes en la superficie, las superficies lisas mantienen la actividad constante frente a las rugosas, a pesar de que en un inicio tienen mayor actividad y los materiales que contienen cenizas volantes de sílice suelen ser más activos. (Lisbona García 2016)

Incluso el **mobiliario** de interior [Fig. 54] se puede realizar con compuestos fotocatalíticos de mortero a base de cemento con arenas, fibras y aditivos.

²⁹ Efecto albedo: la radiación que refleja la superficie respecto a la radiación que incide sobre ella. Cuanto más oscura sea la superficie, menor valor de albedo.



Figura 54. Cocina con cemento fotocatalítico de Italcementi Group. Fuente: (Lisbona García 2016)

La aplicación de las partículas de TiO_2 sobre los materiales **cerámicos**, se inició en Japón a comienzos de los 90, con azulejos con propiedades antibacterianas y desodorizantes. Además de aportar estas características útiles para su uso en baños o cocinas, se generan cerámicas con propiedades antisépticas, eliminando un 70% de los contaminantes orgánicos e inorgánicos — NO_x , SO_x y el CO —; de autolimpieza —crea una capa invisible de agua para evitar que la suciedad se fije a la superficie— además de poder aportar una alta resistencia al rayado. (Galindo Llorach 2008) (Lisbona García 2016)

Por ejemplo, el gres cerámico esmaltado con producto fotocatalítico, es un material poco poroso, fácil de limpiar y de mantener y se puede usar, además de en exteriores, en revestimientos interiores [Fig. 55]



Figura 55. Pavimento de gres fotocatalítico de 120 x 60cm. Fuente: (Lisbona García 2016)

Los análisis sobre los **recubrimientos** basados en la fotocatalisis que se pueden aplicar en materiales a base de **madera** permiten, gracias a las propiedades de las nanopartículas de TiO₂, la autolimpieza, la descontaminación, que no se adhiera la suciedad e incluso que aumente la resistencia al fuego. (Blanchet y Landry 2015) (Harb, Locoge y Thevenet 2018)

Dentro de la aplicación de esta tecnología en materiales, se desarrolla la creación de un **yeso** fotocatalíticamente activo. El TiO₂ modificado con carbono, junto a un aglutinante, se activa con la luz visible de manera que es capaz de limpiar de contaminantes del aire. A pesar de que depende de la dosis y de la porosidad del yeso, el hecho de que sea activado en condiciones ambientales con luz visible se presenta como una ventaja para la limpieza del aire interior. (Yu y Brouwers 2013)

Otro material empleado, bajo este proceso, son las **pinturas**, capaces de reducir los contaminantes del aire, los olores y evitar la germinación de bacterias y hongos. Además de su uso en ambientes que prestan especial atención a la salud como hospitales y residencias de ancianos, en escuelas o en lugares con olores como en cuartos de basura o granjas de animales, en el ámbito doméstico es muy útil si alguno de los usuarios padece ultrasensibilidad a químicos, ya que se ha comprobado que con la fotocatalisis se mejora la calidad de vida. (Lisbona García 2016) En general, para que estos revestimientos tengan la mayor eficacia, la distribución de las mismas debe ser lo más homogénea posible.

Desarrollar recubrimientos superficiales tiene la ventaja de poder economizar las cantidades de fotocatalizadores accesibles como, por ejemplo, algunas pinturas o el vidrio autolimpiante (Verdier 2016). No obstante, los vidrios autolimpiables funcionan por la acción combinada de la luz del sol y la lluvia, por lo que la descomposición de la suciedad y la limpieza se realiza por el exterior, sin que signifique necesariamente una mejora del ambiente interior.

El **textil** de hogar con un recubrimiento fotocatalítico de TiO₂, bien por inmersión en el producto o bien aplicado con un difusor en la superficie, permite descomponer la suciedad, disminuir los olores y los gases tóxicos del ambiente.

Como se ve, esta tecnología está provocando un rápido aumento en productos y materiales, y por esto es adecuado que la actividad fotoquímica del producto y su estándar estén aceptados internacionalmente. Por esto, los organismos internacionales —ISO, UNI, JIS—³⁰, europeos —CEN³¹— y nacionales —AENOR³²—, están desarrollando normas de ensayo para determinar esta actividad. (Laplaza Guerra y Hernando Castro 2013)

³⁰ ISO: Organización Internacional de Normalización.

UNI: Nazionale Italiano di Unificazione.

JIS: Japanese Industrial Standards.

³¹ CEN: Comité Europeo de Normalización.

³² AENOR: Agencia Española de Normalización y Certificación.

10. MEDIDAS ACTIVAS

El estándar Passivhaus, desarrollado desde finales de los '80, es uno de los estándares de construcción más conocidos internacionalmente. Su objetivo es conseguir un control energético mediante unos componentes pasivos de arquitectura apoyados en sistemas activos energéticamente eficientes.

La elección de este estándar tiene su justificación en la simplificación de los sistemas activos de calefacción y refrigeración, ya que el edificio necesitará poca energía para conseguir el confort térmico interior³³ —limita las temperaturas operativas en invierno a ≥ 21 °C y en verano a ≤ 25.5 °C y marca la diferencia de temperatura entre superficie interior de la envolvente y la temperatura operativa del ambiente en ≤ 4.2 °C—, y en la variedad de ejemplos en los que se clarifica esta técnica.

La inclusión del capítulo de medidas activas se va a referir a la instalación concreta de ventilación ya que es una estrategia capaz de controlar la calidad del aire interior gracias a elementos pasivos como los filtros.

10.1 CRITERIOS DE ARQUITECTURA PASIVA EN EL ESTÁNDAR PASSIVHAUS

Como se indica en la guía de Wassouf (2017), según el grupo *Sustainable Building Alliance*, los consumos de energía más relevantes en uso del edificio son el consumo de energía para calefacción y refrigeración, para agua caliente sanitaria, de energía eléctrica, de agua potable y de agua no potable. Siendo los dos primeros los que más huella ecológica generan.

Así pues, el carácter pasivo de la edificación va a depender de la demanda de climatización relacionada directamente con las pérdidas de la envolvente térmica, las pérdidas por ventilación, las ganancias de radiación solar y las ganancias producidas internamente.

Teniendo en cuenta los componentes energéticos anteriormente citados y desarrollando los criterios de la arquitectura popular para satisfacer los estándares actuales de vida, confort y construcción, la edificación pasiva se centrará en los siguientes aspectos:

- La orientación, para analizar el impacto de la radiación solar y del viento sobre la envolvente.
- La compactidad.
- La protección solar.
- La calidad de la envolvente térmica opaca, atendiendo al aislamiento térmico, a la inercia térmica y a la reducción de puentes térmicos.
- La calidad de la envolvente térmica transparente.

³³ El estándar Passivhaus se basa en conseguir la mejor clasificación de confort de la Norma UNE EN ISO 7730. Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local.

- La hermeticidad al paso de aire.
- La ventilación.
- Aspectos singulares, referidos a sistemas pasivos tradicionales, métodos no vinculados a la tecnología moderna compatibles con el estándar como la torre de viento, las chimeneas solares o el muro trombe.

10.2 ESTÁNDAR PASSIVHAUS

La definición oficial del estándar Passivhaus es: «un edificio pasivo es aquel que puede garantizar el confort climático suministrando la energía de calefacción y/o refrigeración solo a través del aire de la ventilación. Este caudal de ventilación es el mínimo necesario para garantizar la higiene de la estancia interior a 30m³/h por persona en uso residencial» (Wassouf 2017)

La idea es alcanzar unos objetivos cuantitativos:

- Demanda en calefacción de ≤ 15 kwh/m² año y carga de ≤ 10 kwh/m².
- Demanda en refrigeración de ≤ 15 kwh/m² año.
- Demanda de energía primaria para calefacción, refrigeración, agua caliente sanitaria y electricidad ≤ 120 kwh/m² año.
- Estanqueidad n50 ≤ 0.6 renovaciones/h.
- Temperatura superficial interior > 17 °C.
- Sobrecalentamientos limitados.

Y también unos cualitativos:

- Confort.
- Eficiencia energética.

Para ellos los principios básicos que establecen son:

1. Aislamiento térmico, optimizando el espesor dependiendo del clima, coste y de la mejora energética.
2. Ausencia de puentes térmicos, responsables del 25% de las pérdidas de energía.
3. Hermeticidad al aire, mejorando la eficiencia en la ventilación mecánica y mejorado la acústica.
4. Ventilación mecánica con recuperador de calor, que garantiza el caudal de aire fresco y fija el límite de demanda de calefacción y refrigeración.
5. Ventanas y puertas de altas prestaciones, con carpinterías de baja transmitancia térmica y ventanas de doble y triple vidrio.

10.3 VENTILACIÓN

Uno de los cinco criterios a seguir en el estándar Passivhaus es asegurar la ventilación para conseguir una calidad higiénica en el interior y extraer los agentes que puedan ser nocivos al exterior. Por ello, el estándar establece las ventajas y limitaciones de cada una de las diferentes maneras: ventilación natural, híbrida y controlada de doble flujo.

VENTILACIÓN NATURAL

Como ya se ha visto en el apartado anterior 9.1 la ventilación natural puede ser cruzada, basada en diferencia de presión del viento —eficaz en climas tropicales y subtropicales— o por estratificación, basada en diferencias de temperaturas verticales —eficaz en lugares donde baja la temperatura por la noche— [Fig. 56].

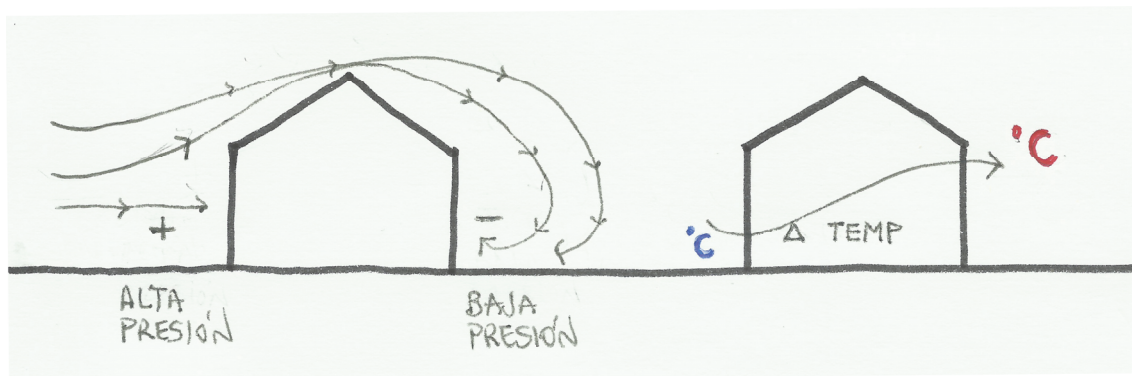


Figura 56. Esquema de ventilación natural basada en diferencia de presión (izquierda) y en diferencia de temperatura (derecha). Fuente: elaboración propia (2019)

A pesar de ser una forma de ventilación fundamental en períodos cálidos, con enfriamiento nocturno del aire exterior, puede no ser suficiente para la renovación de aire requerida. El estándar plantea las limitaciones usuales de la ventilación natural como la contaminación acústica, la polución del ambiente exterior, la posible falta de viento para la renovación de aire, la presencia de lluvias y tormentas, la seguridad y la no practicidad para el usuario que se debe hacer responsable de la gestión de la ventilación natural diaria —ya que, por ejemplo, tendría que levantarse por la noche para adaptar la ventilación—.

VENTILACIÓN HÍBRIDA

Es aquella que consiste en una extracción controlada y en la admisión natural [Fig. 57].

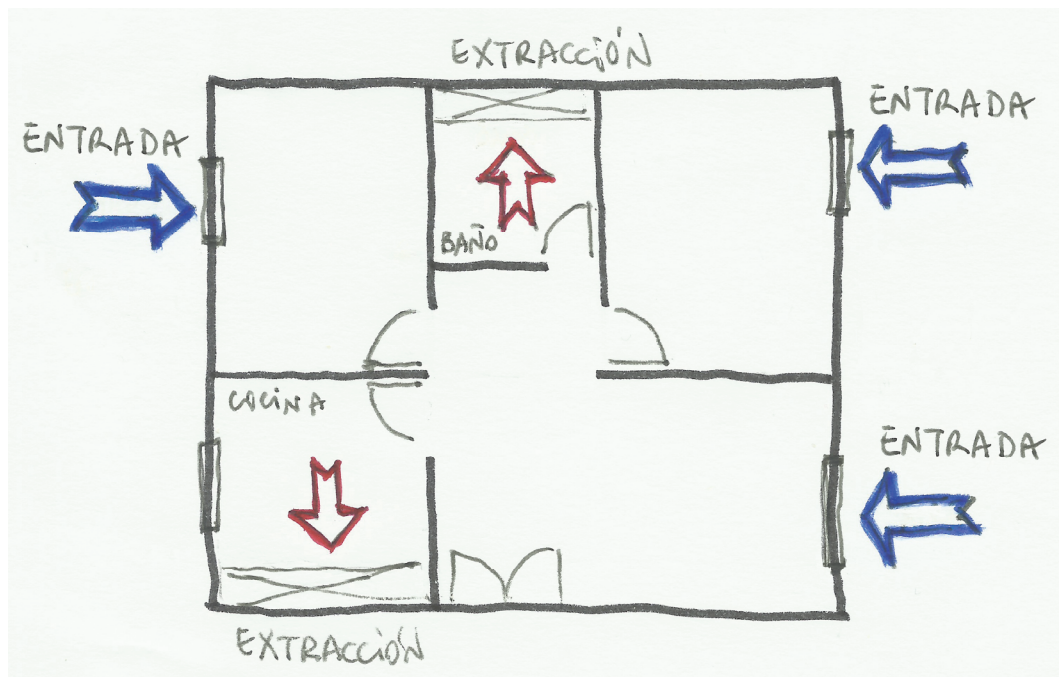


Figura 57. Esquema de ventilación híbrida en vivienda. Fuente: elaboración propia (2019)

El aire entra por los aireadores del cerramiento o a través de la carpintería por microventilación y se expulsa a través de unos ventiladores de extracción ubicados en baños y cocinas. Así se crea una depresión artificial en las estancias que garantiza la ventilación constante, pero sin poder recuperar la energía que se pierde por los conductos de extracción.

Un inconveniente en invierno o con frío es que muchos usuarios cierran las aberturas, por lo que deja de ser un sistema eficiente.

VENTILACIÓN CONTROLADA DE DOBLE FLUJO

Es aquella con admisión y extracción controlada a partir de un sistema que además puede incluir un recuperador de calor de manera que la energía del aire que se extrae pasa al aire que entra [Fig. 58].

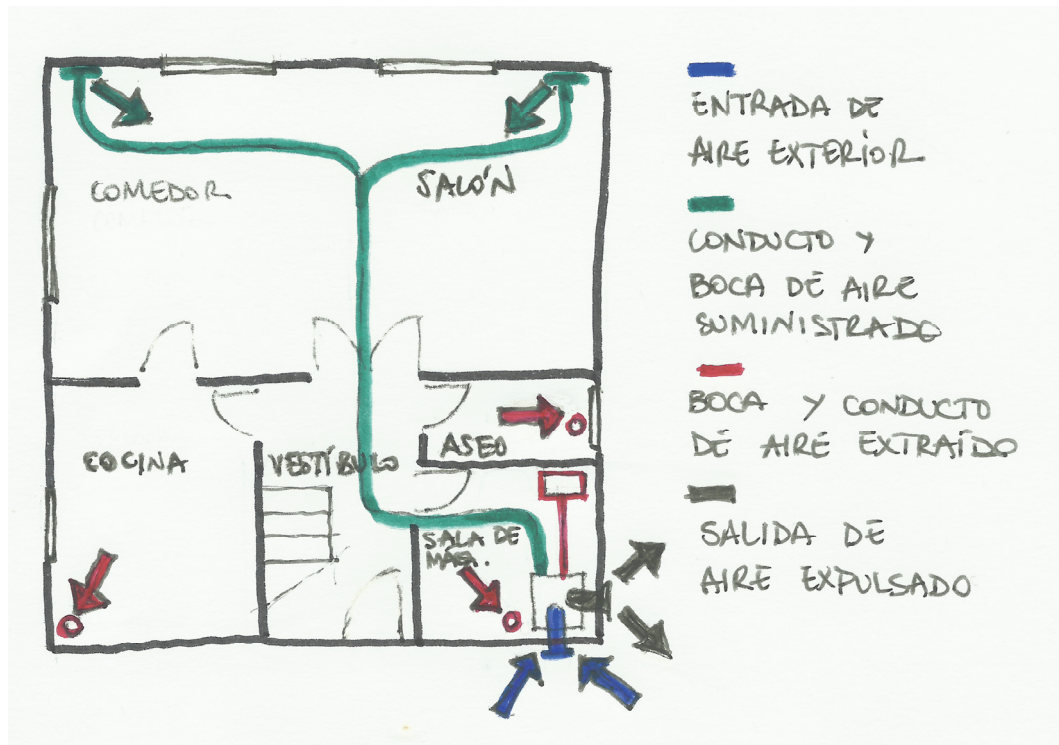


Figura 58. Esquema de ventilación controlada de doble flujo en vivienda. Fuente: elaboración propia (2019)

A pesar de que el estándar se cuestiona hasta qué punto es provechoso en cuanto a energía y economía en climas suaves, presenta una serie de ventajas cuando:

- El clima exterior es frío o muy caliente.
- Existe contaminación acústica.
- Existe contaminación atmosférica.
- Se encuentran personas alérgicas entre los usuarios.

Este tipo de ventilación asegura el nivel de higiene y el confort interior, garantizando que no se notan ni las corrientes de aire, ya que la velocidad no puede superar los 0.1 m/s, ni el ruido de los ventiladores.

De acuerdo con los análisis realizados por Passivhaus y teniendo el valor Pettenkofer³⁴ como punto de referencia para la evaluación del aire interior, la ventilación natural no es capaz de renovar el aire de CO₂ como lo puede hacer la ventilación controlada [Fig. 59].

³⁴ Max Joseph Von Pettenkofer, químico e higienista que establece la concentración de 1.000 moléculas de dióxido de carbono por millón de partes por millón de aire como punto de referencia para la evaluación de la calidad del aire interior.

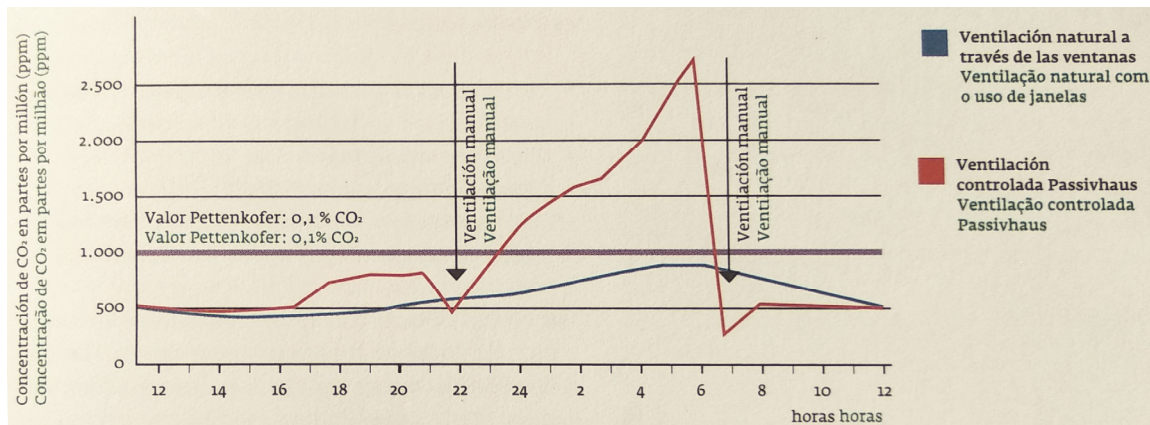


Figura 59. Comparación entre ventilación natural y ventilación controlada. Fuente: (Wassouf 2017)

Según varios análisis³⁵, una renovación de aire de $n50 \leq 0.6 \text{ h}^{-1}$ con Passivhaus, contrasta con la renovación de un edificio con ventilación mecánica $n50 \leq 1.5 \text{ h}^{-1}$ y con la de uno sin ventilación mecánica $n50 \leq 3 \text{ h}^{-1}$ —indica que el volumen interior del edificio se cambia 3 veces en una hora con una diferencia de presión de 50 pascal—.

10.4 VENTILACIÓN DE CONFORT

La ventilación controlada de doble flujo con recuperador de calor, también llamada de confort se compone de:

- Recuperador de calor con dos ventiladores y filtros de aire.
- Conductos de admisión para el aire fresco.
- Conductos de extracción para el aire viciado.
- Otros componentes opcionales como amortiguadores acústicos, batería de postcalentamiento, etc.

Uno de los ventiladores mueve el aire fresco del exterior al interior y el otro extrae el aire viciado del interior al exterior de manera que los dos caudales se cruzan sin que haya un conducto físico entre ambos [Fig. 60].

En invierno, el calor del aire interior pasa al aire frío del exterior y en verano, si la temperatura interior es más fría que la exterior, también se recupera ese frío. En caso contrario se realiza un bypass para no calentar el aire exterior antes de que entre en las estancias.

³⁵ Los datos son sacados del análisis de la normativa de distintos países, la mayoría rondan esos valores, en concreto Alemania y Austria tienen esas exigencias, sin embargo, en España no se tiene exigencia normativa de nivel de estanqueidad de envolvente referenciado al valor n50.

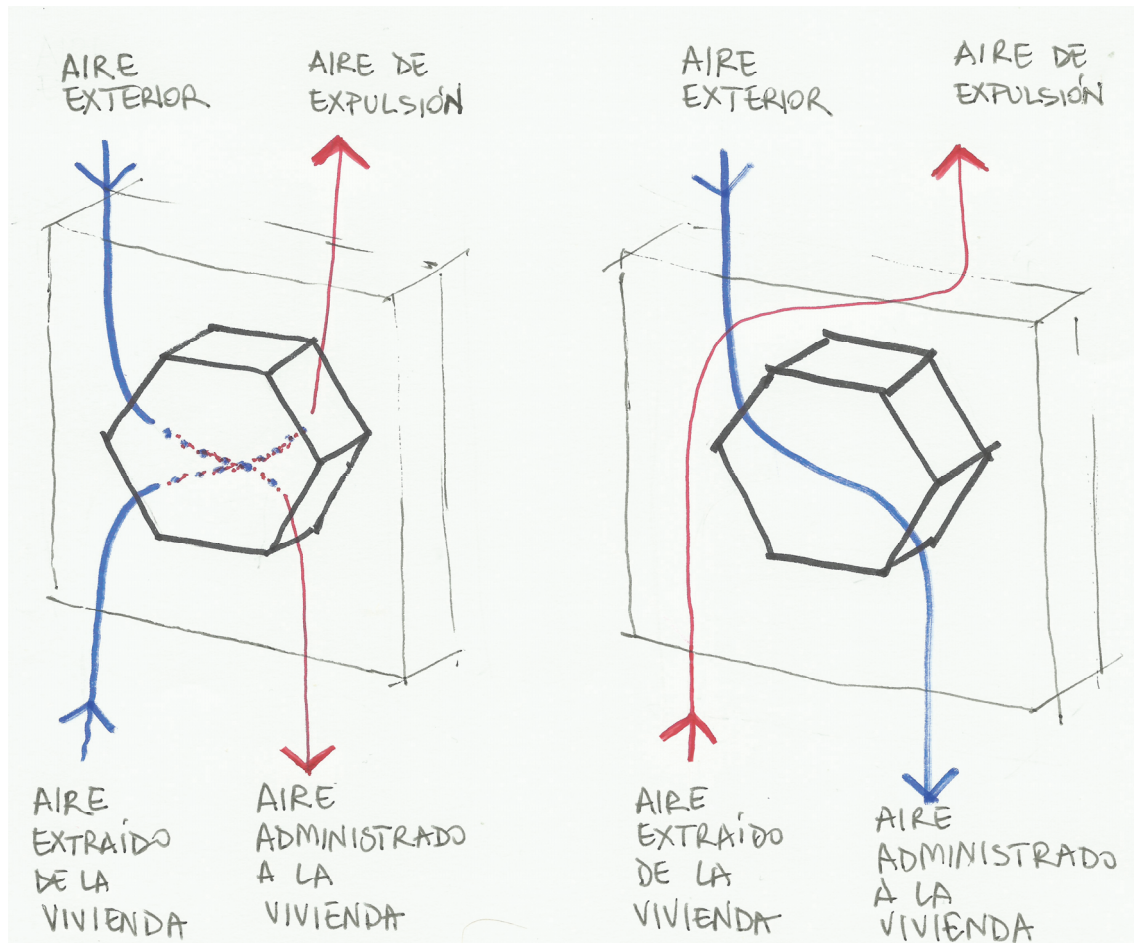


Figura 60. Principio de recuperación de calor, funcionamiento en invierno (izquierda) y verano con bypass (derecha). Fuente elaboración propia (2019)

No es objetivo describir todo el sistema y sus posibilidades, pero se resumirán ciertas particularidades para entender mejor el aspecto que se desea estudiar.

CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA

En general, el caudal de entrada de aire fresco debe ser el mismo que el de extracción, de manera que este equilibrio asegura el buen funcionamiento del recuperador de energía y reduce el volumen de aire introducido por infiltraciones. En uso residencial, el sistema debe garantizar el caudal de 30 m^3 por persona y hora.

Como se ha indicado anteriormente, el recuperador de calor es una caja compuesta de conductos que transportan el aire del interior y del exterior, sin que se mezclen, intercambiando la energía entre el flujo entrante y el saliente. Su rendimiento mínimo debe ser del 75% y los ventiladores deben ser de consumo muy bajo $< 0.45 \text{ wh/m}^3$.

La distribución del aire se hará a través de los conductos dimensionados según la velocidad del aire y las pérdidas de presión, y prestando atención al aislamiento acústico del sistema, ya que Passivhaus recomienda no superar 25 dBA en estancias y 35 dBA en la sala de máquinas.

El reparto del aire [Fig. 61] puede ser según un sistema estelar —impulsando el aire de forma unidireccional a velocidad baja en un extremo del espacio para ser extraído en otro extremo— o en cadena —suministrandlo el aire a varios espacios por el mismo conducto—.

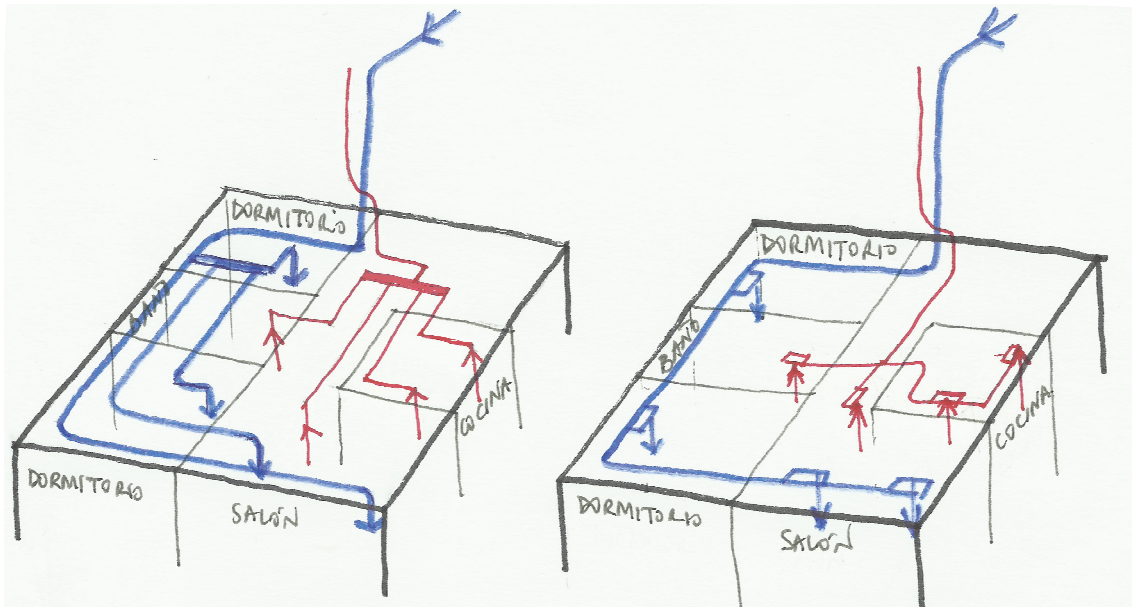


Figura 61. Distribución de aire estelar (izquierda) y en cadena (derecha). Fuente: elaboración propia (2019)

La eficiencia del sistema de doble flujo con recuperador de calor depende de la hermeticidad de la vivienda, cuanto más estanca mejor funcionará. Sin embargo, la tendencia a construir viviendas herméticas puede generar problemas respiratorios o empeoramientos de alergias o incluso exacerbar cáncer de pulmón y problemas cardíacos. (Campbell 2015)

Además, se plantea otra limitación ante el uso de una campana extractora en cocina, ya que puede dejar a la estancia en depresión y necesitar un aporte de aire para no generar problemas como que el aire se introduzca por donde no debe, o incluso que el equipo de doble flujo tenga menor poder extracción.

10.5 CONTROL DE LA VENTILACIÓN Y CONTROL DE LA CALIDAD DE AIRE

De forma genérica existen 4 modos de funcionamiento:

- Apagado.
- Encendido con caudal básico, con un caudal menor del 30% respecto a la posición de consigna. Se utiliza en situaciones en las que no están los usuarios.
- Encendido con caudal de consigna, posición normal.
- Encendido con caudal intensivo, depende de la capacidad de la máquina y renueva el aire aproximadamente un 30% más que la posición de consigna. Suele emplearse cuando hay más gente o se está usando la cocina, o se quiere ventilar en época de calor durante el día y refrescar las noches de verano.

VENTILACIÓN Y CALIDAD DE AIRE: SENSORES

Como ya se ha indicado, habitualmente se establece como unidad de referencia de calidad higiénica del interior la contaminación del CO₂, ya que es un agente fácilmente medible al tener en cuenta el nivel de ocupación de la vivienda³⁶.

Por ello, las instalaciones de recuperadores de calor suelen llevar instalados los sensores de CO₂ y humedad, que como ya se ha visto antes en el trabajo, es una de las maneras actuales para conocer la calidad del aire interior.

Teniendo en cuenta lo siguiente: una óptima calidad de aire interior contiene < 800 ppm de CO₂, calidad normal contiene entre 800–1.000 ppm, la mala calidad de aire se da entre 1.000–1.500 ppm y muy mala calidad de aire > 1.500ppm; la aplicación que analiza los sensores alberga los umbrales admisibles de dióxido de carbono para cada modo de funcionamiento del sistema de ventilación, de forma que se establece el límite³⁷ de 500 ppm para la primera velocidad, de 1.000 a 1.500 ppm para la segunda velocidad y cuando el ambiente supera los 1.500 ppm se establece la tercera velocidad.

La ventaja frente a un sistema de acondicionamiento y ventilación convencional es que, muchas veces se plantea la renovación de aire a través de un caudal mayor del necesario para evitar las concentraciones de contaminantes, porque puede ser complicado determinar el número de usuarios y la vía que sigue el aire interior. Así que garantizar la renovación pasa por exceder el caudal estrictamente necesario, con los inconvenientes de ruido, espacio y mantenimiento que eso pueda suponer.

La posibilidad de que con la monitorización de CO₂, el intercambiador de calor ajuste automáticamente las revoluciones de velocidad de la ventilación, evita esa clase de problemas.

El intercambiador también logra aportar la temperatura óptima a partir de la información que le otorgan los sensores de temperatura y de humedad.

A parte de los sensores fundamentales de humedad, temperatura y dióxido de carbono, se pueden emplear otro tipo de sensores para detectar contaminantes en el aire interior y activar así la ventilación.

Por ejemplo, un proyecto certificado Passivhaus en 2018 con sensores añadidos a los habituales es el de una vivienda ubicada en Arroiz, Navarra cuyo sistema de ventilación mecánica consta de sensores de CO₂ y de CO, ya que la calefacción consiste en una chimenea estanca de leña situada en el salón. (PEP [sin fecha])

Otro modelo de uso de sensores para otros contaminantes es el de las viviendas sociales con certificación Passivhaus en 2011, ubicadas en Coventry, Reino Unido, cuya instalación consta de los sensores de temperatura, humedad, CO₂, y para los compuestos orgánicos volátiles, además de consumo de energía para calefacción y agua caliente. (The UK Passivhaus House Organisation [sin fecha])

³⁶ El ser humano exhala CO₂ en una concentración del 4,5% del aire.

³⁷ El límite de CO₂ se indica en la tabla de umbrales admisibles de contaminantes del Anexo I de este trabajo. Con un nivel de 600 ppm ya se pueden notar los efectos en la salud de este contaminante, aunque se puede aceptar 1.000 ppm como referencia.

VENTILACIÓN Y CALIDAD DE AIRE: FILTROS

Por otro lado, para continuar con el análisis de la calidad de aire interior a través de la ventilación con recuperador de calor, se fija un filtrado de aire para evitar la entrada de partículas y de componentes nocivos, cuyos filtros se determinan según los valores de partículas en suspensión medidas en la zona.

En general, la variedad de clases y diseños de filtros se debe al gran intervalo de tamaño de las partículas [Fig. 62].

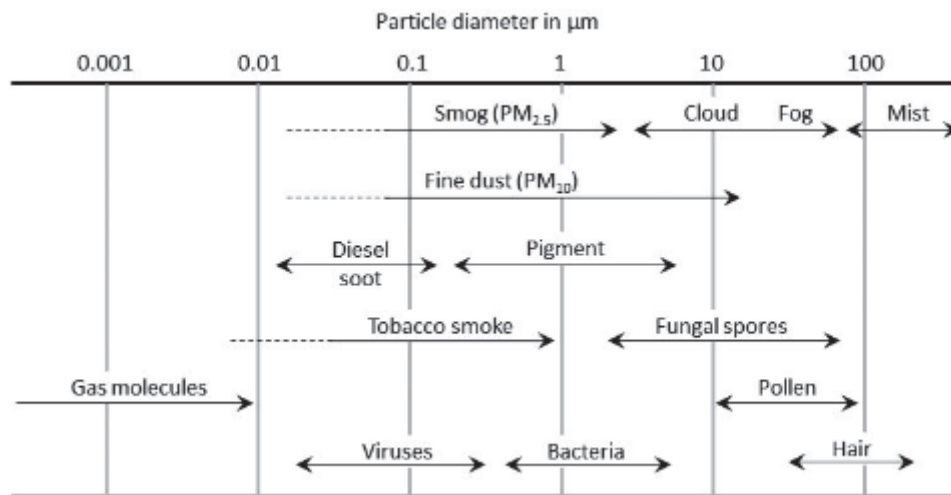


Figura 62. Distribución de tamaño de contaminantes atmosféricos comunes. Fuente: (Eurovent Association 2017)

La clasificación de las fracciones de polvo fino se basa en el tamaño de las partículas — referidos a su diámetro aerodinámico en μm , PM 10, PM2.5 y PM1—. Estas se separan por medio de métodos mecánicos o electromecánicos mientras que los gases, de motor diésel y de combustión, se separan por métodos de adsorción o de absorción.

Por norma general, para separar las partículas de las corrientes de gas se utilizan los filtros de fibra y su eficacia de filtrado se define por la relación de partículas de cierto tamaño depositadas en el filtro con respecto al total de partículas de ese mismo tamaño aguas arriba del filtro. (Eurovent Association 2017)

En particular, Megido Fernández (2018) realiza una investigación sobre la microestructura de los filtros de microfibra de cuarzo, usado en aplicaciones medioambientales para capturar el material particulado, con el fin de mejorar sus efectos y evitar que las partículas PM10 sean inhaladas y se depositen en el sistema respiratorio, suponiendo riesgo para la salud.

A través de diferentes mecanismos —interceptación, inercia, difusión o electrostática— las partículas golpean la fibra donde se depositan y se acumulan. En la práctica, lo ideal es superponer de cierta manera los diferentes mecanismos de recogida de partículas para que funcionen simultáneamente —por ejemplo, recoger las partículas finas por difusión y las más grandes por inercia e interceptación—. (Eurovent Association 2017)

Con respecto a los gases, su eliminación por sorción³⁸ se suele realizar con el carbón activado como adsorbente más frecuente para eliminar ciertos compuestos orgánicos volátiles y alcoholes. La limitación de este sistema es el efecto de la humedad sobre el carbón activado, ya que el agua puede desplazar otras sustancias y reducir la eficacia de adsorción del carbón activado.

La eficacia del filtrado viene dada según la escala que indica la norma de filtración ISO 16890³⁹ aunque se sigue empleando la definición de eficiencia de la norma europea EN 779:2012 a pesar de que ya no está vigente. La clasificación de filtros según esta norma EN 779 se define por el porcentaje de polvo transportado a través del filtro que realmente se recoge [Tabla 10].

TIPO DE FILTRO	CLASE SEGÚN EN 779:2012	RETENCIÓN MEDIA (Am) [%]	EFICIENCIA MEDIA (Em) frente a gotas de 0,4µm [%]
FILTRO GRUESO	G1	$50 \leq Am \leq 65$	
	G2	$65 \leq Am \leq 80$	
	G3	$80 \leq Am \leq 90$	
	G4	$90 \leq Am$	
FILTRO MEDIO	M5		$40 \leq Em \leq 60$
	M6		$60 \leq Em \leq 80$
FILTRO FINO	F7		$80 \leq Em \leq 90$
	F8		$90 \leq Em \leq 95$
	F9		$95 \leq Em$

Tabla 10. Clasificación de filtros según la norma EN 779:2012. Fuente: modificado de (Eurovent Association 2017)

La ISO 16890:2016 también considera el porcentaje de polvo recogido en el filtro, pero se fundamenta en la clasificación de polvo que recomienda la OMS. De manera que se crea una única normativa [Tabla 11], que divide en cuatro los grupos de filtro en función de los tamaños de partículas, con el porcentaje que define su eficacia.

³⁸ Sorción: adsorción —acumulación de sustancias gaseosas sobre la superficie de un sólido adsorbente— o absorción —penetración de la sustancia en el interior de un sólido o líquido y la disolución en él—

³⁹ La ISO 16890, en periodo de transición, sustituye a la actual norma europea EN 779:2012 y a la norma estadounidense AHSRAE52-2 para facilitar la comprensión y aumentar la protección de la salud.

El requisito para pertenecer a una categoría es que el filtro sea capaz de retener al menos el 50% de las partículas en ese rango de tamaños, indicando su eficiencia en incrementos de 5%.

GRUPO	CLASE		
	ePM ₁ (0,3 μm - 1μm)	ePM _{2,5} (0,3μm - 2,5μm)	ePM ₁₀ (0,3μm - 10μm)
ISO GRUESO			< 50%
ISO ePM10			≥ 50%
ISO ePM2.5		≥ 50%	
ISO ePM1	≥ 50%		

Tabla 11. Clasificación del grupo y requisitos de filtros según ISO 16890. Fuente: modificado de (Eurovent Association 2017)

Este estándar se aplica solo para ventilación general, por lo que los filtros de mayor eficiencia EPA⁴⁰, HEPA y ULPA⁴¹ quedan fuera del ámbito de aplicación de esta norma y mantienen la clasificación definida en la ISO 29463: filtros de alta eficacia y medios filtrantes para la eliminación de partículas en el aire —que conserva la categorización de la norma UNE EN 1822:2010. Filtros absolutos EPA, HEPA y ULPA—.

Teniendo en cuenta esto y atendiendo a las indicaciones del comité europeo de filtros de aire, se podría realizar la siguiente clasificación [Tabla 12] para decidir la clase de filtro necesario:

GRUPO	CLASE SEGÚN EN 779:2012	CLASE SEGÚN LA NORMA ISO 16890			
		FILTRO DE POLVO FINO ePM ₁	FILTRO DE POLVO FINO ePM _{2.5}	FILTRO DE POLVO FINO ePM ₁₀	FILTRO DE POLVO GRUESO POLVO GRUESO
PREFILTROS (para partículas superiores a 10 μm)	G1				
	G2				40%
	G3				50%
	G4				> 60%

⁴⁰ EPA: efficient particulate air filter

⁴¹ ULPA: ultra low penetration air filter

FILTROS INTERMEDIOS (para partículas finas de 0,3 a 10 μm)	M5	< 20%	< 40%	> 50%	
	M6	< 40%	> 50%	> 60%	
	F7	> 50%	> 65%	> 80%	
	F8	> 70%	> 80%	> 90%	
	F9	> 80%	> 90%	> 95%	
FILTROS ABSOLUTOS EPA Y HEPA (para partículas de 0,3 μm)	EPA: E10-E12			CLASE SEGÚN EN 1822	
	HEPA: H13-H14				
FILTROS ABSOLUTOS ULPA (para partículas de 0,12 μm)	U15-U17				

Tabla 12. Clasificación y comparativa de filtros. Fuente: elaboración propia (2019)

Según el comité europeo de filtros de aire, para definir el rendimiento del filtro se debe tener en cuenta tres aspectos fundamentales:

- Medios filtrantes, clase de filtro y capacidad de retención: se refiere a la cantidad de fibras y el tamaño de la mismas que, cuanto más retengan el polvo, mayor caída de presión genera entre el lado de entrada y salida del filtro.
- Construcción del filtro y su patrón del flujo: las características del medio, el grosor del filtro, su forma y sus pliegues deben permitir que la velocidad del aire a través del medio sea lo más parecida posible.

Para las paredes de celdas de filtro se suele emplear plástico, metal —acero galvanizado, acero inoxidable— o madera —tablero de partículas, madera contrachapada, madera de haya—. A pesar de que el plástico permite libertad geométrica para optimizar el diseño del medio filtrante, la madera se suele elegir por cuestiones medioambientales.

De todas formas, es importante valorar los materiales reciclados o reciclables de baja emisión para la generación de las estructuras del filtro, puesto que los de metal y de plástico suponen mayor coste en su eliminación.

- Tamaño del poro

La caída de presión, entre entrada y salida del filtrado, define la demanda de energía del filtro, puesto que el ventilador es quien aporta el flujo de aire necesario. Cuanto más polvo retenido

más caída de presión y mayor consumo de energía del ventilador y, en función de esto, los filtros se pueden clasificar de A+ a E-.

La vida útil de un filtro es el tiempo de funcionamiento entre su instalación y su sustitución, determinada, por diversos factores: si hay algún problema de higiene por microorganismos, hongos u olores; por la mejora de la eficiencia económica; por si alcanza o no la caída de presión final establecida para su uso y si hay alguna deficiencia en el filtro o no.

En general, las instalaciones que cumplen con el estándar Passivhaus tienen un recuperador de calor con dos filtros, uno para el aire exterior y otro para el interior, que se deben limpiar cada cierto tiempo y sustituirlos según las necesidades y lo visto en el párrafo anterior, aunque las máquinas avisan de cuándo hay que cambiarlos a través de una señal en el panel de control que pertenece al contador de tiempo de ejecución del filtro.

Los filtros se adaptan a las condiciones del lugar, teniendo en cuenta, por ejemplo, la polución si se trata de una zona muy urbanizada o industrial y el polen si hay mucha vegetación en el ambiente exterior.

En viviendas Passivhaus, normalmente se colocan filtros G4 para la extracción del aire y filtros F7 en la entrada de aire —ya que la eficiencia de filtración mínima es a partir de la clase F7— en la propia máquina. Además, se puede disponer de un accesorio portafiltro, una especie de cajón de toma exterior en el que incorporar el filtro genérico que se quiera utilizar.

A parte de ese filtro genérico, la máquina se puede equipar con filtros finos que atrapan el polvo y el polen, para las personas alérgicas. Sin embargo, los filtros de polen solo son eficaces a largo plazo si se sustituyen con frecuencia.

De todas formas, debido a que la composición de contaminantes cada vez es más compleja y difícil de controlar, los filtros deben ser eficaces no solo ante el material particulado sino también ante los productos tóxicos, bacterias, contaminantes gaseosos, etc.; por lo que es esencial desarrollar nuevos materiales de filtración multifuncionales. De hecho, la característica del aire interior de vivienda es que la concentración de contaminantes no es muy alta, pero está compuesta de una gran variedad de agentes.

Por otro lado, los materiales usados en filtros a partir de polímeros convencionales a base de petróleo sintetizado o de fibras de vidrio no son degradables ni ecológicos. Por lo que es fundamental encontrar un material natural que ayude a filtrar el aire de manera sostenible y que sirva para el material particulado y los contaminantes químicos. Así pues, se plantea un estudio de materiales a partir de polímeros naturales (Souzandeh et al. 2019), se estudia el potencial del filtro compuesto a base de esteras de lignina con óxido de polietileno y capas capaces de filtrar el 95% de partículas pequeñas (Chang y Chang 2016) o se desarrollan investigaciones de filtros multifuncionales y sostenibles basados en un aislado de proteína de soja y de celulosa bacteriana (Liu et al. 2017) para estudiar el potencial de los biomateriales como base de filtros de aire multifuncionales y de alta eficiencia.

11. COMPARACIÓN DE ESTRATEGIAS

11.1 COMPARATIVA DE SOSTENIBILIDAD

A continuación, se resumen las características sobre aspectos sociales y medioambientales, indicadas en los capítulos anteriores, y se añade una aproximación del aspecto económico para completar los fundamentos de la sostenibilidad.

VENTILACIÓN PASIVA

ASPECTO SOCIAL

La ventilación natural lleva a cabo la renovación de aire para eliminar los contaminantes químicos y biológicos y así mejorar el confort y la salud de las personas.

Esta medida permite la relación con el entorno. En general se suele hacer caso omiso de mecanismos complejos, olvidando su funcionamiento, sin embargo, el usuario se siente más cómodo cuando puede ejercer el control sobre el ambiente a través de métodos intuitivos y sencillos como las ventanas y los huecos en fachadas o en cubierta.

Además, la estrategia interviene en la creación de espacios y diseño de la arquitectura con el invernadero, la galería, el porche, la forma de la cubierta, la distribución interior, el diseño de huecos, los obstáculos de las fachadas, etc.

Las limitaciones usuales de la ventilación natural son la contaminación acústica, la polución del ambiente exterior, la posible falta de seguridad, la no practicidad si el usuario no es responsable de realizar la ventilación y que puede no ser suficiente.

ASPECTO MEDIOAMBIENTAL

La ventilación natural aporta aire fresco bien gracias a la velocidad del viento o al frío por evaporación, reduciendo la energía necesaria de refrigeración, si esta fuera necesaria, de los sistemas artificiales.

Otro aspecto medioambientalmente positivo es la eliminación de los contaminantes gracias a la circulación y renovación de aire.

La técnica de ventilación pasiva adquiere más importancia en la estación invernal que en la estival en la zona de estudio, el pretratamiento del aire sin necesidad de un aporte de energía para conservar el calor es una de las posibilidades de este método, así como la de regular la humedad ambiental.

ASPECTO ECONÓMICO

La ventilación natural tiene un menor coste de implantación que la ventilación mecánica y la artificial. La instalación de huecos, carpinterías adecuadas y elementos que hacen posible este tipo de estrategia provocan que el diseño sea más económico ya que también se tiene en cuenta el ahorro energético cuando la buena ejecución del sistema permite no tener filtraciones.

MATERIALES REGULADORES DE LA HUMEDAD

ASPECTO SOCIAL

Una mejora del confort del usuario se refleja en que, con el uso de estos materiales, se puede

controlar la proliferación de microorganismos, el riesgo de enfermedades respiratorias, así como del control de olores debido a los mohos que se puedan generar, en presencia de ambientes con humedades del 80%, como la situación planteada en este trabajo.

Gracias a la investigación desarrollada en este ámbito, se definen conceptos como el MBV, indicador universal de la amortiguación de humedad del material, de manera que se puede conocer de cualquier material su categoría y las propiedades de moderar las variaciones de humedad interior.

Los materiales reguladores de la humedad pueden ser materiales próximos como la cal, las fibras naturales o la madera, lo que nos acerca más al lugar, impulsando también los oficios y conocimientos locales.

Los materiales con capacidad de regular la humedad se pueden incorporar en revestimientos del interior de vivienda tanto en proyecto nuevo como en rehabilitación o mejora de lo existente.

ASPECTO MEDIOAMBIENTAL

Los materiales con bajo impacto ambiental idóneos para esta tarea son los materiales naturales como la cal, la arcilla, el cáñamo, las fibras naturales, el yeso o la madera.

Los materiales en desarrollo son combinación de materiales comunes a base de materiales naturales (yeso, sal, aceite de linaza, aditivos naturales, etc.) para no depender de instalaciones.

Además de asegurar el control de la humedad, se desarrollan revestimientos capaces de absorber contaminantes, un aspecto positivo tanto social como medioambientalmente.

ASPECTO ECONÓMICO

Los materiales reguladores de humedad son materiales comunes de fácil adquisición, los materiales locales son menos costosos ya que dejan menor huella ecológica.

Existe un gasto en la investigación puesto que hay bastantes estudios sobre la regulación de la temperatura y, sin embargo, la regulación pasiva de la humedad es menos común.

MATERIALES PURIFICADORES DEL AIRE

ASPECTO SOCIAL

El hecho de que los materiales fotocatalíticos sean combinación de materiales comunes facilita su adquisición y la integración en los edificios actuales.

Los materiales adquieren características de auto-limpiables, antivíricos, antibacterianos, antihongos, desodorizante y antipolvo, muy útil en el ámbito doméstico para usuarios alérgicos o con ultrasensibilidad a químicos, ya que se ha comprobado que con la fotocatalisis se mejora la calidad de vida.

Los materiales basados en TiO₂ son variados y se pueden aplicar tanto en exterior como en interior: mobiliario, cerámica, pavimentos, etc.

Se realizan normas para que la actividad fotoquímica del producto y su estándar estén aceptados internacionalmente.

ASPECTO MEDIOAMBIENTAL

El primer aspecto fundamental es que la tecnología de fotocatalisis está basada en un principio de descontaminación que se lleva a cabo en la propia naturaleza, a través de la energía solar.

Esta técnica es más eficaz con alta humedad, por lo que se presenta como ventaja de uso en la zona de estudio, ya que una de sus características del clima es la alta presencia de humedad.

Se pueden eliminar CO₂ para generar materia orgánica, así como otros contaminantes como NO_x, SO_x, CO_vs, CO, formaldehído, compuestos orgánicos clorados o compuestos poli aromáticos.

El uso del semiconductor TiO_2 presenta características positivas medioambientales ya que posee una estabilidad química y no es tóxico. Sin embargo, el reciclaje del titanio aún está en fase temprana.

La fotocatalisis consume menos energía que otros métodos de purificación del aire.

El uso de la técnica solar supone un ahorro de economía en cuanto a energía y medioambiente, a pesar de que también se puede usar la luz artificial. El clima de la zona de estudio ($UV=8$) tiene fácil la activación de fotocatalizador por rayos UV.

Este tipo de material, basados en materiales comunes y naturales, son solución eficaz y viable para la desinfección de contaminantes interiores a bajas concentraciones.

Además, pueden mejorar alguna de las propiedades del material como su resistencia al fuego o a ser rayado.

Este método pasivo permite la no transferencia de los contaminantes de un espacio a otro y su completa eliminación.

ASPECTO ECONÓMICO

El mantenimiento de este tipo de materiales es sencillo puesto que se limpian solo con agua

La aplicación de la fotocatalisis incrementa el precio en el material en un 5% aproximadamente. (Lisbona García 2016)

Existe un coste en investigación y desarrollo de este tipo de tecnología, siendo el TiO_2 el fotocatalizador más económico de los estudiados.

Se necesita inversión para alcanzar el desarrollo de un material capaz de eliminar cualquier conjunto de contaminantes simultáneamente.

VENTILACIÓN ACTIVA

ASPECTO SOCIAL

Uno de los principios básicos del estándar Passivhaus responde a la ventilación, cuyo sistema debe garantizar un caudal de 30 m^3 por persona y hora en la vivienda. Para ello se suele instalar un sistema de doble flujo con recuperador de calor que será eficiente cuanto más hermética sea la vivienda. Sin embargo, un exceso de hermeticidad puede provocar problemas de salud.

Se puede conocer la calidad del aire del ambiente interior gracias a los sensores puesto que las instalaciones de recuperadores de calor suelen llevar instalados sensores de CO_2 , entre otros, con los umbrales admisibles para cada modo de funcionamiento del sistema de ventilación.

Esta instalación de ventilación activa regula la temperatura óptima a partir de la información que le otorgan los sensores de temperatura y de humedad, estableciendo el confort térmico del interior.

En general, la ventaja frente a un sistema de acondicionamiento convencional es que, muchas veces se plantea la renovación de aire a través de un caudal mayor del necesario para evitar las concentraciones de contaminantes, porque puede ser complicado determinar el número de usuarios y la vía que sigue el aire interior. Así pues, garantizar la renovación pasa por exceder el caudal estrictamente necesario, con los inconvenientes de ruido, espacio y mantenimiento que eso pueda suponer.

Se asegura un aire limpio gracias a los filtros del recuperador de calor. El filtrado de aire para evitar la entrada de partículas y de componentes nocivos se determina según los valores de partículas en suspensión medidas en la zona, por lo que se hace un examen del estado ambiental de entorno de la vivienda.

La posibilidad de incorporar el filtro genérico que se quiera utilizar en un cajón de toma exterior mejora el confort del usuario ante la calidad de aire requerida.

La norma de filtración ISO 16890 dependiente de la clasificación de polvo recomendada por la

OMS, facilita la comprensión a escala internacional.

El aire interior de vivienda tiene una concentración de contaminantes compuesta de una gran variedad de agentes, por lo que se estudian nuevos materiales de filtración multifuncionales.

ASPECTO MEDIOAMBIENTAL

El uso de esta estrategia depende del consumo de energía para poder mover los ventiladores del intercambiador de calor, tanto del que mueve el aire fresco del exterior al interior como el otro que extrae el aire viciado del interior.

Incluir un recuperador de calor para que la energía del aire que se extrae pase al aire que entra, disminuye el consumo de energía necesaria para ajustar la temperatura de ese aire.

En clima suave, este método presenta ventajas frente a la ventilación natural cuando: el clima exterior es frío o muy caliente, existe contaminación acústica, existe contaminación atmosférica o entre los usuarios se encuentran personas alérgicas.

Es habitual el uso de filtros de fibra como elemento pasivo para separar las partículas de las corrientes de gas.

Cuanto más polvo retenido en el filtro, más caída de presión y mayor consumo de energía del ventilador. En función de esto, los filtros también se pueden clasificar por su eficiencia energética de A+ a E-.

Se profundiza en la creación de filtros con materiales reciclables, como el uso de la madera en las paredes de celdas del filtro ya que presenta ventajas medioambientales frente al metal o el plástico de mayor dificultad de eliminación.

ASPECTO ECONÓMICO

El coste de mantenimiento del recuperador de calor es superior al mantenimiento del resto de elementos de las otras técnicas.

Cuanto más polvo retenido en el filtro, más caída de presión y mayor consumo de energía del ventilador, por lo que se traduce en mayor coste económico. Este aspecto también repercute económicamente en el control del mantenimiento de los filtros, su limpieza y repuesto.

Los filtros se adaptan a las condiciones del lugar, teniendo en cuenta, por ejemplo, la polución si se trata de una zona muy urbanizada o industrial y el polen si hay mucha vegetación en el ambiente exterior, por lo que se hará mayor gasto y mantenimiento de los filtros.

Si los materiales de los filtros son de metal o plástico, como suelen ser, hay un mayor coste en su eliminación que si se tratara de filtros de materiales biodegradables.

En general, un proyecto en Passivhaus tiene un coste del 5-10% más que un proyecto de construcción convencional. El sobre coste de una vivienda que cumpla el estándar suele aparecer en las partes pasivas de aislamiento, carpintería, etc. aunque se reducen sobre costes en las medidas activas. (PEP [sin fecha])

Hay un gasto económico en la investigación de biomateriales como base de filtros de aire multifuncionales y de alta eficiencia.

Se realizan las siguientes tablas [Tabla 13, tabla 14 y tabla 15] para comparar las estrategias y una visualización gráfica de los aspectos de sostenibilidad.

	VENTILACIÓN PASIVA: VENTILACIÓN NATURAL	VENTILACIÓN ACTIVA: VENTILACIÓN DE DOBLE FLUJO	MATERIAL REGULADOR DE LA HUMEDAD	MATERIAL PURIFICADOR DEL AIRE
ASPECTO SOCIAL				
Salud del usuario por la eliminación de contaminantes	x	x	alguno	x
Salud del usuario por el control de microorganismos	x	a través de los filtros	x	x
Conocer la calidad de aire		x		indirectamente
Relación usuario-entorno	x		revestimiento	revestimiento
Responsabilidad del usuario	x	cambio de velocidad	-	-
Control intuitivo de la estrategia	x		x	x
Incorporación en la vivienda en cualquier momento	-	-	x	x
Mejora del confort en cuanto a corrientes de aire, ruido y filtraciones	contrario a ello	x	-	-
Impacto en el diseño arquitectónico: creación de espacios	x		-	-
Aspectos de regulación universal con una norma internacional		los filtros	x	x
Garantizar caudal mínimo de ventilación adecuado	No siempre bajo control	x	-	-
Fácil adquisición	x		x	

Tabla 13. Comparación de estrategias en el aspecto social. Fuente: elaboración propia (2019)

	VENTILACIÓN PASIVA: VENTILACIÓN NATURAL	VENTILACIÓN ACTIVA: VENTILACIÓN DE DOBLE FLUJO	MATERIAL REGULADOR DE LA HUMEDAD	MATERIAL PURIFICADOR DEL AIRE
ASPECTO MEDIOAMBIENTAL				
No toxicidad ni inestabilidad	-	-	x	x
Aportación de aire fresco	depende del exterior	x	-	-
Menor energía en climatización	en refrigeración	recuperador de calor	menor en calefacción	
Eliminación de contaminantes químicos	x	x		x
Pretratamiento del aire sin energía	x	recuperador de calor	-	-
Regulación de humedad relativa	depende del exterior	x	x	
Fundamentación en materiales naturales: bajo impacto ambiental	-	-	x	x
Uso de la energía de la naturaleza	-	-		x
Mejora de otras propiedades del material	-	-		x
Posibilidad de reciclaje		los filtros	x	depende del titanio

Tabla 14. Comparación de estrategias en el aspecto medioambiental. Fuente: elaboración propia (2019)

	VENTILACIÓN PASIVA: VENTILACIÓN NATURAL	VENTILACIÓN ACTIVA: VENTILACIÓN DE DOBLE FLUJO	MATERIAL REGULADOR DE LA HUMEDAD	MATERIAL PURIFICADOR DEL AIRE
ASPECTO ECONÓMICO				
Consumo de energía		x	-	-
Diseño económico y sencillo	x		x	x
Ahorro económico por el consecuente ahorro energético	x	x	x	
Fácil adquisición, menor huella ecológica	-	-	x	x
Mantenimiento simple, en coste y limpieza	x		x	x
Inversión en investigación	-	-	x	x
Incremento del precio con respecto a la construcción convencional		x		x

Tabla 15. Comparación de estrategias en el aspecto económico. Fuente: elaboración propia (2019)

Para la realización del gráfico [Fig. 47] se valora positivamente aquella característica de mejora en cuanto a sostenibilidad: 1 si es totalmente mejora, 0,5 si es parcial o alguna parte de la estrategia tiene esa mejora, 0 si no tiene esa característica, -0,5 si parcialmente se aleja de la sostenibilidad y -1 si se aleja totalmente de la sostenibilidad. —Ver anexo II—.

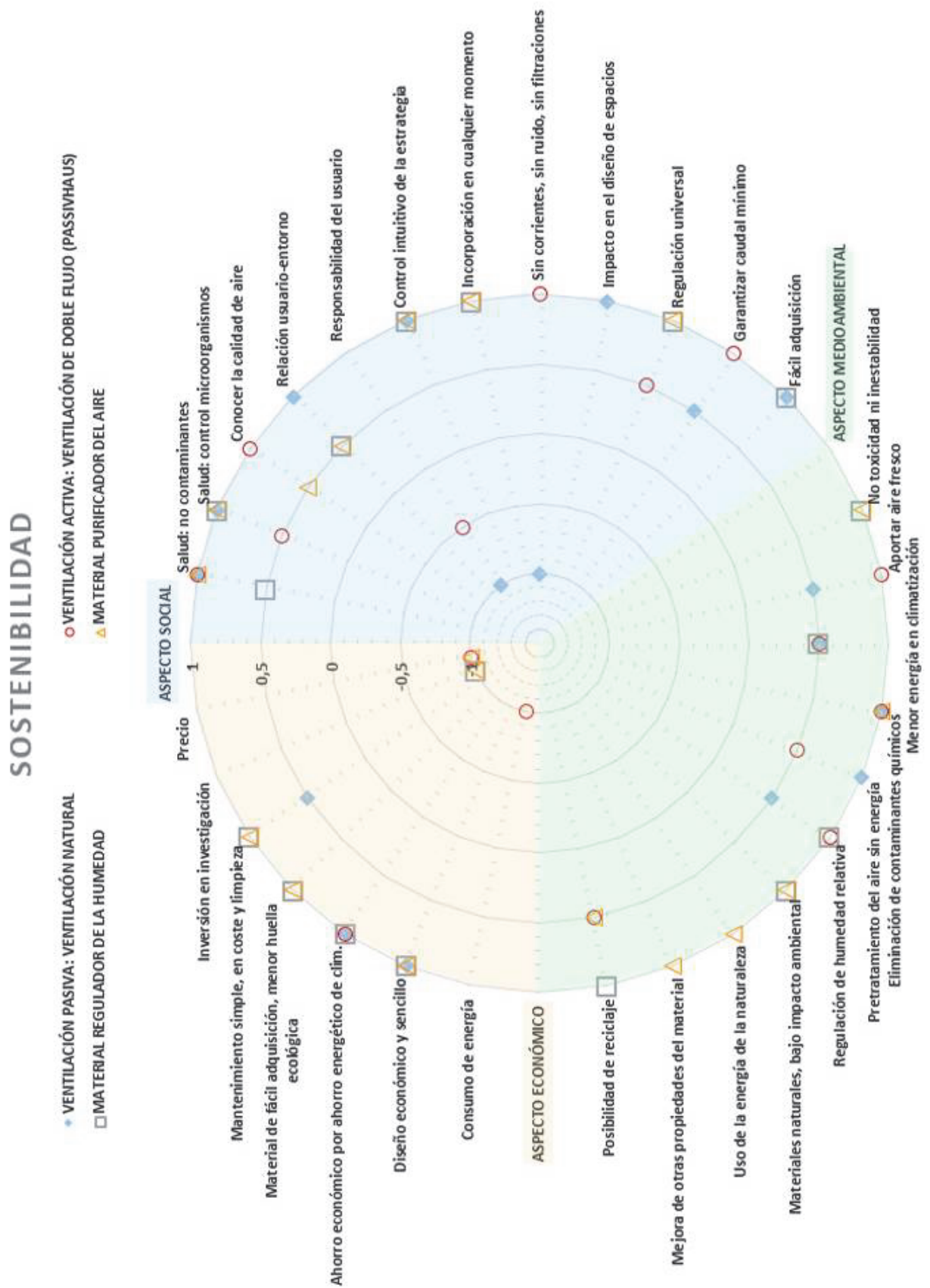


Figura 63. Gráfico de sostenibilidad de las estrategias. Fuente: elaboración propia (2019)

Con la información reflejada y valorando los aspectos positivos y negativos en cuanto a la sostenibilidad de cada método, se puede concluir que:

En cuanto a la **ventilación**, la selección de una u otra estrategia en una obra nueva, se tomará en función del tipo de proyecto, ya que puede ser más difícil expulsar de espacios grandes el aire viciado por medio de la ventilación natural sin apoyo de otro tipo de ventilación.

El carácter pasivo de la vivienda va a depender de la demanda de climatización relacionada directamente con las pérdidas de la envolvente térmica, las pérdidas por ventilación, las ganancias de radiación solar y las ganancias producidas internamente.

Conociendo la relevancia del viento y de la humedad en el área de estudio seleccionada, el uso de una instalación de recuperador de calor con doble flujo permite garantizar el caudal de la ventilación sin contaminación acústica, la recuperación de la energía del aire, asegurar y conocer la calidad del mismo al estar filtrado y monitorizado y poder actuar en consecuencia.

Por otro lado, el uso de la ventilación natural en la población seleccionada puede no ser completamente eficaz puesto que se introduce aire generalmente frío y húmedo.

Sin embargo, con un buen análisis y estudio previo del entorno y las necesidades de la vivienda, la ventilación natural puede ser suficiente. El problema de no poder controlarla se resuelve con los métodos pasivos. Así se puede asegurar la renovación y limpieza del aire a menor coste, con un menor mantenimiento y con una mayor relación con el entorno.

En cuanto a los **materiales**, se observan los beneficios de las dos actuaciones:

La posibilidad del uso de materiales con alta capacidad de amortiguar las variaciones de humedad relativa del interior mejoraría la eficiencia energética del edificio. Los revestimientos con materiales higroscópicos tienen las ventajas de un mayor confort, mayor CAI, menor ventilación y refrigeración en verano, menor riesgo de condensaciones superficiales, menor presencia de poblaciones de ácaros y menos riesgo de degradación estructural de materiales debido a la humedad.

Los materiales purificadores del aire ofrecen las características de la autolimpieza, ser antibacteriano, antivírico, antihongos, desodorizantes y antipolvo.

Por lo que la complementación de ambos ayudaría a reducir el problema planteado en este trabajo de una manera pasiva y sostenible.

11.2 ESTRATEGIAS EN LAS CERTIFICACIONES MEDIOAMBIENTALES

Para dirigir la arquitectura hacia el lado de la sostenibilidad se crean normas en la construcción, como la UNE-EN 15643-1:2010⁴² de ámbito europeo o la ISO 21929-1:2011⁴³ a nivel internacional, y declaraciones ambientales que ayudan a aplicar este concepto a los edificios.

⁴² UNE-EN 15643-1:2010. Sostenibilidad en la construcción. Evaluación de la sostenibilidad de los edificios. Parte 1: Marco general.

⁴³ ISO 21929-1:2011. Sustainability in building construction — Sustainability indicators — Part 1: Framework for the development of indicators and a core set of indicators for buildings

De esta manera aparecen varias herramientas⁴⁴ entre las cuales se encuentran los estándares y certificaciones de sostenibilidad. Estos sellos de certificación ambiental y energética evalúan el impacto del edificio en todo su ciclo de vida o en una parte del mismo, pudiendo considerar diferentes tipos de impacto ambiental (agua, energía, entorno, etc.) o solo algunos de ellos. (Wadel Gerardo 2015)

Estas guías de buenas prácticas cuentan con diferentes métodos de evaluación: alguno se basa en analizar estrategias de diseño para revisar un gran número de impactos medioambientales (BREEAM, VERDE o LEED), otras se centran en la evaluación de diseño según el ciclo de vida (Cradle to Cradle), algunas se concentran en valorar parámetros energéticos del edificio (Passivhaus, CENER CEM) o se basan en medir indicadores de ecoeficiencia (CASBEE).

De carácter voluntario, se siguen revisando y actualizando para adaptarlas a todo tipo de proyectos y localizaciones, con el fin de conseguir una construcción sostenible en todo el planeta. Con este objetivo, se pueden ver a continuación las características de los estándares más conocidos basados en impactos medioambientales y bajo un criterio de salud de las personas aplicado a la vivienda.

Por ejemplo, la certificación **WELL** está considerada como la primera certificación del mundo que se centra exclusivamente en la salud y bienestar del ser humano. Respaldada por el IWBI (*International Well Building Institute*) de Estados Unidos, se basa en una revisión minuciosa de las investigaciones realizadas sobre los efectos de los espacios sobre la salud y productividad de los usuarios.

La guía del estándar define siete conceptos vinculados a la salud humana y el entorno construido: aire, agua, alimentación, luz, ejercicio, confort y mente. En todos ellos relaciona características que afectan a la salud, el confort o el conocimiento de los usuarios. Muchas de las orientadas a mejorar la salud ya cuentan con respaldo de normativas vigentes del gobierno o de otras organizaciones y algunas otras están orientadas a modificar el comportamiento a través de información y apoyo.

Sobre los beneficios para el sistema respiratorio, WELL promueve, además del ejercicio; la calidad de aire, limitar la exposición a moho, microbios, VOC y partículas que afecten al sistema en forma de infecciones y alergias; evitando las fuentes de contaminación, generando una buena ventilación y un buen filtrado como métodos más eficaces para luchar contra ellos.

El distintivo **BREEAM** es un sistema de evaluación, clasificación y certificación de la sostenibilidad en proyectos de construcción desarrollado por BRE (*Building Research Establishment*), de carácter voluntario con adaptaciones en varios países como España. También valora las categorías de salud y bienestar y materiales entre otros.

⁴⁴ Las herramientas son conocidas como «sistemas de calificación y certificación ambiental» controladas por varias organizaciones entre las que destacan: *World Green Building Council*, donde prevalecen los criterios de la *United States Green Building Council*; la *International Initiative for Sustainable Building Environment*, que promueve la investigación y formación; la asociación internacional *Sustainable Building Alliance*, que define procedimientos de evaluación en base a unos indicadores básicos y nuevas asociaciones como *el International Living Building Institute* o el *2030 Challenge*. (Wassouf 2017)

Con el fin de conseguir un mejor desempeño medioambiental, en cuanto al apartado de salud y bienestar, estudia: el confort visual, la calidad del agua, la calidad acústica, el confort térmico, la seguridad del usuario y la calidad del aire interior. De esta última destaca limitar el riesgo de contaminación del aire exterior en el interior, controlar la ventilación en zonas de gran ocupación y prestar atención a los productos empleados con estándares de baja emisión de compuestos orgánicos volátiles.

La certificación **LEED** (*Leadership in Energy & Environmental Design*) es un distintivo desarrollado por el *U.S. Green Building Council* para definir y valorar los edificios sostenibles, con aplicación a nivel internacional.

Basada en principios energéticos y medioambientales aceptados, evalúan, clasifican y certifican la eficiencia de los edificios a partir de su ciclo de vida: desde su diseño hasta su demolición, considerando el proceso y las posibles intervenciones de reforma o mantenimiento.

El apartado que se refiere a la salud del usuario de forma más directa es el de calidad del ambiente interior, en que describe los aspectos que mejoran el bienestar del usuario, con una adecuada ventilación, confort térmico y acústico, el control de contaminantes al ambiente y correctos niveles de iluminación. Propone el seguimiento de la entrada de aire fresco; el incremento de la ventilación; gestionar la calidad del aire durante la construcción y antes de la ocupación; utilizar materiales de baja emisión en adhesivos, sellantes, pinturas, recubrimientos, suelos, maderas compuestas de fibras agrícolas; controlar las fuentes interiores de productos químicos y contaminantes entre otros.

La certificación **VERDE** (Valoración de Eficiencia de Referencia de Edificios) es la herramienta de diagnóstico, evaluación y certificación desarrollada por *Green Building Council España*. Se basa en una aproximación al análisis de ciclo de vida y evalúa la reducción de impactos por medio de unas estrategias que implican unos aspectos sociales, medioambientales y económicos y basándose en la normativa del CTE.

En general, se fundamenta en que el edificio debe ser construido respetando el medio ambiente y debe ser compatible con el entorno y con los niveles de bienestar y calidad de vida, por ello el análisis de los impactos relacionados con la salud y el confort son los que tienen mayor importancia.

Por ejemplo, plantea como objetivos la reducción de las emisiones de NOx en las calderas de combustión, la limitación de las emisiones de COVs en materiales de acabado —pinturas, barnices, maderas—, garantizar la ventilación natural cumpliendo requisitos de higiene y confort, la importancia de la iluminación natural o la protección frente al ruido entre otros aspectos.

En resumen:

- La calidad de aire y condiciones de ventilación son fundamentales en todas las certificaciones. Varios comparten las características de estándares de calidad de aire,

eficiencia de ventilación, filtración de aire, control de humedad o la monitorización de la calidad de aire, ya que están diseñadas para trabajar conjuntamente.

- Las medidas a tomar para eliminar los ácaros consisten en una ventilación eficaz y una iluminación natural: lo ideal es ventilar de forma natural eliminando o reduciendo al máximo los sistemas de ventilación mecánica —se puede implementar por medio de la propia estructura arquitectónica del edificio con patios o galerías internas y a través de las envolventes arquitectónicas— y que la estructura del edificio permita el paso de radiación solar a todos los espacios, de manera que se iluminen de forma natural y con la intensidad adecuada.
- Lo fundamental es suministrar aire fresco, sin agentes microbiológicos, evitar acumular agua y suciedad estancada en los materiales y sistemas de climatización, garantizar la humedad relativa interior entre 40-60%, realizar un mantenimiento y limpieza de los sistemas de ventilación y climatización y promover el uso de materiales de construcción que regulen las condiciones de humedad
- El confort térmico se relaciona con la calidad de ventilación.
- El aspecto de la contaminación está presente en cuanto a reducir materiales tóxicos, reducir la exposición de los usuarios a productos químicos, minimizar las fuentes de contaminantes en el interior o utilizar materiales de bajo impacto ambiental.
- De una forma u otra, todos consideran los espacios como concepto de bienestar de los usuarios.
- Un aspecto importante que relaciona todas las categorías es la valoración de la satisfacción del usuario: con encuestas tras la ocupación del espacio, identificando los problemas relacionados con el confort, monitorizando los criterios de confort para hacer evaluaciones posteriores y dar la posibilidad de que el usuario ajuste a sus necesidades, etc. es en definitiva la posibilidad de crear y mejorar un ambiente interior productivo y confortable.

La elección del estándar vendrá dada por el tipo de proyecto y cómo se adapta a él y a la forma de construir del país, sin embargo, las certificaciones mejores valoradas son las que tiene una visión más amplia en las variables que influyen en el ambiente, en la salud y el bienestar de las personas.

Como se ha visto en el gráfico comparativo del apartado 11.1, las técnicas pasivas estudiadas cumplen con varios de los requisitos que presentan los sellos.

En general, la contaminación ambiental es un indicador del desarrollo sostenible y su tratamiento se reconoce en las motivaciones del marco 2030 en el que 193 países de Naciones Unidas, incluida España, se comprometen con la protección del medioambiente y de las personas y asegurar el futuro del planeta.

De este problema se habla en diferentes objetivos, como en el SDG⁴⁵ 3 salud y bienestar — meta 3.9 que pretende reducir la mortalidad y enfermedades producidas por productos

⁴⁵ SDG: *Sustainable Development Goals*

químicos peligrosos y la contaminación el aire, agua y suelo—, el SDG 11 ciudades y comunidades sostenibles —indica los niveles de contaminación en ciudades como referente de sostenibilidad y recomienda que los edificios sean sostenibles y resilientes usando materiales locales— o el objetivo 7 sobre energías limpias que favorece la tecnología limpia en el hogar como indicador de ambiente sostenible.

En base a todos estos buenos propósitos, sería ideal que los parámetros que se han visto a lo largo del trabajo referentes a la calidad del aire, la salud de las personas y las estrategias pasivas se pusieran de manifiesto gracias al análisis previo del lugar y de las necesidades, apoyado en normativas, en certificaciones y en el conocimiento popular y en el científico, para así conseguir mejorar el ambiente interior de vivienda en cualquier zona de estudio y contribuir al desarrollo sostenible.

12. EXPERIMENTO: MEDICIÓN DE CALIDAD DE AIRE EN AMBIENTE INTERIOR A TRAVÉS DE SENSORES

12.1 INTRODUCCIÓN

Es evidente que el aire que se respira no debe suponer ningún peligro para la salud. Sin embargo, son variados los agentes que pueden afectarla, provocando cefaleas, irritación de ojos, eccemas en la piel, cansancio, falta de concentración, afecciones respiratorias, afecciones del sistema nervioso o incluso procesos cancerígenos.

Como se ha visto en capítulos anteriores, muchos problemas asociados a la CAI son multifactoriales y la selección del procedimiento concreto a seguir dependerá del tipo de edificio a estudiar. Es fundamental comenzar el análisis con una inspección inicial del edificio, seguida de la de las instalaciones del sistema de ventilación, calefacción y aire acondicionado.

Con la información obtenida y sabiendo que los parámetros dependen del sitio, de las fuentes de contaminación, etc., se deberán plantear hipótesis sobre las causas de la disminución de la calidad del aire, efectuar las mediciones y finalmente aplicar las correcciones oportunas según las normativas.

Algunos de los métodos de evaluación y medición individuales vistos en el apartado 6.5, requieren de personal autorizado y preparado para su empleo. Lo ideal, a nivel usuario, sería disponer de un sistema integrado que captara la información de varios contaminantes en vez de necesitar varios dispositivos para ello. Los avances en la tecnología permiten desarrollar sistemas de monitorización en las instalaciones para que cuando se modifiquen negativamente los niveles establecidos de seguridad y confort se ponga en marcha la ventilación y la recuperación de la calidad de aire interior.

12.2 TECNOLOGÍAS: SENSORES Y MONITORIZACIÓN

Una de las tecnologías que se pueden encontrar en el interior de los edificios son los sensores, elementos que permiten recoger información del entorno y lo envían a un sistema de control centralizado para una posterior actuación. La monitorización de esos datos permite observar la situación de los posibles cambios que se pueden producir a lo largo del tiempo.

Para el caso de la monitorización de la calidad de aire se han desarrollado numerosas investigaciones que permiten el uso de sensores inalámbricos y redes de conexiones capaces de medir parámetros del aire.

Se han analizado varios casos de estudio que ejemplifican la continua investigación en el tema, con mejoras y resoluciones de problemas en cuanto al uso de sensores para la monitorización de la calidad de aire en interiores de edificios, en diferentes ubicaciones y midiendo diversos

factores para su posterior actuación con respecto a sistemas de ventilación, de HVAC⁴⁶, antihumedad o de recuperación de calor. Por ejemplo:

- Desarrollo de un sistema de bajo coste que permita controlar la calidad de aire midiendo los niveles de CO y CO₂, así como la temperatura y humedad en un edificio de oficinas en Sur África. (Du Plessis et al. 2016)
- Desarrollo de un sistema para conocer los niveles de contaminación de partículas PM_{2.5} en oficinas de cuatro campus en China (Beijing, Shanghai, Wuxi y Suzhou) (Chen et al. 2014)
- Creación de una plataforma que mida los principales parámetros de contaminación dentro de la Escuela Politécnica de la Universidad de Saõ Paulo que cuenta con un HVAC centralizado. (Esquiagola et al. 2018)
- Uso de un sistema inalámbrico para conocer en tiempo real la calidad de aire en un edificio de la Universidad de Qatar; analizando en distintas ubicaciones 6 gases diferentes, así como la temperatura y humedad relativa. (Benammar et al. 2018)

Estos informes han servido de base para el desarrollo de una pequeña investigación experimental: el objetivo es organizar un sistema de medición que permita conocer la calidad de aire interior en situaciones de ambiente doméstico y su ventilación natural, en una vivienda en condiciones climáticas de la población seleccionada.

12.3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA CREADO

Se desarrolla un pequeño equipo [Fig. 64] de medición y monitorización, que toma datos mediante una serie de sensores y presenta los resultados en forma de gráfica.

El equipo de medición consta de un mini-ordenador Raspberry Pi v3 (1), frecuentemente usado en proyectos de IoT⁴⁷, y que tiene conectados un sensor de temperatura y humedad (3), un sensor de CO₂ y de VOC (2) y otro sensor de PM_{2,5} y PM₁₀ (4), ocupando en total un espacio aproximado de 30 x 15 cm.

⁴⁶ HVAC: Heating, Ventilation and Air Conditioning.

⁴⁷ IoT: Internet of Things

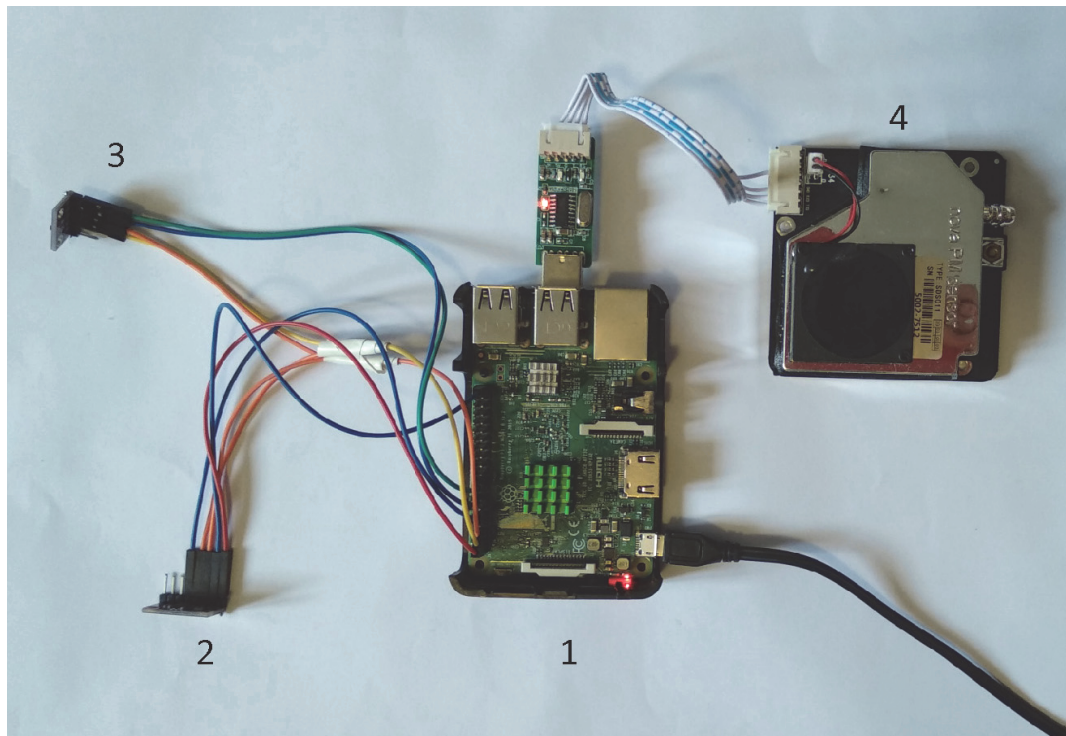


Figura 64. Equipo de medición. Fuente: elaboración propia (2019)

Se ha optado por este hardware debido a su escaso consumo energético y la gran cantidad de documentación existente.

En cuanto al software utilizado, se ha instalado un sistema operativo Debian Linux en la Raspberry Pi y se ha desarrollado un pequeño programa en Python que toma una muestra de los sensores cada 5 minutos durante el horario diurno y cada hora durante el horario nocturno, puesto que se estima que los valores nocturnos son menos variables ya que las condiciones de la habitación no cambian.

Estos datos se guardan en una base de datos MySQL almacenada en un servidor en la nube.

Además de los datos obtenidos de los sensores, el programa desarrollado también obtiene datos de las condiciones exteriores mediante el servicio Openweathermap.

Para representar los datos, se ha instalado el software Grafana en un servidor en la nube, debido a que es uno de los programas más utilizados para el análisis de series temporales, además de ser código abierto.

La conexión del sistema se esquematizaría de la siguiente manera [Fig. 65]:

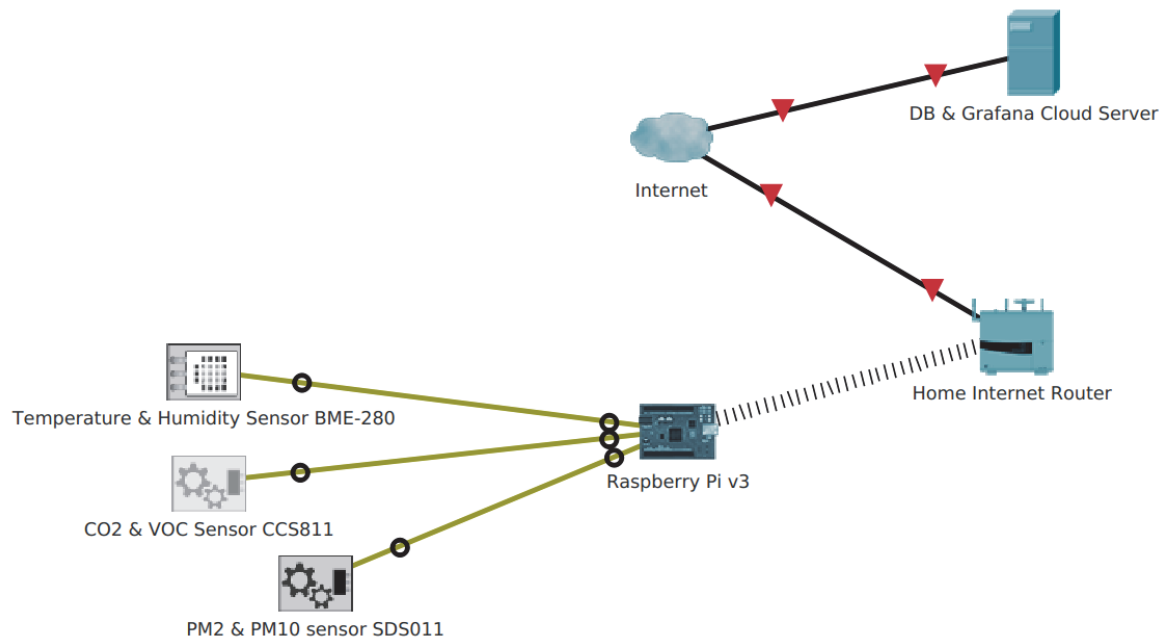


Figura 65. Arquitectura del sistema. Fuente: elaboración propia (2019)

Grafana obtiene los datos de MySQL y los representa a modo de gráfico [Fig. 66 y Fig. 67], permitiendo una revisión detallada y facilitando la comparación entre los datos de los distintos sensores. Además, al estar en la nube permite la visualización desde cualquier ordenador o móvil conectado a internet.

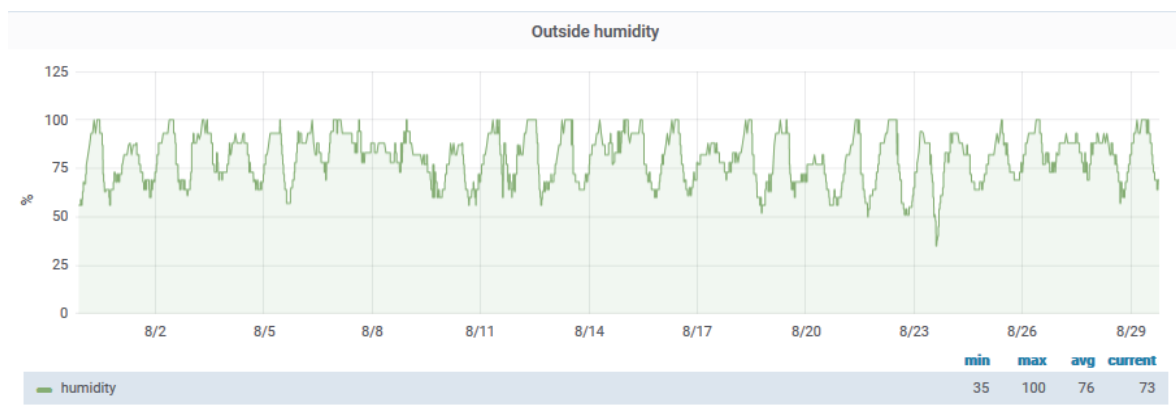


Figura 66. Ejemplo de gráfica sobre humedad exterior durante 30 días. Fuente: Grafana (2019)

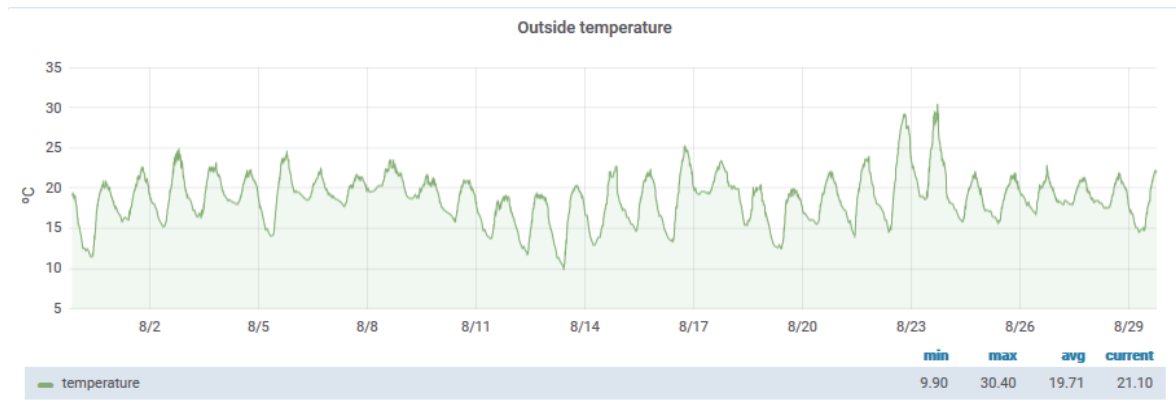


Figura 67. Ejemplo de gráfica sobre temperatura exterior durante 30 días. Fuente: Grafana (2019)

12.4 CONDICIONES Y SIMULACIONES

El espacio propuesto para el estudio es el interior de vivienda de un cuarto piso ubicado en Coruña. El edificio data de 1984 y se considera en estado favorable con respecto a su conservación.

El dispositivo de medición se asigna durante un tiempo determinado a dos estancias opuestas de la vivienda, un dormitorio de 15,85m² y un despacho de 10m², sometidas a uso y ventilación continua. El objetivo es intentar conocer la calidad de aire interior y verificar la ventilación natural como medida o no de mejora.

El sistema funciona durante las 24 horas de la siguiente manera: del 14 de julio a 14 de agosto tomando datos en el dormitorio y, del 1 al 13 de julio y del 15 al 31 de agosto tomando datos en el despacho, desde una altura aproximada del suelo de 1,10m en el dormitorio y de 0,90m en el despacho.

Para llevar a cabo el análisis se deben tener en cuenta las siguientes características:

- El sistema de ventilación de los espacios es la ventilación natural y las puertas de ambas estancias permanecen abiertas todo el tiempo. En general hay ventilación durante el día en ambas estancias y ventilación nocturna solo en el dormitorio —ver Anexo III—.
- El dormitorio tiene acceso directo al baño y el despacho es contiguo a la cocina con instalación de gas.
- El dormitorio orientado a norte tiene dos ventanas oscilobatientes que dan a un patio de luces y el despacho orientado a sureste tiene una ventana oscilobatientes cuya posición da a la vía pública —entrada portuaria, vía de ferrocarril, vía ciclista y vía peatonal—.
- La cantidad de ocupantes en el dormitorio es de dos personas en actitud sedentaria, con horario de ocupación principalmente nocturno.

La cantidad de ocupantes en el despacho es de dos personas el 85% de las veces y una el resto, en actitud sedentaria y en horario de ocupación principalmente diurno.

- Ambas estancias tienen mobiliario susceptible de emitir formaldehídos y COVs y de acumular ácaros. Se realiza una limpieza diaria del pavimento y quincenal del mobiliario sin productos químicos.
- No se tiene en cuenta la velocidad del viento, ni las corrientes de aire, ni se calcula el caudal de ventilación ya que no se puede realizar un estudio tan exhaustivo.
- El dispositivo creado tiene un 80% de confianza en la fiabilidad de los datos.

Los datos se tratan a través del software libre R (*R Project*) y SPSS (*Statistical Package for the Social Sciences*) que analizan estadísticamente y permiten la realización de gráficos.

Por tanto, el estudio tendrá en cuenta las variables temperatura, humedad, CO₂, VOC, PM_{2.5} y PM₁₀, las cuales podrían variar en función de los factores como la estancia de la vivienda, la ventilación (nula o total) y la ocupación (día y noche). Con todo ello, se determinan las siguientes hipótesis:

1. Las características de las variables ambientales.

Se plantean varias hipótesis:

- a) La temperatura puede ser mayor en el despacho que en el dormitorio.
- b) La humedad puede ser menor en el despacho que en el dormitorio.
- c) La humedad y temperatura varían en el dormitorio con la ventilación.
- d) La humedad y temperatura varían en el despacho con la ventilación.

2. La concentración de contaminantes en cada estancia.

Se plantean varias hipótesis:

- a) La concentración de CO₂ puede ser mayor en el despacho por el día y en el dormitorio por la noche.
- b) La concentración de VOC puede ser similar en ambas estancias.
- c) La concentración de material particulado puede ser mayor en el despacho que en el dormitorio.
- d) La concentración de tóxicos puede disminuir con la ventilación.

Las distintas comparaciones se pueden resumir en la tabla esquemática siguiente:

	<i>Estancia</i>	<i>Ventilación</i>	<i>Ocupación</i>		<i>Estancia</i>	<i>Ventilación</i>
Temperatura	Despacho	Nula # Total		VOC	Despacho	Nula # Total
	#	_____			#	_____
	Dormitorio	Nula # Total			Despacho	Nula # Total
Humedad	Despacho	Nula # Total		PM_{2.5}	Despacho	Nula # Total
	#	_____			#	_____
	Despacho	Nula # Total			Despacho	Nula # Total
CO₂	Despacho	Nula # Total	Noche # Día	PM₁₀	Despacho	Nula # Total
	#	_____	_____		#	_____
	Despacho	Nula # Total	Noche # Día		Despacho	Nula # Total

Tabla 16. Esquema de comparaciones a valorar con el ensayo. Fuente: Elaboración propia (2019)

12.5 RESULTADOS

Las consideraciones previas para interpretar los datos y los resultados son las siguientes:

- Se realiza un análisis descriptivo de cada variable, aportando los datos: mínimo, primer cuartil, mediana, media, tercer cuartil, máximo y el intervalo de confianza.
- Se realizan contrastes bilaterales o unilaterales para la comparación de medias de dos muestras independientes o apareadas:

Bilateral	Unilateral a la derecha	Unilateral a la izquierda
$H_0: \mu_1 = \mu_2$	$H_0: \mu_1 \leq \mu_2$	$H_0: \mu_1 \geq \mu_2$
$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$	$H_1: \mu_1 > \mu_2$	$H_1: \mu_1 < \mu_2$

Se comprueba en todos los casos la normalidad estadística de la variable, determinando el uso de métodos paramétricos, como el test T-Student y métodos no paramétricos, como el test U-Mann Whitney para grupos independientes y el de Wilcoxon para grupos dependientes.

1. LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS VARIABLES AMBIENTALES.

Teniendo en cuenta los datos ambientales [Fig. 68 y Fig 69] se obtienen lo siguiente:

En el interior, la temperatura media es de 24.99°C, obteniendo valores que se mueven en un rango de entre 22.7°C y 27.6°C. Se verifica que la temperatura real media está entre 24.97°C y 25°C con una confianza del 95%.

En cambio, en el exterior, la temperatura media es de 19.6°C, obteniendo valores que se mueven en un rango de entre 9.9°C y 30.4°C. Se verifica que la temperatura real media está entre 19.55°C y 19.65°C con una confianza del 95%.

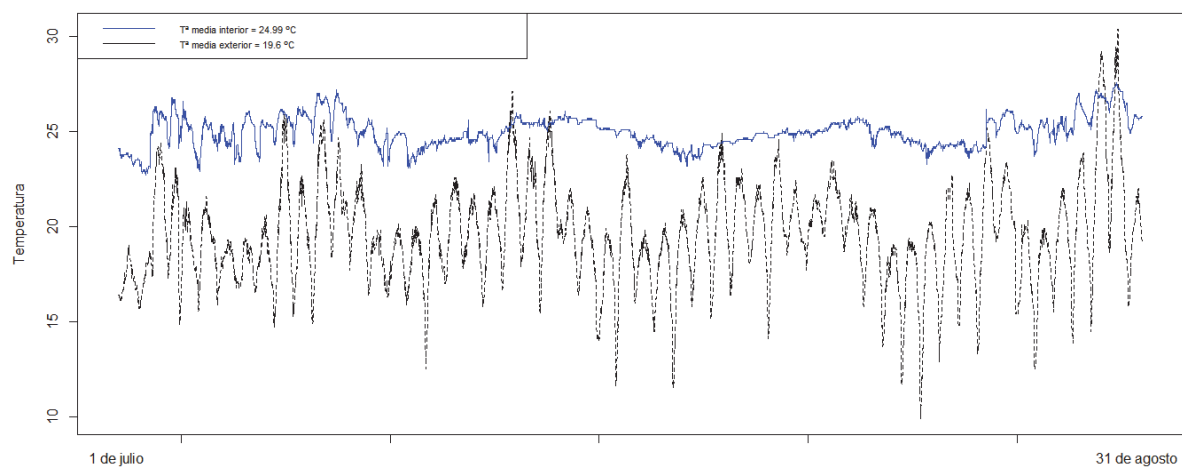


Figura 68. Relación de temperatura interior – exterior durante 60 días. Fuente: R Project (2019)

En el interior, la humedad media es del 56.91%, obteniendo valores que se mueven en un rango de entre 43% y 75%. Se verifica que la humedad real media está entre 56.81% y 57.01% con una confianza del 95%.

En cambio, en el exterior, la humedad media es de 76.84%, obteniendo valores que se mueven en un rango de entre 35% y 100%. Se verifica que la humedad real media está entre 76.61% y 77.08% con una confianza del 95%.

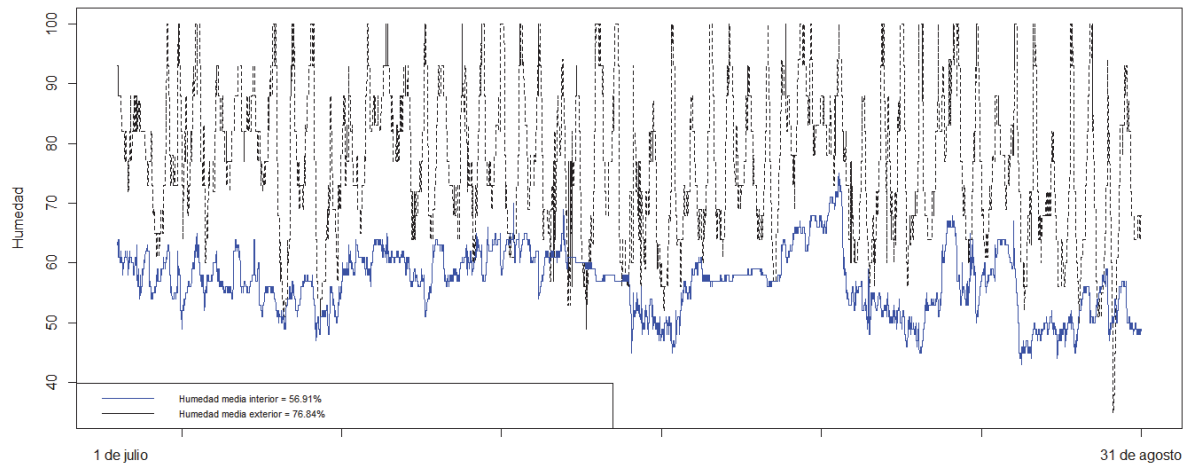


Figura 69. Relación de humedad interior – exterior durante 60 días. Fuente: R Project (2019)

Observando las variables ambientales generales, se comprueba que en el interior hay una mayor temperatura y una menor humedad que en el exterior.

Dado que el estudio se ha realizado en dos habitaciones distintas con orientaciones opuestas, se analizan los resultados descriptivos observados diferenciando entre el despacho y el dormitorio.

a) La temperatura puede ser mayor en el despacho que en el dormitorio

En el despacho, la temperatura media es de 25.3°C, obteniendo valores que se mueven en un rango de entre 22.7°C y 27.6°C. Se verifica que la temperatura real media está entre 25.26°C y 25.32°C con una confianza del 95%.

En cambio, en el dormitorio, la temperatura media es de 24.78°C, obteniendo valores que se mueven en un rango de entre 23.1°C y 26.1°C. Se verifica que la temperatura real media está entre 24.77°C y 24.79°C con una confianza del 95%.

Se quiere comprobar si existen evidencias de que la temperatura en el despacho es mayor que la del dormitorio, planteando un test unilateral a la derecha. Para ello, se comprueba la normalidad de la variable de estudio en ambos grupos, determinando la necesidad de realizar un test no paramétrico que arroja como resultado un p-value ≈ 0.00 . Esto indica que existen evidencias de que la temperatura media real en el despacho es superior a la temperatura media del dormitorio. De hecho, la diferencia real entre ambas medias será un valor entre 0.5°C y 0.6°C.

Dichas diferencias también pueden apreciarse a nivel muestral en los datos observados, según el gráfico siguiente:

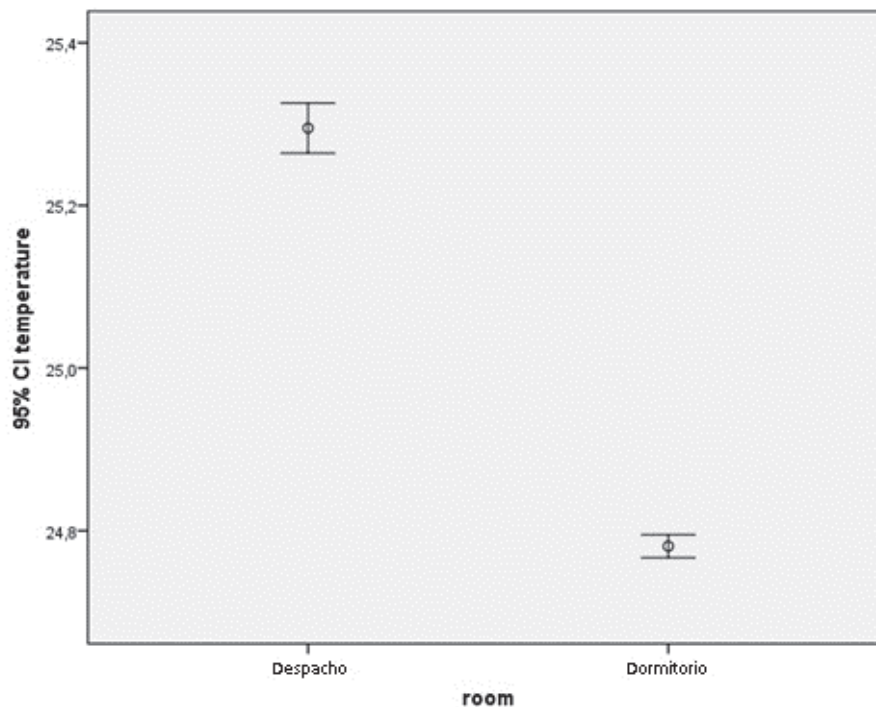


Figura 70. Temperatura en ambas estancias. Fuente: SPSS (2019)

Luego, se confirma la hipótesis de una mayor temperatura en °C en el despacho, ya que está orientada a sureste, con mayor aporte de energía solar y es la estancia más habitada.

b) La humedad puede ser menor en el despacho que en el dormitorio.

En el despacho, la humedad media es del 54.87%, obteniendo valores que se mueven en un rango entre 43% y 67%. Se verifica que la humedad real media está entre 54.72% y 55% con una confianza del 95%.

En cambio, en el dormitorio, la humedad media es de 58.32%, obteniendo valores que se mueven en un rango entre 45% y 75%. Se verifica que la humedad real media está entre 58.18% y 58.44% con una confianza del 95%.

Se quiere comprobar si existen evidencias de que la humedad en el despacho es menor que la del dormitorio, planteando un test unilateral a la izquierda. Para ello, se comprueba la normalidad de la variable de estudio en ambos grupos, determinando la necesidad de realizar un test no paramétrico que arroja como resultado un p-value ≈ 0.00 . Esto indica que existen evidencias de que la humedad media real en el despacho es inferior a la humedad media del dormitorio. De hecho, la diferencia real entre ambas medias será un valor entre 3% y 3.99%.

Dichas diferencias también pueden apreciarse a nivel muestral en los datos observados, según el gráfico siguiente:

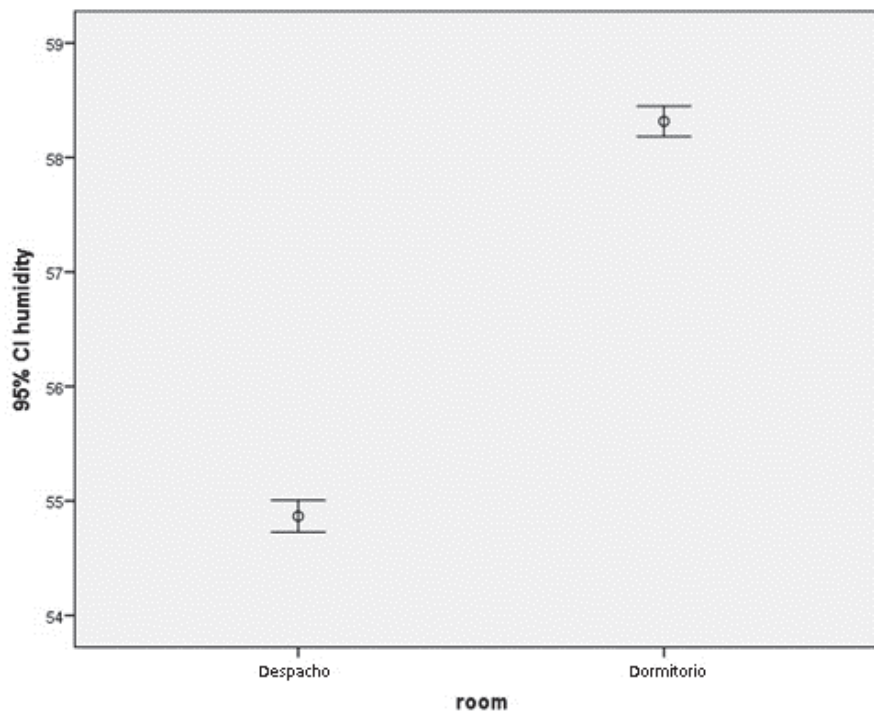


Figura 71. Humedad en ambas estancias. Fuente: SPSS (2019)

Luego, se confirma la hipótesis de una menor humedad en el despacho, ya que el dormitorio tiene un acceso directo a local húmedo, está orientado a norte y el aire de renovación proveniente del exterior puede contener más humedad.

c) **Modificación de las variables ambientales con la ventilación en el dormitorio.**

Se somete la estancia del dormitorio a una ventilación natural diurna y nocturna, ver datos en el Anexo III.

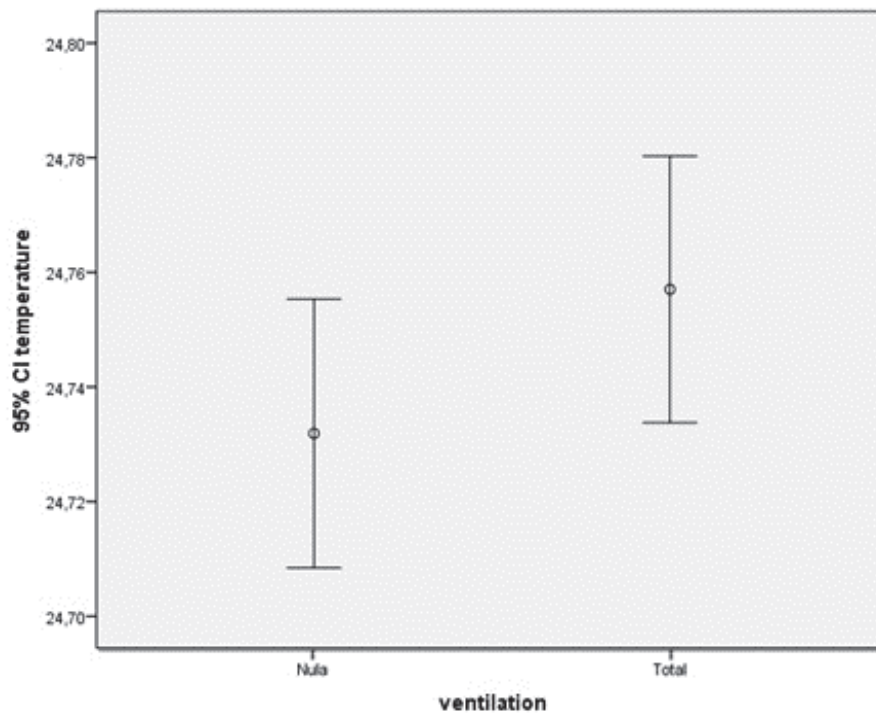


Figura 72. Modificación de la temperatura por la ventilación en el dormitorio. Fuente: SPSS (2019)

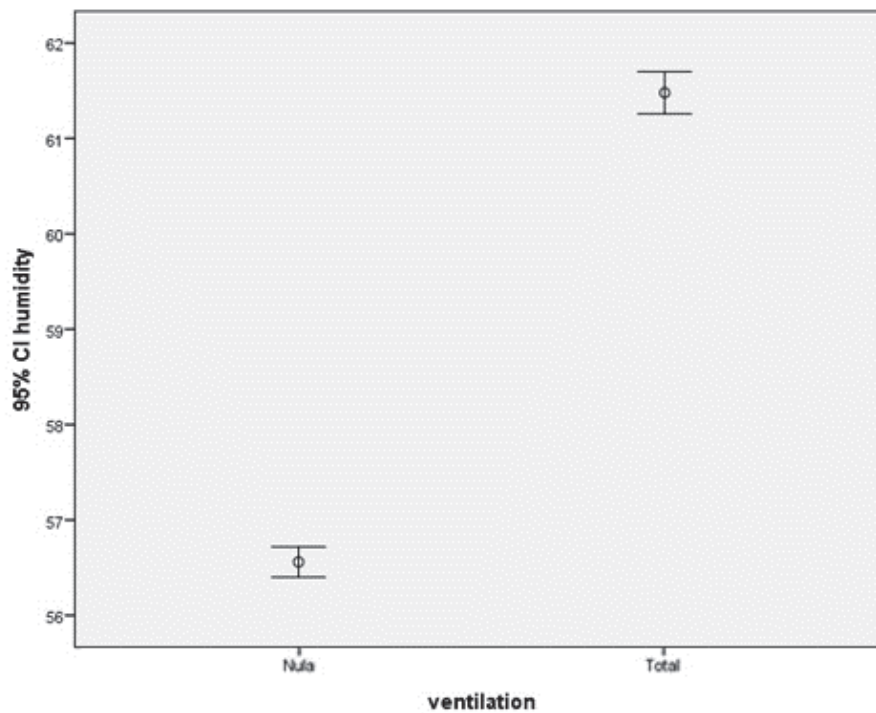


Figura 73. Modificación de la humedad por la ventilación en el dormitorio. Fuente: SPSS (2019)

La ventilación apenas modifica el gradiente de temperatura, manteniendo los 24°C. Sin embargo, permite notablemente la entrada de humedad en la estancia, ya que el aire exterior

es húmedo y proviene de un patio de luces con poca recirculación de aire, elevando el porcentaje de humedad de un 56.72% a 61.7%.

d) Modificación de las variables ambientales con la ventilación en el despacho.

Se somete la estancia del despacho a una ventilación natural diurna, ver datos en el Anexo III.

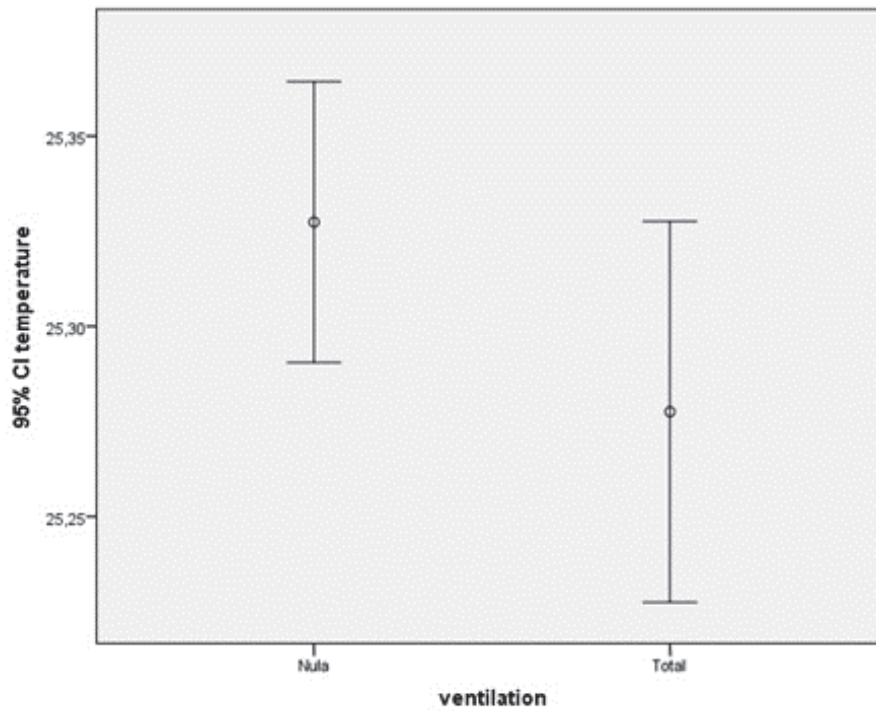


Figura 74. Modificación de la temperatura por la ventilación en el despacho. Fuente: SPSS (2019)

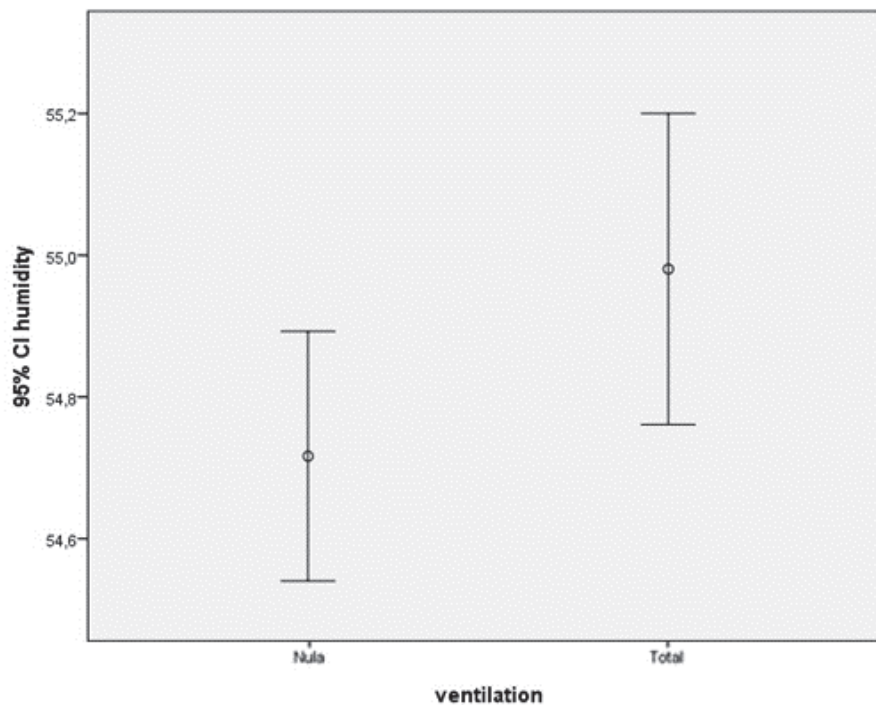


Figura 75. Modificación de la humedad por la ventilación en el despacho. Fuente: SPSS (2019)

La ventilación apenas modifica la temperatura y ligeramente varía la humedad, ya que, a pesar de que el aire exterior es húmedo, la velocidad del viento la dispersa.

2. LA CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES EN CADA ESTANCIA.

Una de las limitaciones de la configuración del sistema surge en la toma de datos del sensor de CO₂ y VOC ya que mide TVOC, es decir, las concentraciones de compuestos orgánicos volátil total, refiriéndose a los múltiples VOC que hay presentes en el aire simultáneamente.

La mayoría de las concentraciones de TVOC informadas en ambientes interiores no industriales son inferiores a 1 mg/m³ y pocas superan los 25 mg/m³ (Molhave et al. 1997), sin embargo, en el ensayo se observaron valores extremos propios de errores del instrumento de medida, puesto que el sensor no interactúa bien con otros dispositivos en la misma conexión.

Por otro lado, las concentraciones de CO₂ en ambientes interiores no industriales se pueden encontrar valores de 2000-3000 ppm como en oficinas y escuelas, sin embargo, en interior de vivienda no se suelen pasar de los 2000 ppm.

Así pues, tanto los valores de extremos en la concentración de CO₂ y VOC se desestiman, además, no tienen una frecuencia tal comparada con las medidas válidas.

Por otro lado, los valores reales de TVOC no se pueden tener en cuenta porque se desconoce la cantidad de gases presentes y sus límites admisibles como para establecer una comparación, sin embargo, la variabilidad del conjunto sí es aceptable para entender el efecto de la ventilación en la polución.

a) La concentración de CO₂ puede ser mayor en el despacho por el día y en el dormitorio por la noche.

En el despacho, por la noche la concentración media de CO₂ es de 1644.33 ppm, obteniendo valores que se mueven en un rango de entre 0 ppm y 7992 ppm. Se verifica que la concentración real media de CO₂ está entre 1525.16 ppm y 1763.49 ppm con una confianza del 95%.

Sin embargo, por el día la concentración media de CO₂ es de 2046.47 ppm, obteniendo valores que se mueven en el mismo rango de la noche. Se verifica que la concentración real media de CO₂ está entre 1977.96 ppm y 2114.97 ppm con una confianza del 95%.

En cambio, en el dormitorio, por la noche la concentración media de CO₂ es de 1799.90 ppm, obteniendo valores que se mueven en un rango de entre 400 ppm y 7992 ppm. Se verifica que la concentración real media de CO₂ está entre 1703.07 ppm y 1896.74 ppm con una confianza del 95%.

Sin embargo, por el día la concentración media de CO₂ es de 1526.24 ppm, obteniendo valores que se mueven en el mismo rango de la noche. Se verifica que la concentración real media de CO₂ está entre 1483.3 ppm y 1569.17 ppm con una confianza del 95%.

Se quiere comprobar si existen evidencias de que la concentración media de CO₂ en el despacho es mayor por el día que la del dormitorio, y menor por la noche que la del dormitorio. Para ello, se comprueba la normalidad de la variable de estudio en los grupos, determinando la necesidad de realizar tests no paramétricos que arrojan como resultado p-values ≈ 0.00 . Esto indica que existen evidencias de que la concentración media real de CO₂ en el despacho es superior durante el día y la del dormitorio es superior durante la noche.

Dichas diferencias también pueden apreciarse a nivel muestral en los datos observados, según el gráfico siguiente:

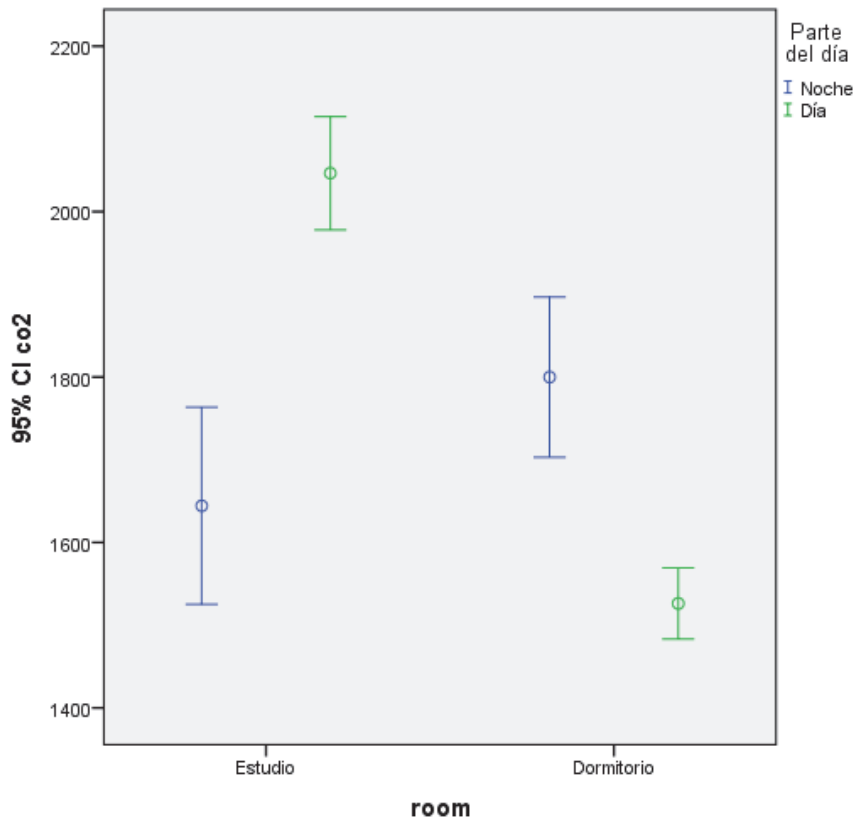


Figura 76. Concentración de CO₂ en el despacho y dormitorio. Fuente: SPSS (2019)

Luego, se confirma la hipótesis de una mayor concentración de CO₂ durante el día en el despacho y en el dormitorio durante la noche por corresponder a las fases de tiempo de ocupación de cada estancia.

b) La concentración de VOC puede ser similar en ambas estancias.

En el despacho, la concentración media de VOC es de 238.9 ppb⁴⁸, obteniendo valores que se mueven en un rango de entre 0 ppb y 1156 ppb. Se verifica que la concentración real media de VOC está entre 229.75 ppb y 248.06 ppb con una confianza del 95%.

En cambio, en el dormitorio, la concentración media de VOC es de 179.1 ppb, obteniendo valores que se mueven en el mismo rango que en el despacho. Se verifica que la concentración real media de VOC está entre 173.05 ppb y 185.06 ppb con una confianza del 95%.

Se quiere comprobar si la concentración media de VOC en el despacho es similar a la del dormitorio planteando un test bilateral. Para ello, se comprueba la normalidad de la variable de estudio en ambos grupos, determinando la necesidad de realizar un test no paramétrico que arroja como resultado un p-value ≈ 0.00. Esto indica que existen evidencias de que la concentración media real en el despacho es distinta a la concentración media del dormitorio.

⁴⁸ ppb: partes por billón

De hecho, la diferencia real entre ambas medias será un valor entre 10 ppb y 19 ppb.

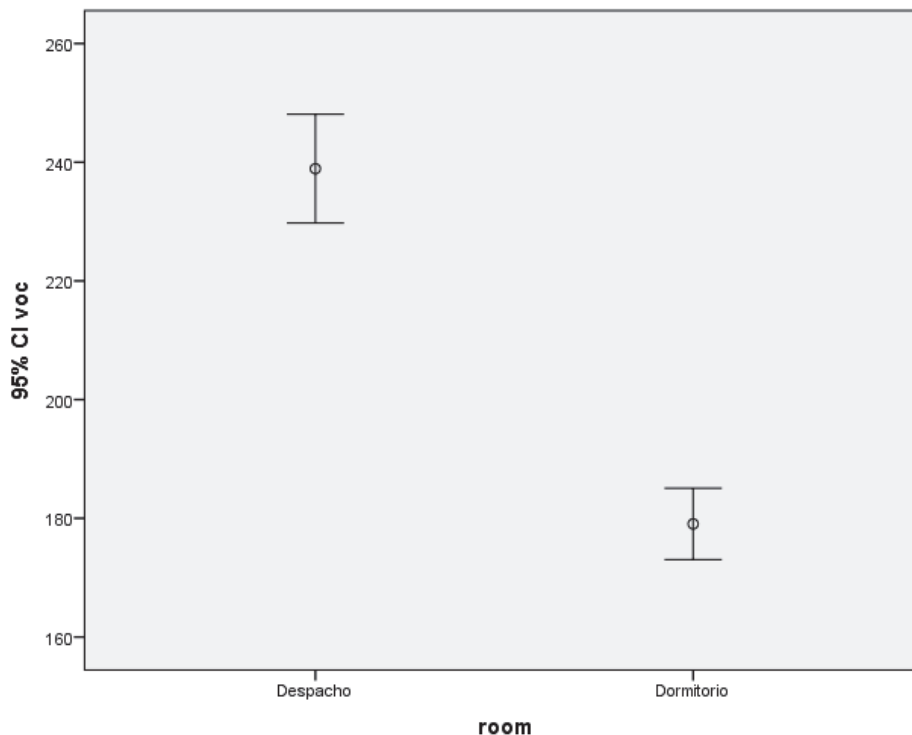


Figura 77. Concentración de VOC en el despacho y en el dormitorio. Fuente: SPSS (2019)

c) La concentración de material particulado puede ser mayor en el despacho que en el dormitorio.

Para PM_{2,5}

En el despacho, la concentración media es de 7.08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, obteniendo valores que se mueven en un rango de entre 0.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 26.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Se verifica que la concentración real media está entre 6.94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 7.23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con una confianza del 95%.

En cambio, en el dormitorio, la concentración media es de 4.69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, obteniendo valores que se mueven en un rango de entre 0.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 32.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Se verifica que la concentración real media está entre 4.61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 4.76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con una confianza del 95%.

Se quiere comprobar si existen evidencias de que la concentración en el despacho es mayor que la del dormitorio, planteando un test unilateral a la derecha. Para ello, se comprueba la normalidad de la variable de estudio en ambos grupos, determinando la necesidad de realizar un test no paramétrico que arroja como resultado un p-value ≈ 0.00 . Esto indica que existen evidencias de que la concentración media real en el despacho es superior a la concentración media del dormitorio. De hecho, la diferencia real entre ambas medias será un valor entre 1.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 1.69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

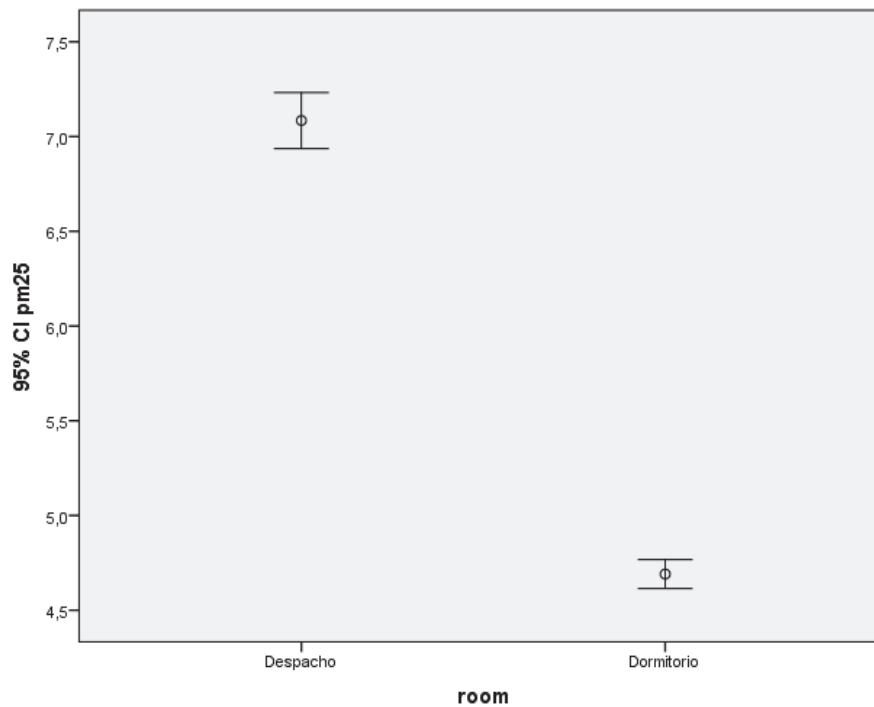


Figura 78. Concentración de PM_{2,5} en el despacho y en el dormitorio. Fuente: SPSS (2019)

Para PM₁₀

En el despacho, la concentración media es de 11.84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, obteniendo valores que se mueven en un rango de entre 1.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 39.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Se verifica que la concentración real media está entre 11.66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 12.03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con una confianza del 95%.

En cambio, en el dormitorio, la concentración media es de 8.81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, obteniendo valores que se mueven en un rango de entre 0.50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Se verifica que la concentración real media está entre 8.69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 8.94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con una confianza del 95%.

Se quiere comprobar si existen evidencias de que la concentración en el despacho es mayor que la del dormitorio, planteando un test unilateral a la derecha. Para ello, se comprueba la normalidad de la variable de estudio en ambos grupos, determinando la necesidad de realizar un test no paramétrico que arroja como resultado un p-value ≈ 0.00 . Esto indica que existen evidencias de que la concentración media real en el despacho es superior a la concentración media del dormitorio. De hecho, la diferencia real entre ambas medias será un valor entre 2.49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 2.89 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

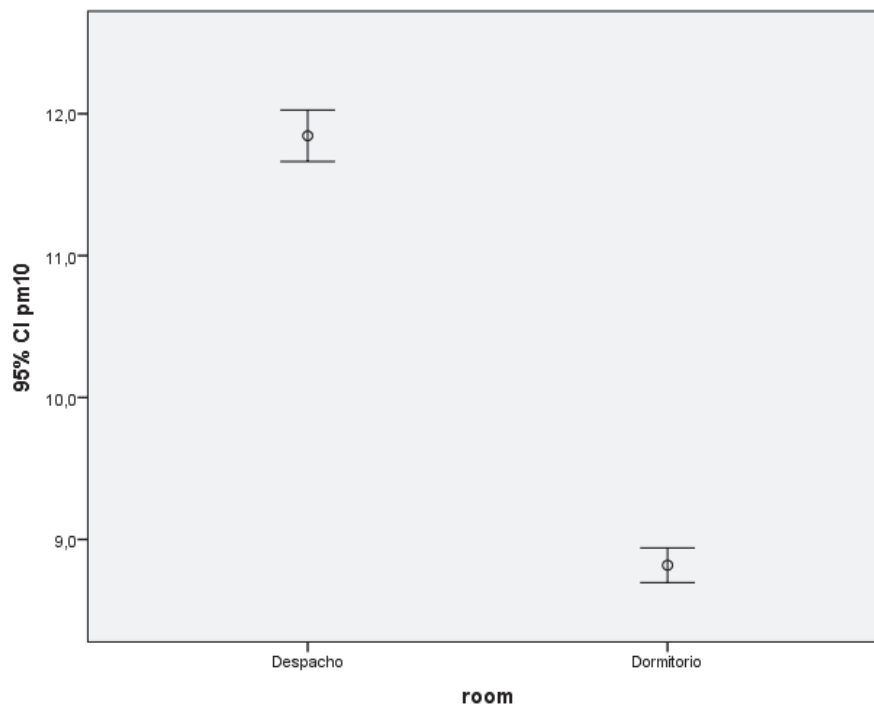


Figura 79. Concentración de PM₁₀ en el despacho y en el dormitorio. Fuente: SPSS (2019)

d) La concentración de tóxicos puede disminuir con la ventilación en el dormitorio.

En el dormitorio sin ventilación, la concentración media de CO₂ es de 1371.4 ppm, obteniendo valores que se mueven en un rango de entre 400 ppm y 7985 ppm. Se verifica que la concentración real media de CO₂ está entre 1318.23 ppm y 1424.58 ppm con una confianza del 95%.

La misma estancia con ventilación presenta una concentración media de CO₂ de 1292.9 ppm, obteniendo valores que se mueven en el mismo rango que la situación anterior. Se verifica que la concentración real media de CO₂ está entre 1245.49 ppm y 1340.32 ppm con una confianza del 95%.

Se quiere comprobar si existen evidencias de que la concentración en el dormitorio disminuya con la ventilación, planteando un test unilateral a la derecha. Para ello, se comprueba la normalidad de la variable de estudio en ambos grupos, determinando la necesidad de realizar un test no paramétrico que arroja como resultado un p-value ≈ 0.00 . Esto indica que existen evidencias de que la concentración media real en el dormitorio se reduce con la ventilación.

Puede apreciarse a nivel muestral en los datos observados el gráfico siguiente:

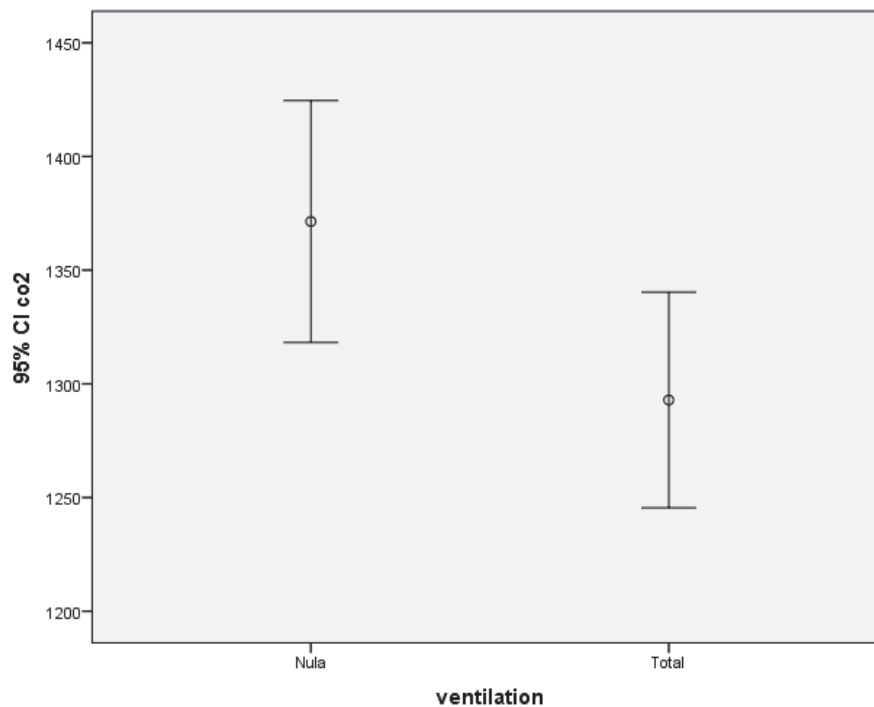


Figura 80. Modificación de CO₂ por la ventilación en el dormitorio. Fuente: SPSS (2019)

Luego, se confirma la hipótesis de una menor concentración de CO₂ en el dormitorio gracias a la ventilación, aunque muestralmente no se aprecie demasiado.

En el dormitorio sin ventilación, la concentración media de VOC es de 147.49 ppb, obteniendo valores que se mueven en un rango de entre 0 ppb y 1155 ppb. Se verifica que la concentración real media de VOC está entre 139.39 ppb y 155.59 ppb con una confianza del 95%.

La misma estancia con ventilación presenta una concentración media de VOC de 135.54 ppb, obteniendo valores que se mueven en el mismo rango que sin ventilación. Se verifica que la concentración real media de VOC está entre 128.31 ppb y 142.76 ppb con una confianza del 95%.

Se quiere comprobar si existen evidencias de que la concentración en el dormitorio disminuye con la ventilación, planteando un test unilateral a la derecha. Para ello, se comprueba la normalidad de la variable de estudio en ambos grupos, determinando la necesidad de realizar un test no paramétrico que arroja como resultado un p-value ≈ 0.00 . Esto indica que existen evidencias de que la concentración media real en el dormitorio se reduce.

Dichas diferencias pueden apreciarse a nivel muestral en los datos observados, según el gráfico siguiente:

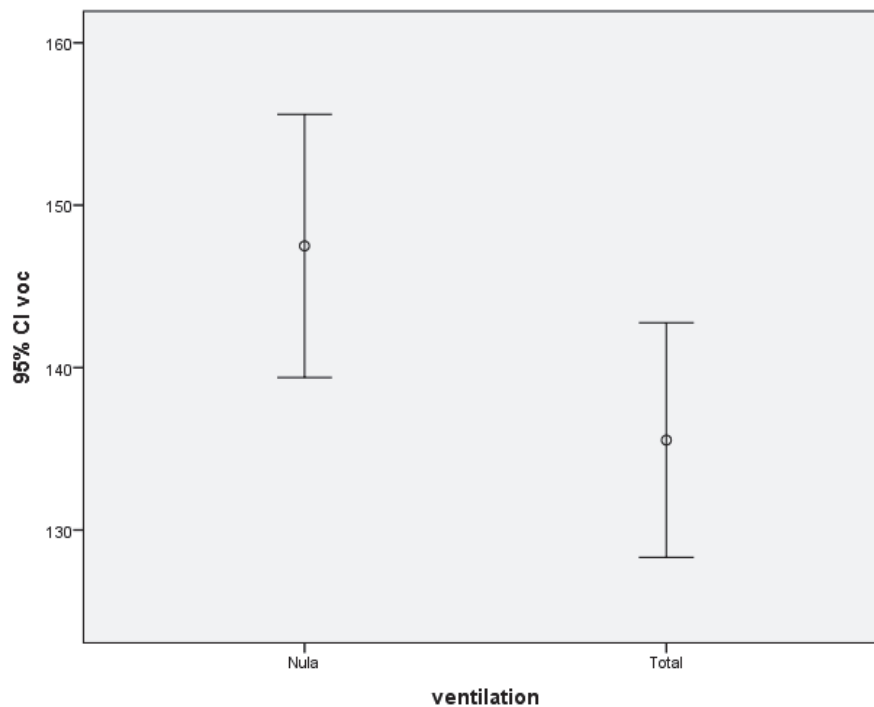


Figura 81. Modificación de VOC por la ventilación en el dormitorio. Fuente: SPSS (2019)

Luego, se confirma la hipótesis de una menor concentración de VOC en el dormitorio gracias a la ventilación, aunque muestralmente no se aprecie demasiado.

En el dormitorio sin ventilación, la concentración media de $PM_{2,5}$ es de $3.41 \mu\text{g}/\text{m}^3$, obteniendo valores que se mueven en un rango de entre $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $16.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Se verifica que la concentración real media de $PM_{2,5}$ está entre $3.34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $3.49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con una confianza del 95%.

La misma estancia con ventilación presenta una concentración media de $PM_{2,5}$ es de $5.81 \mu\text{g}/\text{m}^3$, obteniendo valores que se mueven en un rango de entre $0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $32.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Se verifica que la concentración real media de $PM_{2,5}$ está entre $5.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $5.95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con una confianza del 95%.

Se quiere comprobar si existen evidencias de que la concentración en el dormitorio disminuye con la ventilación, planteando un test unilateral a la derecha. Para ello, se comprueba la normalidad de la variable de estudio en ambos grupos, determinando la necesidad de realizar un test no paramétrico que arroja como resultado un $p\text{-value} \approx 1.00$. Esto indica que no existen evidencias de que la concentración media real en el dormitorio se reduzca, por lo tanto habrá que aceptar que la concentración se mantiene igual o aumenta con la ventilación.

Dichas diferencias pueden apreciarse a nivel muestral en los datos observados, según el gráfico siguiente:

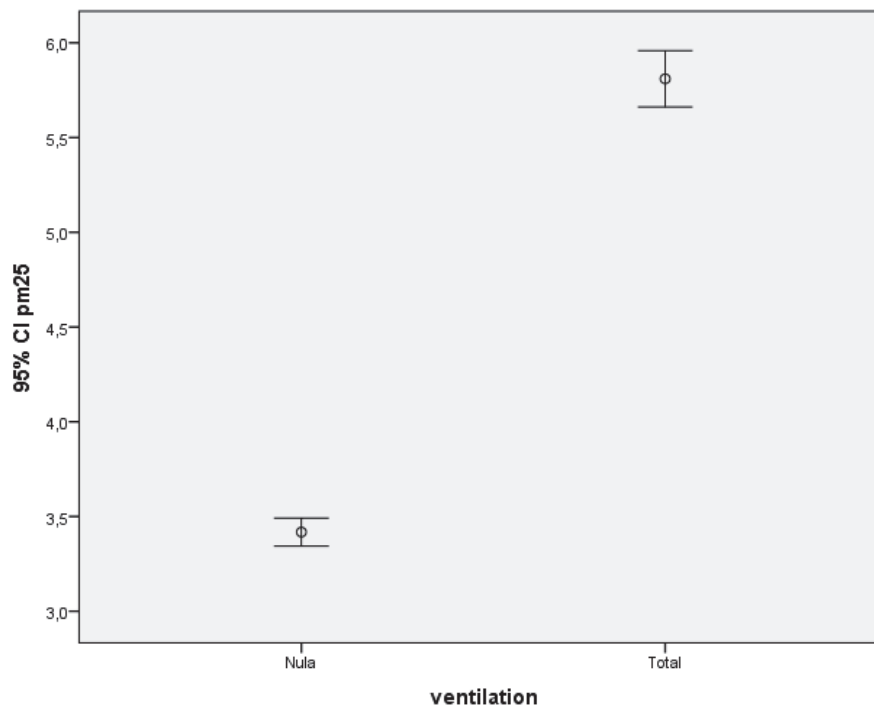


Figura 82. Modificación de PM_{2,5} por la ventilación en el dormitorio. Fuente: SPSS (2019)

Luego, no se confirma la hipótesis de una menor concentración de PM_{2,5} en el dormitorio con la ventilación. El aumento de material particulado en el interior se debe a la entrada de la polución del exterior.

En el dormitorio sin ventilación, la concentración media de PM₁₀ es de 6.76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, obteniendo valores que se mueven en un rango de entre 1.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 28.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Se verifica que la concentración real media de PM₁₀ está entre 6.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 6.93 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con una confianza del 95%.

La misma estancia con ventilación presenta una concentración media de PM₁₀ es de 10.13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, obteniendo valores que se mueven en un rango de entre 0.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 40.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Se verifica que la concentración real media de PM₁₀ está entre 9.91 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 10.34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con una confianza del 95%.

Se quiere comprobar si existen evidencias de que la concentración en el dormitorio disminuye con la ventilación, planteando un test unilateral a la derecha. Para ello, se comprueba la normalidad de la variable de estudio en ambos grupos, determinando la necesidad de realizar un test no paramétrico que arroja como resultado un p-value ≈ 1.00 . Esto indica que no existen evidencias de que la concentración media real en el dormitorio se reduzca, por lo tanto habrá que aceptar que la concentración se mantiene igual o aumenta con la ventilación.

Dichas diferencias pueden apreciarse a nivel muestral en los datos observados, según el gráfico siguiente:

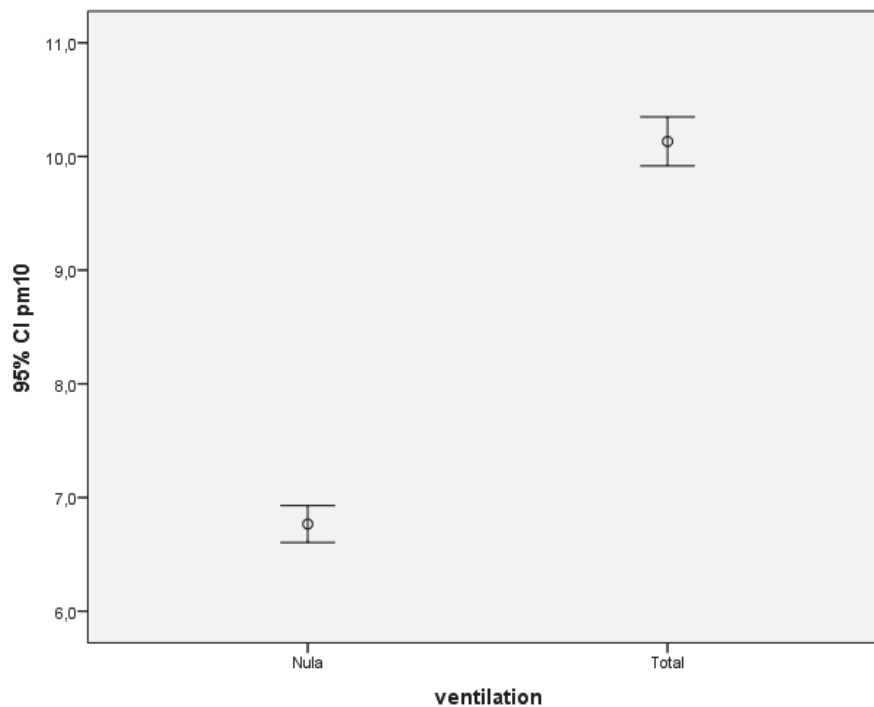


Figura 83. Modificación de PM_{10} por la ventilación en el dormitorio. Fuente: SPSS (2019)

Luego, no se confirma la hipótesis de una menor concentración de PM_{10} en el dormitorio con ventilación. El aumento de material particulado en el interior se debe a la entrada del contaminante del exterior, puesto que el aire de renovación que proviene del patio de luces contiene polución.

e) La concentración de tóxicos puede disminuir con la ventilación en el despacho.

En el despacho sin ventilación, la concentración media de CO_2 es de 1989.13 ppm, obteniendo valores que se mueven en un rango entre 0 ppm y 7992 ppm. Se verifica que la concentración real media de CO_2 está entre 1909.35 ppm y 2068.9 ppm con una confianza del 95%.

La misma estancia con ventilación presenta una concentración media de CO_2 es de 1951.66 ppm, obteniendo valores que se mueven en el mismo rango anterior. Se verifica que la concentración real media de CO_2 está entre 1859.92 ppm y 2043.4 ppm con una confianza del 95%.

Se quiere comprobar si existen evidencias de que la concentración en el despacho disminuye con la ventilación, planteando un test unilateral a la derecha. Para ello, se comprueba la normalidad de la variable de estudio en ambos grupos, determinando la necesidad de realizar un test no paramétrico que arroja como resultado un p-value ≈ 0.00 . Esto indica que existen evidencias de que la concentración media real en el despacho se reduce.

Dichas diferencias pueden apreciarse a nivel muestral en los datos observados, según el gráfico siguiente:

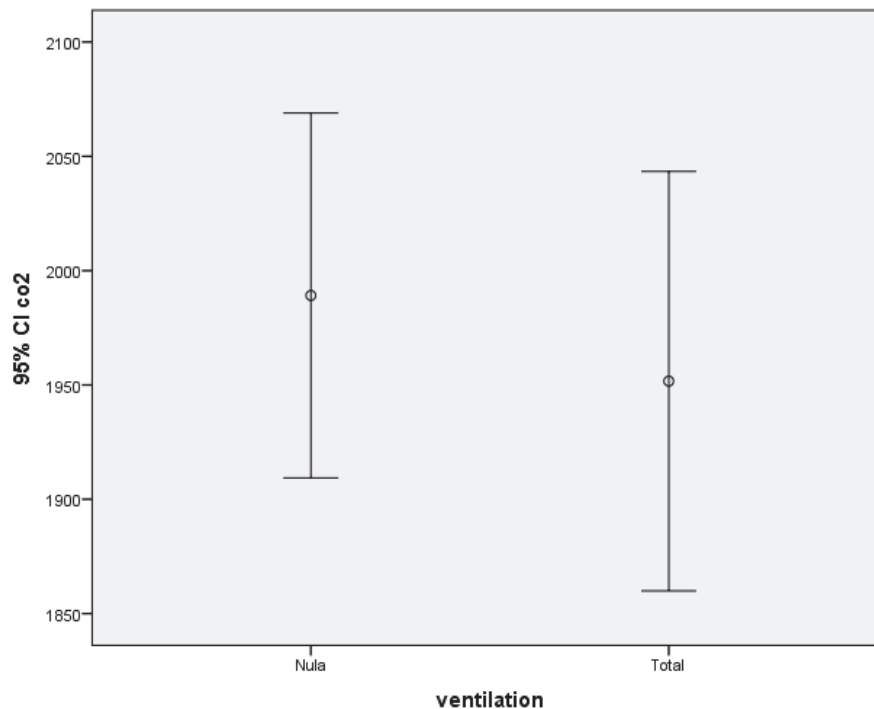


Figura 84. Modificación de CO₂ por la ventilación en el despacho. Fuente: SPSS (2019)

Luego, se confirma la hipótesis de una menor concentración de CO₂ en el despacho gracias a la ventilación, aunque en muy poca medida.

En el despacho sin ventilación, la concentración media de VOC es de 241.75 ppb, obteniendo valores que se mueven en un rango de entre 0 ppb y 1556 ppb. Se verifica que la concentración real media de VOC está entre 229.6 ppb y 253.89 ppb con una confianza del 95%.

La misma estancia con ventilación presenta una concentración media de VOC de 235.95 ppb, obteniendo valores que se mueven en el mismo rango anterior. Se verifica que la concentración real media de VOC está entre 221.97 ppb y 249.92 ppb con una confianza del 95%.

Se quiere comprobar si existen evidencias de que la concentración en el despacho disminuye con la ventilación, planteando un test unilateral a la derecha. Para ello, se comprueba la normalidad de la variable de estudio en ambos grupos, determinando la necesidad de realizar un test no paramétrico que arroja como resultado un p-value ≈ 0.00 . Esto indica que existen evidencias de que la concentración media real en el despacho se reduce.

Dichas diferencias pueden apreciarse a nivel muestral en los datos observados, según el gráfico siguiente:

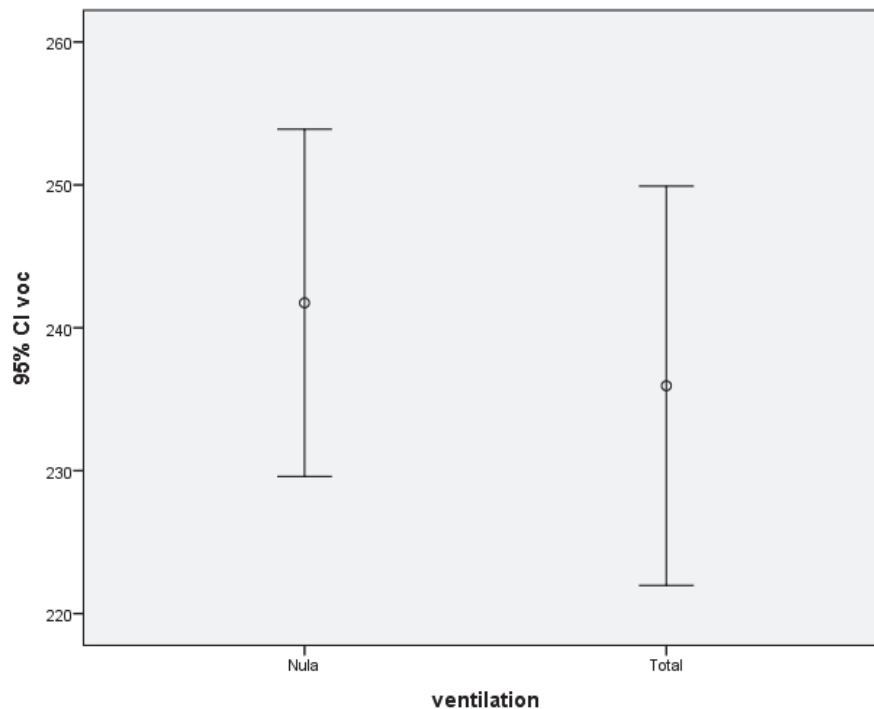


Figura 85. Modificación de VOC por la ventilación en el despacho. Fuente: SPSS (2019)

Luego, se confirma la hipótesis de una menor concentración de VOC en el despacho gracias a la ventilación, aunque en muy poca media.

En el despacho sin ventilación, la concentración media de $PM_{2,5}$ es de $8.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$, obteniendo valores que se mueven en un rango de entre $1.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $26.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Se verifica que la concentración real media de $PM_{2,5}$ está entre $8.65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $9.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con una confianza del 95%.

La misma estancia con ventilación presenta una concentración media de $PM_{2,5}$ es de $5.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, obteniendo valores que se mueven en un rango de entre $0.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $17.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Se verifica que la concentración real media de $PM_{2,5}$ está entre $5.08 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $5.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con una confianza del 95%.

Se quiere comprobar si existen evidencias de que la concentración en el despacho disminuye con la ventilación, planteando un test unilateral a la derecha. Para ello, se comprueba la normalidad de la variable de estudio en ambos grupos, determinando la necesidad de realizar un test no paramétrico que arroja como resultado un $p\text{-value} \approx 0.00$. Esto indica que existen evidencias de que la concentración media real en el despacho se reduce.

Dichas diferencias pueden apreciarse a nivel muestral en los datos observados, según el gráfico siguiente:

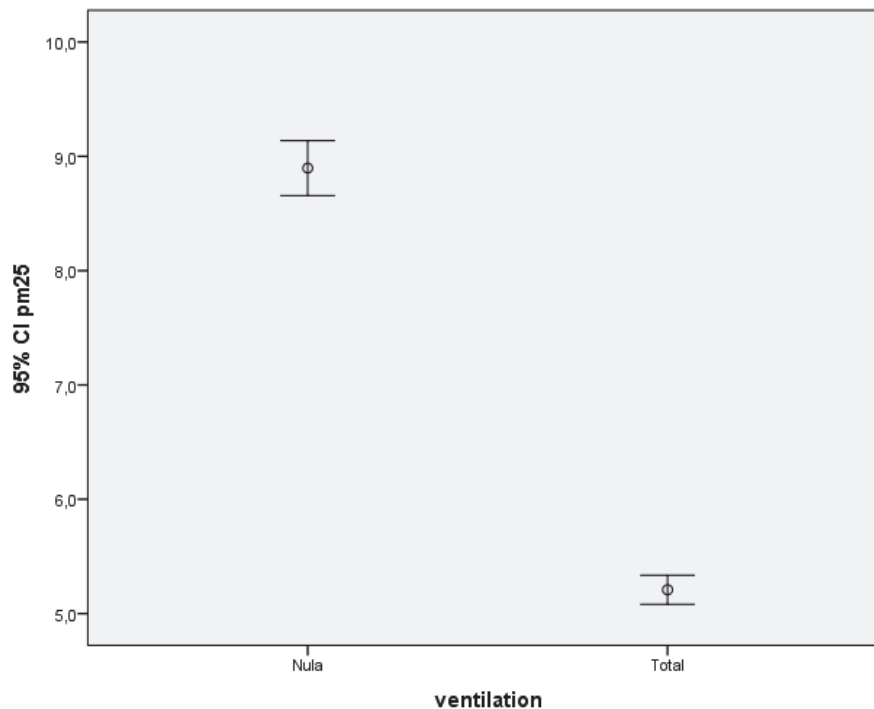


Figura 86. Modificación de PM_{2,5} por la ventilación en el despacho. Fuente: SPSS (2019)

Luego, se confirma la hipótesis de una menor concentración de PM_{2,5} en el despacho con la ventilación. Esta disminución se debe a que, a pesar de que el aire exterior pueda estar afectado, la velocidad del viento ayuda a dispersar de manera más rápida los contaminantes.

En el despacho sin ventilación, la concentración media de PM₁₀ es de 13.56 µg/m³, obteniendo valores que se mueven en un rango de entre 2.3 µg/m³ y 39.2 µg/m³. Se verifica que la concentración real media de PM₁₀ está entre 13.27 µg/m³ y 13.84 µg/m³ con una confianza del 95%.

La misma estancia con ventilación presenta una concentración media de PM₁₀ es de 10.04 µg/m³, obteniendo valores que se mueven en un rango de entre 1.1 µg/m³ y 27.7 µg/m³. Se verifica que la concentración real media de PM₁₀ está entre 9.84 µg/m³ y 10.24 µg/m³ con una confianza del 95%.

Se quiere comprobar si existen evidencias de que la concentración en el despacho disminuye con la ventilación, planteando un test unilateral a la derecha. Para ello, se comprueba la normalidad de la variable de estudio en ambos grupos, determinando la necesidad de realizar un test no paramétrico que arroja como resultado un p-value ≈ 0.00. Esto indica que existen evidencias de que la concentración media real en el despacho se reduce.

Dichas diferencias pueden apreciarse a nivel muestral en los datos observados, según el gráfico siguiente:

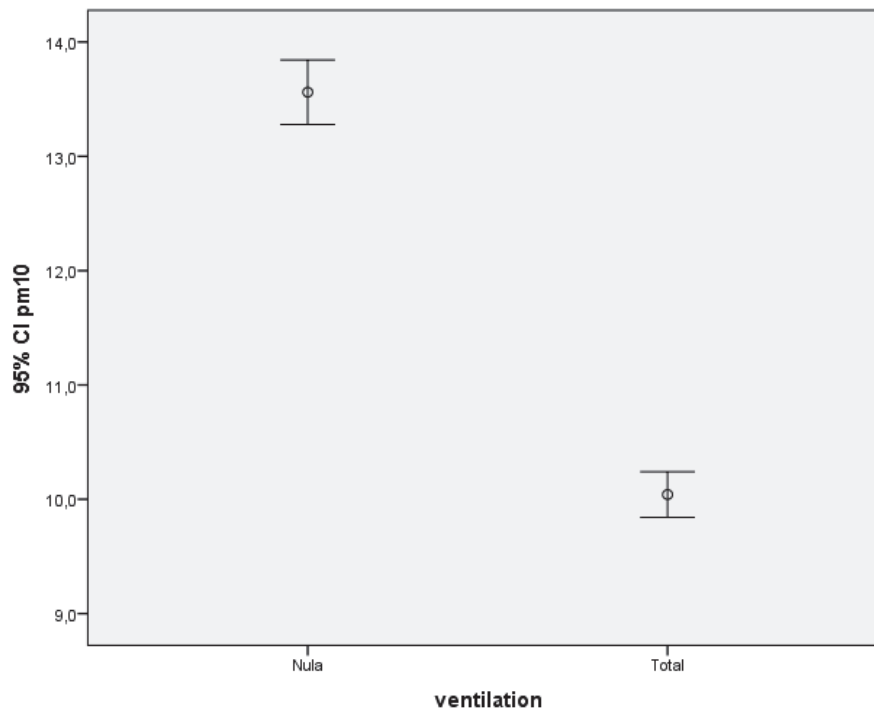


Figura 87. Modificación de PM₁₀ por la ventilación en el despacho. Fuente: SPSS (2019)

Luego, se confirma la hipótesis de una menor concentración de PM₁₀ en el despacho gracias a la ventilación. Esta disminución se podría deber a que, a pesar de que el aire exterior pueda estar afectado, la velocidad del viento ayuda a dispersar de manera más rápida los contaminantes.

Como se indicó en el apartado de contextualización, en el año 2017, Galicia tenía la concentración media anual en PM_{2,5} en tercer lugar con respecto al resto de comunidades, con unos valores de 13,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y de PM₁₀ en 23,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, superando los umbrales establecidos por la OMS. (INE 2018b)

Durante el tiempo de realización de la prueba, se publicó otro estudio cuyos datos mostraban la concentración anual de partículas PM₁₀ y PM_{2,5} en varias ciudades, entre 1986 y 2015.

Sobre el PM₁₀, en Coruña se registraron 26,03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de media anual, superando el límite aconsejado de este material particulado que se sitúa en 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ por año —ver Anexo I—. En general el aumento diario de microgramos de PM₁₀ ocasiona una subida en la mortalidad por problemas respiratorios y cardiovasculares.

En relación con la concentración de PM_{2,5}, el estudio no tiene datos de la zona de análisis, aunque sí la media del país, 11 microgramos —el límite está en 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ por año—, siendo su aumento diario causante también de la subida de mortalidad por problemas respiratorios y cardiovasculares. (Liu et al. 2019)

Los resultados del ensayo de este trabajo demuestran una concentración de PM en el interior de la vivienda debido a la introducción de la contaminación del exterior.

Para conocer la calidad de aire exterior se recurre al apartado de información ambiental del ayuntamiento de Coruña, cuya red de vigilancia consta de cuatro estaciones. La más cercana a la zona de estudio ofrece el parámetro del material particulado, sin embargo, no aporta ningún dato desde mayo de 2018, por lo que no se pudo hacer la comprobación más directa.

Aun así, los resultados de la concentración de contaminantes no superan en el interior de la vivienda los límites de seguridad.

12.6 CONCLUSIONES

A través del pequeño experimento se ha comprobado la calidad de aire y el efecto de la ventilación en el interior de dos estancias de una vivienda.

Teniendo en cuenta las condiciones climatológicas de fase estival, la situación de la vivienda, así como su altura, orientación, ocupación y los flujos de aire a los que se somete con la ventilación natural, se podría concluir que:

- La ventilación modifica las condiciones ambientales en temperatura y humedad en poca medida.

La temperatura en el despacho apenas se modifica con la ventilación, suponiendo una variación de centésimas de grado, entre 0.04 - 0.09 °C. Misma situación se verifica en el dormitorio, donde la variación estaría entre 0.05 °C y 0.14 °C.

Con respecto a la humedad, en el despacho se modifica con la ventilación, llegando a aumentar hasta un 9% más y en el dormitorio entre un 4.9% y 5%.

- Se podrían medir con más o menos precisión la cantidad de tóxicos en el aire interior.

En el interior de la vivienda, el valor medio del CO₂ varía entre 1703.9 y 1772.0 ppm, situándose el promedio de VOC entre 198.2 y 208.5 ppb.

Con respecto al material particulado, la media de PM_{2.5} varía entre 5.58 y 5.73 µg/m³, mientras que la de PM₁₀ está entre 9.93 y 10.15 µg/m³, verificando niveles dentro del límite de seguridad.

- La concentración de CO₂ se eleva con la ocupación.

En el despacho, los niveles de CO₂ pueden llegar a aumentar cuando hay ocupación durante el día entre 41.9 y 161 ppm. En cambio, estos niveles aumentan por la noche en el dormitorio, con un promedio entre 84.9 y 196 ppm de variación.

- La ventilación natural ayudaría a disminuir la cantidad de CO₂ y TVOC.

En el despacho, la concentración de CO₂ puede llegar a disminuir con la ventilación un 1.86%, entre 66.0 y 163.9 ppm, mientras que en el dormitorio disminuiría un 5.68%, variando entre 56.5 y 193.5 ppm.

Respecto a la cantidad TVOC, esta puede llegar a disminuir con la ventilación un 2.39%, entre 10.0 y 24.9 ppb en el despacho, mientras que en el dormitorio rondaría el 8.13%, variando entre 3 y 10.9 ppb.

- La ventilación natural parece que empeora la calidad de aire interior con la entrada de material particulado, aunque no sobrepasa los límites de seguridad.

En el despacho, la concentración de PM_{2.5} puede llegar a disminuir con la ventilación un 41.46%, entre 2.2 y 2.8 µg/m³, mientras que en el dormitorio sucede lo contrario, aumentando un 69.68%, entre 1.79 y 2 µg/m³.

Respecto a la cantidad de PM₁₀, esta puede llegar a disminuir con la ventilación un 25.95%, entre 2.4 y 3.0 µg/m³ en el despacho. En cambio, en el dormitorio sucede de nuevo lo contrario, pudiendo aumentar un 49.69%, entre 3.1 y 3.6 µg/m³ con la entrada de aire exterior.

13. CONCLUSIONES

A lo largo del trabajo se ha querido investigar sobre las posibles soluciones para la mejora del ambiente interior a través de medidas pasivas que ayuden a reducir problemas respiratorios.

Teniendo en cuenta el planteamiento del problema y los objetivos especificados al inicio, una vez realizada la investigación se podría concluir que:

1. Las **leyes y normas** a seguir en construcción aportan la teoría para mantener la calidad de ambiente interior a la hora de realizar un proyecto. Los requisitos del CTE HS3 indican los caudales necesarios de ventilación, así como su diseño teniendo en cuenta secciones mínimas de aberturas o conductos de extracción y su disposición. Cumplir el RITE significa haber estudiado el entorno y las necesidades energéticas del edificio y conocer la categoría del ambiente exterior y del interior. Sin embargo, a pesar de tener las herramientas que garanticen una calidad de aire interior adecuada, no se suele comprobar una vez finalizado el proyecto de vivienda.
2. Las **consecuencias de discomfort** ante una mala calidad de aire, son variadas según los factores individuales de la persona, los factores geográficos, la estación del año, la variabilidad a lo largo del día, así como cuestiones económicas, sociales y culturales.

En general, en el interior de la vivienda se genera una mezcla compleja de agentes físicos, químicos y biológicos que contaminan el ambiente, aunque suele ser en baja concentración. En particular, existen varios **agentes tóxicos** transmitidos al ser humano por inhalación que ocasionan problemas respiratorios de asma y rinitis alérgica.

Los principales agentes físicos que afectan la zona de estudio son la presencia de humedad y el viento, que van a caracterizar un ambiente húmedo y a condicionar las opciones de una ventilación adecuada.

Los principales contaminantes químicos en interior que afectan a la respiración provocando asma son el material particulado, el ozono, dióxido de nitrógeno, el monóxido de carbono, el dióxido de azufre, el benceno, los hidrocarburos aromáticos policíclicos y los compuestos orgánicos volátiles. Con origen exterior son habituales en las emisiones de tráfico, el polvo acumulado en la carretera, los motores diésel y de gasolina, de combustiones para producción de energía, de incineradoras de residuos y de la industria de carbón, petróleo y gas. Desde fuentes interiores, los contaminantes se originan en estufas de gas, en chimeneas abiertas, estufas que realizan mal la combustión, calderas mal ventiladas, en el tabaco, en la quema de velas e incienso, en ambientadores y en materiales plásticos, pinturas, barnices, telas y mobiliario de madera aglomerada y contrachapada.

Los agentes biológicos dependen de condicionantes ambientales siendo los más relevantes los ácaros del polvo y los hongos. Estos proliferan en ambiente de humedad y temperatura alta, ayudados de materiales poco higroscópicos, condensaciones y puentes

térmicos, una deficiente ventilación, el mal diseño de la extracción y renovación del aire, etc.

3. La zona de estudio se muestra propicia para obtener casos de **asma y rinitis** provocada por ácaros debido a la humedad y al efecto modulador de las temperaturas del mar. Además, el tiempo elevado de permanencia en el interior de la vivienda, la temperatura y humedad un poco más elevadas en el interior que el exterior, la falta de ventilación y las infiltraciones que pueden introducir polución desde el exterior, influyen en los síntomas de estas afecciones respiratorias.

Las **medidas ideales** a tomar para eliminar los ácaros consisten en una ventilación natural, eliminando o reduciendo al máximo los sistemas de ventilación mecánica. Se puede implementar por medio de la propia estructura arquitectónica del edificio: patios, galerías internas etc. y a través de las envolventes arquitectónicas que deben ser traspirables y deben tener la mayor inercia térmica posible con la finalidad de servir de intercambiador de calor natural y evitar pérdidas energéticas. Además, la estructura del edificio debe permitir el paso de la radiación solar a todos los espacios, permitiendo que sean iluminados de forma natural y con la intensidad adecuada.

Se debe evitar el uso de materiales plastificados que impiden la respiración de la vivienda y el mobiliario que pueda cargarse electrostáticamente puesto que ayudan al crecimiento de los ácaros. En cuanto a las instalaciones, se debe optar por una calefacción que evite la circulación de partículas de polvo.

Es importante facilitar la **información** sobre los materiales. Una característica de la era en que vivimos es el acceso a la información, por lo que es necesario que las etiquetas informativas sean sencillas de entender tanto para profesionales como para usuarios y poder realizar la selección correcta, limitando aquellos materiales y objetos que emitan COVs.

4. Cada vez hay más alergias derivadas de la exposición a contaminantes y del tipo de construcción con mayor hermeticidad y más tecnificación; por lo que es necesario **conocer los niveles** de contaminación para poder actuar en consecuencia. Para ello se necesitan dispositivos que lean los datos de manera directa o con toma de muestras. Sin embargo, muchos requieren de personal autorizado y preparado para su empleo, dejando al usuario sin opciones de conocer la calidad de aire interior. Una de las alternativas es a través de dispositivos y sensores IoT que midan los parámetros del aire.
5. La **arquitectura vernácula** responde a las limitaciones ambientales, climáticas, socioculturales y económicas, cumpliendo los criterios de sostenibilidad: uso de materiales locales y saludables, se pueden reintegrar en la naturaleza, el diseño se adapta al clima, transmite la cultura constructiva, favorece la cohesión social, es económica, autosuficiente en recursos naturales y tiene un bajo impacto ambiental.

Las condiciones de comodidad interior que se establecen como aceptables o por normativa son distintas de las que se toleraban antiguamente y cada vez se relacionan diversas áreas con el confort —la tecnología, la sociedad, el ambiente interior y exterior, la salud, la cultura y con el cambio climático— para establecer los estándares de bienestar como característica fundamental para mantener la salud humana.

Por otro lado, las soluciones arquitectónicas se vuelven cada vez más complejas, obteniendo una relación entre el interior y el exterior como una operación de energía. La **arquitectura pasiva** se adapta a las condiciones del entorno priorizando los conceptos de orientación, compacidad, inercia térmica, minimización de las infiltraciones, control de la temperatura, la humedad y la ventilación. Así, esa operación de energía se reduce en cuanto a consumo, en cuanto a la emisión de gases invernadero y propicia la construcción de edificios de energía casi nulo.

6. Los métodos de **ventilación natural** permiten el tratamiento previo del aire para reducir la demanda de climatización y caracterizan la forma de circulación. En la zona de estudio, la estrategia en invierno toma mayor valor para retener el calor y reducir el exceso de humedad a través de los invernaderos, las galerías, suelos acumuladores de grava, el sistema de doble piel, el muro trombe o el pozo canadiense.

La renovación de aire es más efectiva cuando el movimiento del aire se realiza de forma cruzada entre huecos de distintas fachadas y a diferentes alturas. Para la zona de estudio se muestran adecuados el atrio, el patinillo, el conducto vertical, la compartimentación interior, las ventanas, la chimenea solar térmica o la forma de la cubierta, junto con elementos que inducen un cambio de presión o de temperatura.

Gracias a investigaciones se define una cantidad estandarizada que analiza el rendimiento de humedad, de manera que cuanto mayor sea ese valor, mayor su **amortiguación de la humedad** en el ambiente interior. En general, los materiales naturales son propicios para esta función como la arcilla, la cal, el yeso, el cáñamo, la madera, la celulosa y las fibras naturales. Para la zona de estudio podrían servir a esa función revestimientos con paneles de madera de pino, paneles de yeso, tableros de fibra de media densidad modificado con cáscara de nuez, paneles de yeso y cloruro cálcico, revestimientos de varias capas de materiales naturales, la cal, revestimiento de cal combinada con cáñamo o de cáñamo con almidón de trigo.

Para eliminar los contaminantes del aire hay varias tecnologías. Una de ellas se fundamenta en cambiar la estructura química del contaminante a través de procesos fisicoquímicos, siendo la fotocatalisis uno de los procedimientos más investigados y utilizados para tratar el aire. Este método se basa en el principio de **descontaminación** que se lleva a cabo en la propia naturaleza, a través de una reacción fotoquímica basada en la oxidación, transforma un contaminante orgánico e inorgánico tóxico en sustancias nocivas, a través de la energía solar o artificial.

Las nanopartículas de dióxido de titanio en materiales de construcción permiten la autolimpieza, la característica antibacteriana, antivírica, antihongos, desodorizantes y antipolvo tanto en exterior como en interior. Para el objetivo del trabajo se descubre la

posibilidad de uso en interior del mobiliario de cemento, los recubrimientos en materiales a base de madera, los cerámicos, el yeso, las pinturas y el textil tratados fotocatalíticamente.

El estándar Passivhaus pretende un control energético mediante componentes pasivos apoyados en sistemas activos que controlan y dan a conocer la calidad de aire interior, como la **ventilación controlada** de doble flujo que asegura las renovaciones de aire sin ruido y sin contaminación.

Los **sensores** empleados en la instalación aseguran la calidad higiénica interior, ya que con la monitorización se modifica la velocidad de la ventilación según el grado de contaminación interior —referido principalmente a ocupación CO₂ y a humedad—.

El uso de **filtros** es imprescindible para la purificación del aire, siendo regulada la eficacia del filtrado a través de una normativa que tiene en cuenta la clasificación internacional del polvo. Los filtros se adaptan a las condiciones del entorno y a las necesidades de los usuarios, pero requiere de un mantenimiento, limpieza y sustitución para su adecuado funcionamiento.

Además de necesitar filtrar material particulado están los productos tóxicos, bacterias, etc. por lo que se necesitan filtros multifuncionales y con materiales lo más naturales posibles para su posible reciclaje.

7. El carácter pasivo de la vivienda va a depender de la demanda de climatización relacionada directamente con las pérdidas de la envolvente térmica, las pérdidas por ventilación, las ganancias de radiación solar y las ganancias producidas internamente.

Conociendo la relevancia del viento y de la humedad en el área de estudio seleccionada, el uso de una instalación de recuperador de calor con doble flujo permite garantizar el caudal de la ventilación sin contaminación acústica, la recuperación de la energía del aire, asegurar y conocer la calidad del mismo al estar filtrado y monitorizado y poder actuar en consecuencia. Además, el uso de la ventilación natural puede no ser completamente eficaz en la zona seleccionada puesto que se introduce aire generalmente frío y húmedo.

Sin embargo, con un buen análisis y estudio previo del entorno y las necesidades de la vivienda, la ventilación natural puede ser suficiente. El problema de no poder controlarla se resuelve con los métodos pasivos. Así se puede asegurar la renovación y limpieza del aire a menor coste, con un menor mantenimiento y con una mayor relación con el entorno.

La posibilidad del uso de materiales con alta capacidad de amortiguar las variaciones de humedad relativa del interior mejoraría la eficiencia energética del edificio. Los revestimientos con materiales higroscópicos tienen las ventajas de un mayor confort, mayor CAI, menor ventilación y refrigeración en verano, menor riesgo de condensaciones superficiales, menor presencia de poblaciones de ácaros y menos riesgo de degradación estructural de materiales debido a la humedad.

Los materiales purificadores del aire ofrecen las características de la autolimpieza, antibacteriano, antivírico, antihongos, desodorizantes y antipolvo.

Por lo que la complementación de ambos materiales ayudaría a reducir el problema planteado en este trabajo de una manera pasiva y sostenible.

En definitiva, el medio construido tiene un gran impacto sobre el entorno natural, la salud y la productividad. Cada vez se plantean retos nuevos y se actualizan los objetivos en aras de **mejorar el confort y la calidad ambiental interior** de las viviendas.

Habitar implica muchas disciplinas como la salud, la antropología o la economía; por ello se debe hacer una revisión de las necesidades en la arquitectura y las necesidades de los usuarios, tener los criterios sanitarios evaluados por estudios científicos y disponer de las **herramientas** para poder implantar las ideas de sostenibilidad en el proceso de diseño, en la elección de materiales, de los sistemas constructivos y en las instalaciones.

La ciencia y el conocimiento están disponibles para que se pueda diseñar y construir de forma eficiente y sostenible y así poder disminuir los efectos negativos que se generan en el entorno y en los usuarios; pero más importante y factible es el **cambio de comportamiento y actitud** de los seres humanos. Con esta mentalidad, el objetivo debiera ser siempre apostar por el bienestar de las personas, tanto a corto como a largo plazo y poder solucionar los problemas de la arquitectura actual de una manera más sostenible.

14. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El tema tratado en este trabajo es de actualidad y de gran importancia para la salud del ser humano y del medioambiente, por lo que se hace necesaria la continuación de investigaciones sobre este asunto.

Además de continuar con la línea iniciada, los estudios se pueden llevar a cabo desde distintos puntos de vista como los siguientes:

- Analizar otras medidas pasivas para la regulación de la humedad en el interior de la vivienda, como la vegetación.
- Continuar con el estudio de la limpieza del aire de ambiente interior a través de la tecnología verde: la vegetación como depuradora del aire y el uso de métodos biológicos⁴⁹.
- Relacionar el confort interior con otras enfermedades cardíacas o dermatológicas en las que influye la humedad, la calidad de aire y la temperatura.
- Profundizar en los efectos de otros alérgenos a parte de los ácaros, ya que hay alergias originadas por agentes como el polen, determinados COVs, el material particulado, etc.
- Realizar ensayos con sensores más precisos, controlando las condiciones ambientales y con herramientas informáticas que analicen el movimiento del aire y el transporte de los contaminantes en el espacio interior.
- Realizar una comparativa entre estrategias y estándares en cuanto a aspectos de calidad ambiental interior y salud.

⁴⁹ Los métodos biológicos se basan en la capacidad de los microorganismos en usar los contaminantes como fuentes de carbón y/o energía, biodegradándose en un lecho sólido —biofiltro— o a través de una disolución acuosa —biotrickling—. (Rojo et al. 2012)

15. BIBLIOGRAFÍA

ACHENZA, M., et al. 2014. *VERSUS: Heritage for tomorrow* [en línea]. Firenze: Firenze University Press. [consulta: 14 junio 2019]. ISBN 978-88-6655-742-5. Disponible en: www.esg.pt/versus

AEMA, 2018. *Air quality in Europe* [informe en línea]. Copenhagen: European Environment Agency. [consulta: 19 junio 2019]. DOI: 10.2800/777411. Disponible en: <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/223e663b-1340-11e9-81b4-01aa75ed71a1/language-en>

AEMA, 2013. *Cada vez que respiramos. Mejorar la calidad del aire en Europa* [en línea]. Copenhagen: Agencia Europea de Medio Ambiente. [consulta: 18 junio 2019]. DOI: 10.2800/83001. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/es/publications/senales-2013-cada-vez-que-respiramos>

AL HERR, Y. et al., 2016. Impact of indoor environmental quality on occupant well-being and comfort: a review of the literature. *International Journal of Sustainable Built Environment* [en línea], vol. 5, no. 1, pp. 1-11. [consulta: 12 marzo 2019]. ISSN: 22126090. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2016.03.006>

ALONSO MONTERDE, M., 2014. *Guía de estrategias de diseño pasivo para la edificación*. 1ª ed. Valencia: Instituto valenciano de la edificación. ISBN 978-84-96602-78-6.

ÁLVAREZ DÍAZ, J.A., 2017. *Modelo adaptativo para la gestión ambiental y energética de inmuebles de uso residencial y terciario* [tesis doctoral en línea]. Juan Ramón RABUÑAL DOPICO, director. Dolores GARCÍA VIDAURRÁZAGA, directa. Universidade da Coruña, Facultad de informática [consulta: 25 marzo 2019] Disponible en el RUC: <http://hdl.handle.net/2183/19285>

ALVAREZ HERNÁNDEZ, R. 2018. *Estudio del clima en zona de costa: controlar la humedad y reducir problemas respiratorios* [trabajo de asignatura inédito]. Universidade da Coruña, Escola Universitaria de Arquitectura Técnica.

ALVAREZ HERNÁNDEZ, R. 2019. *Comparación de certificaciones de sostenibilidad* [trabajo de asignatura inédito]. Universidade da Coruña, Escola Universitaria de Arquitectura Técnica.

ALVAREZ HERNÁNDEZ, R. 2019. *Tecnologías en edificios inteligentes para comprobar la calidad de aire interior* [trabajo de asignatura inédito]. Universidade da Coruña, Escola Universitaria de Arquitectura Técnica.

APTE, M., FISK, W. y DAISEY, J., 2002. Associations between indoor CO₂ concentrations and Sick Building Syndrome symptoms in U.S. Office Buildings: An analysis of the 1994–1996 BASE study data. *International journal of indoor environment and health* [en línea]. Vol. 10, no.4, pp. 246-257. [consulta: 13 abril 2019]. ISSN: 0905-6947. Disponible en: <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2000.010004246.x>

ARNEDO PENA, A. et al., 2012. Prevalence of asthma symptoms in schoolchildren, and climate in west European countries: an ecologic study. *International Journal of Biometeorology* [en línea]. Vol. 57, no. 5, pp. 775-784. [consulta: 2019]. ISSN 00207128. Disponible en:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s00484-012-0606-y>

ASOCIACIÓN IBÉRICA DE LA FOTOCATÁLISIS, [sin fecha]. *¿Qué es la fotocatalisis?* [sitio web]. [consulta: 30 julio 2019]. Disponible en: <http://www.fotocatalisis.org/>

BARRAGÁN FOUNDATION, 2002. *Guide Barragán*. México: Barragán foundation. ISBN: 968-5208-18-2.

BENAMMAR, M. et al., 2018. A modular IoT platform for real-time indoor air quality monitoring. *Sensors* [en línea]. Vol. 18, no. 2, pp. 1-18. [consulta: 12 marzo 2019]. DOI: 10.3390/s18020581. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/323181052_A_Modular_IoT_Platform_for_Real-Time_Indoor_Air_Quality_Monitoring

BLANCHET, P. y LANDRY, V., 2015. Nanocomposite coatings and plasma treatments for wood-based products. *Wood composites* [en línea]. Ed: Martin P. Ansell, pp. 335-355. [consulta: 7 agosto 2019]. ISBN 978-1-78242-454-3.

Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781782424543000135>

BREEAM ES, [sin fecha]. *Esquemas de certificación* [web]. [consulta: 2 enero 2019]. Disponible en: <http://www.breeam.es/>

BUCHDAHL, R. et al., 2000. Associations between ambient ozone, hydrocarbons, and childhood wheezy episodes: a prospective observational study in south east London. *Occupational and environmental medicine* [en línea]. Vol. 57, no. 2, pp. 86-93. [consulta: 27 junio 2019]. DOI: 10.1136/oem.57.2.86.

Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1739904/>

CAAMAÑO SUÁREZ, M., 2006. *As construcións da arquitectura popular*. A Coruña: Hércules de ediciones. ISBN 84-96314-34-0.

CAMOUS, R., 1986. *El hábitat bioclimático: de la concepción a la construcción*. Barcelona: Gustavo Gili. ISBN 968-887-022-6.

CAMPBELL, D., 2015. *Asthma could be worsened by energy-efficient homes, warns study* [boletín de noticias en línea]. [consulta: 15 diciembre 2018].

Disponible en: <https://www.theguardian.com/society/2015/sep/20/energy-efficient-homes-could-worsen-asthma>

CASSAR, L., 2004. Photocatalysis of cementitious materials: clean buildings and clean air. *MRS Bulletin* [en línea]. Vol. 29, no. 5, pp. 328-331. [consulta: 7 agosto 2019]. DOI: 10.1557/mrs2004.99. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-2542467754&doi=10.1557%2Fmrs2004.99&partnerID=40&md5=3a7bd4aa188224c56dd79f38adb37606>

CHANG, C.-Yu. y CHANG, F.-C., 2016. Development of electrospun lignin-based fibrous materials for filtration applications. *Bioresources* [en línea]. Vol. 11, no. 1, pp. 2202-2213. [consulta: 14 agosto 2019]. Disponible en:

<https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/development-of-electrospun-lignin-based-fibrous-materials-for-filtration-applications/>

CHAPPELLE, H. y SHOVE, E., 2004. *Comfort: a review of philosophies and paradigms*. [consulta:

22 noviembre 2018].

Disponible en: https://www.lancaster.ac.uk/fass/projects/futcom/fc_litfinal1.pdf

CHARISI, S. et al., 2016. Latent heat sorption phenomena in three building materials: Norwegian spruce (*picea abies*), gypsum board and concrete. *Proceedings of World Conference on Timber Engineering*. Vienna: Vienna University of Technology. [consulta: 31 julio 2019].

Disponible en:

https://www.researchgate.net/profile/Dimitrios_Kraniotis/publication/307558728_Latent_heat_sorption_phenomena_in_three_building_materials_Norway_spruce_picea_abies_gypsum_board_and_concrete/links/57c84e6108aefc4af34ec43c.pdf

CHAVARRÍA, J.F., 2001. Asthma admissions and weather conditions in Costa Rica. *Archives of disease in childhood* [en línea]. Vol. 84, no. 6, pp. 514-515. [consulta: 12 junio 2019]. DOI: 10.1136/adc.84.6.514.

Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1718794/>

CHEN, X. et al., 2014. Indoor air quality monitoring system for smart buildings. *Proceedings of the 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*. Seattle, 13-17 septiembre. pp. 471-475. [consulta: 20 febrero 2019]. DOI: 10.1145/2632048.2632103.

Disponible en: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2632048.2632103>

COCH, H., 1998. Bioclimatism in vernacular architecture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea]. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. Vol. 2, no. 1-2, pp. 67-87. [consulta: 12 julio 2019] ISSN: 1364-0321.

Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/19084>

COLABORADORES DE WIKIARQUITECTURA, [sin fecha]. *Casa González Luna*. En: Wikiarquitectura [en línea]. [consulta: 8 julio 2019].

Disponible en: <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/Casa-Gonzalez-Luna/>

COUTINHO MESQUITA, C.A., 2012. *Revestimientos continuos interiores de varias capas con características de barrera de vapor e higroscopicidad* [tesis doctoral en línea]. Alfonso GARCÍA SANTOS, director. Francisco Javier NEILA CONZÁLEZ, director. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Arquitectura. [consulta: 15 junio 2019]. Disponible en: <http://oa.upm.es/14898/>

DA SILVA, C. et al., 2017. Improvement of indoor air quality by MDF panels containing walnut shells. *Building and Environment* [en línea]. Vol. 123, pp. 427-436. [consulta: 7 agosto 2019]. ISSN: 0360-1323. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.015>

DE GIULI, V., DA POS, O. y DE CARLI, M., 2012. Indoor environmental quality and pupil perception in Italian primary schools. *Building and Environment* [en línea]. Vol. 56, pp. 335-345. [consulta: 13 abril 2019]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.03.024>

DE LLANO, P., 2006. *Arquitectura popular en Galicia. Razón y construcción*. Ed: Xerais de Galicia. ISBN 84-9782-463-6.

DU PLESSIS, R. et al., 2016. A wireless system for indoor air quality monitoring. *Proceedings of the 42nd Industrial Electronics Conference*, pp. 5409-5414. [consulta: 12 marzo 2019]. DOI: 10.1109/IECON.2016.7794087. Disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/312114545_A_wireless_system_for_indoor_air_qu

ality_monitoring

ESQUIAGOLA, J. et al., 2018. SPIRI: Low power IoT solution for monitoring indoor air quality. *Proceedings of the 3rd International Conference on Internet of Things, Big Data and Security*. Ed: SciTePress, pp. 285-290. [consulta: 12 marzo 2019]. DOI: 10.5220/0006783002850290. Disponible en:

<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85051931334&partnerID=40&md5=503c4f1f5004a70fa4b31f2d71e940be>

EUROPEAN COMMISSION, 2003. *Indoor air pollution: new EU research reveals higher risks than previously thought* [boletín noticias en línea] [consulta: 18 junio 2019] Disponible en: http://europa.eu/rapid/press-release_IP-03-1278_en.htm

EUROVENT ASSOCIATION, 2017. *Air filters for general ventilation* [web] [consulta: 3 agosto 2019]. Disponible en: <https://eurovent.eu/?q=content/eurovent-air-filters-guidebook-first-edition>

FENG, C.H., MILLER, M.D. y SIMON, R.A., 2012. The united allergic airway: Connections between allergic rhinitis, asthma, and chronic sinusitis. *American Journal of Rhinology & Allergy* [en línea]. Vol. 26, no. 3, pp. 187-190. [consulta: 30 julio 2019]. DOI: 10.2500/ajra.2012.26.3762. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3906509/>

FERRER SANCHO, J., RODRÍGUEZ GONZÁLEZ, E. y CRUZ CARMONA, M., 2019. Otras enfermedades ocupacionales o laborales. En: manual SEPAR, Sección X. Enfermedades respiratorias ocupacionales y laborales. *52º congreso SEPAR*. Santiago de Compostela, 13-16 de junio de 2019. ISBN: 9788409016211.

FIGUEROA, A. y CASTORENA, G., 2006. Bioclimatic lessons from Luis Barragan's Architecture. *The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture*. September, pp. 6-8. Disponible en: http://web5.arch.cuhk.edu.hk/server1/staff1/edward/www/plea2018/plea/2006/Vol1/PLEA2006_PAPER115.pdf.

FRAMPTON, K. Y DIEZ, R.F, 2005. *Jose Antonio Coderch. Casas*. Madrid: 2G. pp. 4-49. ISBN: 84-252-1961-2.

GAFFIN, J. et al., 2018. Nitrogen dioxide exposure in school classrooms of inner-city children with asthma. *The Journal of allergy and clinical immunology* [en línea]. Vol. 141, no. 6, pp. 2249-2255. [consulta: 25 junio 2019]. DOI: 10.1016/j.jaci.2017.08.028. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28988796>

GALINDO LLORACH, R., 2008. *Vidriados cerámicos fotoactivos* [tesis doctoral en línea]. Guillermo MONRÓS TOMÁS, director. Universitat Jaume I, Departamento de Química Inorgánica y Orgánica. [consulta: 7 agosto 2019]. Disponible en: <http://www.tdx.cat/handle/10803/384546>

GARCÍA LASANTA, M.D., 2004. *Arquitectura bioclimática* [en línea]. A Coruña [consulta: 3 agosto 2019] Disponible en: <https://www.asociacion-touda.org>

GARCÍA MARCOS, L. et al., 2009. Influence of two different geo-climatic zones on the prevalence and time trends of asthma symptoms among Spanish adolescents and

schoolchildren. *International Journal of Biometeorology* [en línea]. Vol. 53, no. 1, pp. 53-60. [consulta: 12 junio 2019]. DOI: 10.1007/s00484-008-0190-3.

Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00484-008-0190-3>

GBCE, [sin fecha]. *Certificación verde* [web]. [consulta: 2 enero 2019]. Disponible en: <https://gbce.es/certificacion-verde/>

GONZÁLEZ BARCALA, F. et al., 2019. Efectos de la contaminación atmosférica y ambiental en el aparato respiratorio. En: manual SEPAR, Sección XVI. Situaciones especiales y otras alteraciones del aparato respiratorio. *52º congreso SEPAR*. Santiago de Compostela, 13-16 de junio de 2019. ISBN: 9788409016211.

GUARDINO, X., 1998. Calidad del Aire Interior. En: *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo* [en línea]. pp. 44.1-44.6. [consulta: 12 marzo 2019]. ISSN 1020-4989. Disponible en: <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo2/44.pdf>

HÁBACO e IGVS, 2017. *Guía de arquitectura pasiva para viviendas en Galicia* [en línea]. Santiago de Compostela: Xunta de Galicia. Consellería de Infraestructuras e vivenda. Instituto Galego da Vivenda e Solo. [consulta: 6 julio 2019] Disponible en: http://www.igvs.es/ipecos-opencms-portlet/export/sites/default/PortalVivenda/Biblioteca/Lexislacion/Eficiencia_enerxetica/20151210_GUIA_DE_VIVIENDAS_PASIVAS_EN_GALICIA.pdf

HAMEURY, S., 2007. Influence of coating system on the moisture buffering capacity of panels of *Pinus sylvestris* L. *Wood material science and engineering* [en línea]. Vol. 2, no. 3-4, pp. 97-105. [consulta: 31 julio 2019]. DOI: 10.1080/17480270801906167. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-49549099538&doi=10.1080%2F17480270801906167&partnerID=40&md5=5fdcae6767bf0cd713acd63ff5ae2c52>

HARB, P., LOCOGE, N. y THEVENET, F., 2018. Emissions and treatment of VOCs emitted from wood-based construction materials: Impact on indoor air quality. *Chemical engineering journal* [en línea]. Vol. 354, pp. 641-652. [consulta: 7 agosto 2019]. ISSN: 1385-8947 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894718315596?via%3Dihub>

HEYWOOD, H., 2012. *101 reglas básicas para una arquitectura de bajo consumo energético*. Barcelona: Gustavo Gili. ISBN 978-84-252-2845-2.

HIGUERO, T. et al., 2016. *Guía de Calidad del aire interior* [en línea]. Madrid: Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. pp. 1-186. [consulta: 12 marzo 2019]. Disponible en: <https://www.fenercom.com/pages/publicaciones/publicacion.php?id=231>

INE, 2018a. *Defunciones según las causas de muerte por grupos de enfermedades* [boletín de noticias en línea]. [consulta: 18 junio 2019].

Disponible en: https://www.ine.es/prensa/edcm_2017.pdf

INE, 2018b. Población urbana expuesta a contaminación del aire. *Indicadores de calidad de vida* [en línea]. [consulta: 18 junio 2019]. Disponible en:

http://www.ine.es/ss/Satellite?L=es_ES&c=INESeccion_C&cid=1259944616263&p=1254735110672&pagename=ProductosYServicios%2FPYSLayout¶m1=PYSDetalleFichaIndicador&par

am3=1259937499084

INSST, 2013. NTP 972. *Calidad del aire interior: compuestos orgánicos volátiles, olores y confort* [en línea]. Disponible en:

<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/NTP/NTP/Ficheros/961a972/972w.pdf>

IWBI, 2018. *The WELL building standard* [web]. [consulta:2 enero 2019]. Disponible en: <https://www.wellcertified.com/>

JEDRYCHOWSKI, W. et al., 2014. Separate and joint effects of transplacental and postnatal inhalatory exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons: prospective birth cohort study on wheezing events. *Pediatric pulmonology* [en línea]. Vol. 49, no. 2, pp. 162-72. [consulta: 27 junio 2019]. DOI: 10.1002/ppul.22923.

Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4021044/>

JIANG, X., MEI, X. y FENG, D., 2016. Air pollution and chronic airway diseases: what should people know and do?. *Journal of thoracic disease* [en línea]. Vol. 8, no. 1, pp. 31-40. [consulta: 25 junio 2019]. DOI: 10.3978/j.issn.2072-1439.2015.11.50.

Disponible en: <http://jtd.amegroups.com/article/view/5951/6192>

LAPLAZA GUERRA, A., 2011. TX Active: fotocatalisis contra la contaminación. *Jornada nacional de construcción sostenible y soluciones ecoeficientes*. Sevilla. Vol. 958, pp. 12-22. [consulta: 7 agosto 2019]. ISBN: 9788493897505. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11441/34725>

LAPLAZA GUERRA, A. y HERNANDO CASTRO, S., 2013. La fotocatalisis en los materiales de construcción base cemento. fundamentos, métodos de medida y ejemplos de aplicación. *Cemento Hormigón* [en línea]. Vol. 958, pp. 12-22. [consulta: 7 agosto 2019]. ISSN: 0008-8919. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4482664>

LEED, 2009. *LEED para nueva construcción* [web]. [consulta: 2 enero 2019]. Disponible en: <https://www.usgbc.org/resources/grid/leed>

LI, N. et al., 2016. A work group report on ultrafine particles (American Academy of Allergy, Asthma & Immunology): why ambient ultrafine and engineered nanoparticles should receive special attention for possible adverse health outcomes in human subjects. *The Journal of allergy and clinical immunology* [en línea]. Vol. 138, no. 2, pp. 386-96. [consulta: 25 junio 2019]. DOI: 10.1016/j.jaci.2016.02.023. Disponible en:

[https://www.jacionline.org/article/S0091-6749\(16\)30011-2/fulltext](https://www.jacionline.org/article/S0091-6749(16)30011-2/fulltext)

LISBONA GARCÍA, L.E., 2016. *Materiales fotocatalíticos y sus aplicaciones en construcción* [trabajo final de máster en línea]. Laia HAURIE, directora. Universitat Politècnica de Catalunya, Escuela Politécnica Superior de edificación de Barcelona. [consulta: 7 agosto 2019]. Disponible en:

https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/84141/Memòria_LisbonaLuciaEspiga.pdf

LIU, C. et al., 2019. Ambient particulate air pollution and daily mortality in 652 Cities. *The New England Journal of Medicine* [en línea]. no. 381, pp. 705-715. [consulta: 28 agosto 2019]. DOI: 10.1056/NEJMoa1817364.

Disponible en: <https://www.nejm.org/doi/full/10.1056/NEJMoa1817364>

LIU, S. et al., 2016. The effect of pollutional haze on pulmonary function. *Journal of thoracic disease* [en línea]. Vol. 8, no. 1, pp. 41-56. [consulta: 25 junio 2019]. DOI: 10.3978/j.issn.2072-1439.2016.01.18. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26904252>

LIU, X. et al., 2017. Soy protein isolate/bacterial cellulose composite membranes for high efficiency particulate air filtration. *Composites Science and Technology* [en línea]. Vol. 138, pp. 124-133. [consulta: 14 agosto 2019]. DOI: 10.1016/j.compscitech.2016.11.022. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266353816305796>

LÓPEZ-SILVARREY VARELA, Á. et al., 2007. Prevalencia de síntomas de asma y rinitis en la población de A Coruña. *Anales de pediatría* [en línea]. Barcelona. Vol. 66, no. 2, pp. 146-53. [consulta: 12 junio 2019]. ISSN: 1695-4033.

Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17306101>

LÓPEZ-SILVARREY VARELA, Á. et al., 2011. Prevalencia de síntomas de asma en los niños y adolescentes de la comunidad autónoma de Galicia (España) y sus variaciones geográficas. *Archivos de Bronconeumología* [en línea]. Vol. 47, no. 6, pp. 274-282. [consulta: 15 diciembre 2018]. Disponible en RUC: <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/14894>

LÓPEZ VISO, C., 2012. *Luis Barragán. En su casa de Tacubaya. Naturalezas del límite*. A Coruña: Edicións-espontáneas. ISBN 978-84-934504-2-6.

MAALOUF, C. et al., 2015. Study of the hygric behaviour and moisture buffering performance of a hemp-starch composite panel for buildings. *Bioresources* [en línea]. Vol. 10, no. 1, pp. 336-347. [consulta: 31 julio 2019]. Disponible en:

<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84923643300&partnerID=40&md5=e71b4c5816f5a0edabc65e855aa73a8e>

MARCO, A., 2014. *AIDIMA estudia materiales que regulan la humedad para un hábitat sostenible* [nota informativa en línea]. Valencia. [consulta: 3 agosto 2019]. Disponible en: http://www.aidima.es/aidimainforma/articulos_pdf/id_materiales_reguladores_humedad.pdf

MASKELL, D. et al, 2018. Determination of optimal plaster thickness for moisture buffering of indoor air. *Building and Environment* [en línea]. Vol. 130, pp. 143-150. [consulta: 31 julio 2019]. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.07.019. Disponible en:

<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84907323649&doi=10.1016%2Fj.buildenv.2014.07.019&partnerID=40&md5=f13bd6f5a182145a46bd7bf8703f74d6>

MAZHOUD, B. et al., 2016. Hygric and thermal properties of hemp-lime plasters. *Building and Environment* [en línea]. Vol. 96, pp. 206-216. [consulta: 31 julio 2019]. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.11.013. Disponible en:

<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84949257418&doi=10.1016%2Fj.buildenv.2015.11.013&partnerID=40&md5=9f5470560e5e77ed8ee415bc8c1500ee>

MEGIDO FERNÁNDEZ, L., 2018. *Material particulado en el aire ambiente de la zona este de Gijón: niveles, composición y contribución de fuentes* [tesis doctoral en línea]. Luis NEGRAL ÁLVAREZ, director. Leonor CASTRILLÓN PELÁEZ, directora. Universidad de Oviedo, Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente. [consulta: 13 agosto

2019]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10651/46388>

MELERO, S., GARCÍA, S. y NEILA, F.J., 2015. Design and evaluation of a dehumidifying plaster panel for passive architecture integration. *Journal of construction* [en línea]. Vol. 14, no. 2, pp. 21-28. [consulta: 31 julio 2019]. ISBN: 0717-7925. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5188876&orden=0&info=link>

MOLHAVE, L. et al., 1997. Total Volatile Organic Compounds (TVOC) in indoor air quality investigations. *International journal of indoor environment and health* [en línea]. Vol. 7, pp. 225-240. [consulta: 28 agosto 2019]. Disponible en: <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/articles-journals/european-collaborative-action-indoor-air-quality-and-its-impact-man-report-no-19-total-volatile>

MORAWSKA, L. et al., 2017. Airborne particles in indoor environment of homes, schools, offices and aged care facilities: the main routes of exposure. *Environment International* [en línea]. Vol. 108, pp. 75-83. [consulta: 25 junio 2019]. DOI 10.1016/j.envint.2017.07.025. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28802170>

MOUJALLED, B. et al., 2018. Experimental and numerical evaluation of the hygrothermal performance of a hemp lime concrete building: a long term case study. *Building and Environment* [en línea]. Vol. 136, pp. 11-27 [consulta: 31 julio 2019]. DOI 10.1016/j.buildenv.2018.03.025. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85044136670&doi=10.1016%2fj.buildenv.2018.03.025&partnerID=40&md5=9795ef45604baca63acea801bab6599a>

NEILA GONZÁLEZ, F.J., 2004. *Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible*. Madrid: Munilla-Lería. ISBN 84-89150-64-8.

OMS, 2007. *Children's health and the environment in Europe*. [en línea] Copenhagen: World Health Organization, regional office for Europe [consulta 27 junio 2019]. ISBN: 978 92 890 7297 7. Disponible en: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0009/96750/E90767.pdf

OMS, 2009. *Guidelines for indoor air quality: dampness and mould* [en línea]. Copenhagen: World Health Organization, regional office for Europe [consulta 27 junio 2019]. ISBN: 978 92 890 4168 3. Disponible en: <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/2009/who-guidelines-for-indoor-air-quality-dampness-and-mould>

OMS, 2010. *Guidelines for indoor air quality: selected pollutants*. [en línea] Copenhagen: World Health Organization, regional office for Europe [consulta 27 junio 2019]. ISBN: 978 92 890 0213 4. Disponible en: <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/policy/who-guidelines-for-indoor-air-quality/chemical-indoor-air-pollutants-selected-pollutants-2010>

OMS, 2013. *Review of evidence on health aspects of air pollution - REVIHAAP project*. [en línea]. Copenhagen: World Health Organization. Regional office for Europe [consulta 25 junio 2019]. Disponible en: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0004/193108/REVIHAAP-Final-technical-

report-final-version.pdf?ua=1

OMS, 2018a. *Calidad del aire y salud* [nota informativa en línea]. [consulta: 18 junio 2019]. Disponible en: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).

OMS, 2018b. *Las 10 principales causas de defunción* [nota informativa en línea]. [consulta: 18 junio 2019]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death>

OMS, [sin fecha]. Constitución de la OMS. [web]. [consulta: 17 junio 2019]. Disponible en: <https://www.who.int/es/about/who-we-are/constitution>.

PASSIVHAUS INSTITUT, [sin fecha]. Pasipedia [web]. [consulta: 26 agosto 2019]. Disponible en: <https://passipedia.org/start>

PEP, [sin fecha]. Plataforma Edificación Passivhaus. [web]. [consulta: 17 junio 2019]. Disponible en: <http://plataforma-pep.org/>

PLESS, S. y TORCELLINI, P., 2010. Net-Zero energy buildings: a classification system based on renewable energy supply options. *National Renewable Energy Laboratory* [en línea]. DOI: 10.2172/983417. [consulta: 3 julio 2019]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/238058900_Net-Zero_Energy_Buildings_A_Classification_System_Based_on_Renewable_Energy_Supply_Options

RECIO, A. et al., 2016. The short-term association of road traffic noise with cardiovascular, respiratory, and diabetes-related mortality. *Environmental research* [en línea]. Vol. 150, pp. 383-390. [consulta: 27 junio 2019] DOI 10.1016/j.envres.2016.06.014. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935116302493?via%3Dihub>

RODE, C., 2005. *Moisture buffering of building materials* [en línea]. Denmark: Technical University of Denmark. [consulta: 31 julio 2019]. ISBN: 87-7877-195-1. Disponible en: https://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:75984/datastreams/file_2415500/content

RODE, C. et al., 2006. Moisture buffer value of buildings materials. *ASTM symposium on Heat-Air-Moisture transport: measurements on building materials*. Toronto, 23 abril. [consulta: 31 julio 2019]. Disponible en: [https://portal.research.lu.se/portal/en/publications/moisture-buffer-value-of-building-materials\(c6396653-1402-4f89-8968-4bd159e4dcb0\).html](https://portal.research.lu.se/portal/en/publications/moisture-buffer-value-of-building-materials(c6396653-1402-4f89-8968-4bd159e4dcb0).html)

RODRÍGUEZ TREJO, S., 2016. *Caracterización de la ventilación en la edificación residencial existente. Conciliación entre calidad del aire interior y eficiencia en la rehabilitación energética* [tesis doctoral en línea]. Sergio VEGA SÁNCHEZ, director. Consuelo ACHA ROMÁN, directora. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Arquitectura. [consulta: 12 junio 2019] Diponible en: <http://oa.upm.es/39965/>

ROJO, N. et al., 2012. Aproximación a la problemática del aire interior. *XVI Congreso internacional de ingeniería de proyectos*. Valencia, 11-12 de julio de 2012, pp. 1162-1174. Disponible en: https://www.aepro.com/files/congresos/2012valencia/CIIP12_1162_1174.3791.pdf

SAMOLI, E. et al., 2011. Acute effects of air pollution on pediatric asthma exacerbation:

evidence of association and effect modification. *Environmental research* [en línea]. Vol. 111, no. 3, pp. 418-24. [consulta: 27 junio 2019]. DOI 10.1016/j.envres.2011.01.014. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935111000296?via%3Dihub>

SÁNCHEZ MUÑOZ, M., 2013. *Caracterización y tratamiento fotocatalítico de hongos y bacterias de aire interior* [tesis doctoral en línea]. Benigno SÁNCHEZ CABRERO, director. Universidad Autónoma de Madrid, Facultad de Ciencias. [consulta: 3 julio 2019]. Disponible en: <https://repositorio.uam.es/handle/10486/663406>

SCHNEIDER, A., 2012. *Wenn Träume Wirklichkeit werden. Alternativ-Lebenskonzepte zweier Mühlen im Rosental: ein Gesamtkunstwerk* [tesis doctoral en línea]. Universität Wien. [consulta: 26 julio 2019]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/11601071.pdf>

SEAIC, 2017. *Alergia a ácaros* [nota de prensa en línea]. Madrid: Sociedad española de alergología e inmunología clínica. [consulta: 12 julio 2019]. Disponible en: <https://www.seaic.org/inicio/noticias-general/alergia-a-acaros.html>

SEKI ET AL., 2007. Review of sick house syndrome. *Nippon Eiseigaku Zasshi* [en línea]. Vol. 62, no. 4, pp. 939-948 [consulta: 12 marzo 2019]. DOI: 62(4):939-48. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/5877603_Review_of_%27Sick_House_Syndrome%27

SERRA, R., 1999. *Arquitectura y climas*. Barcelona: Gustavo Gili. ISBN: 84-252-1767-9.

SILVESTRE, E., 2014. *Vivir sin tóxicos*. Ed: RBA. ISBN: 9788415541912.

SOUZANDEH, H. et al., 2019. Towards sustainable and multifunctional air-filters: a review on biopolymer-based filtration materials. *Polymer Reviews* [en línea]. DOI 10.1080/15583724.2019.1599391. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/332590854_Towards_Sustainable_and_Multifunctional_Air-Filters_A_Review_on_Biopolymer-Based_Filtration_Materials

SPAINGBC, 2013. *LEED v.4* [web]. [consulta: 2 enero 2019]. Disponible en: <http://www.spaingbc.org/web/index.php>

STAFFORD, T.M., 2015. Indoor air quality and academic performance. *Journal of environmental economics and management* [en línea]. vol. 70, pp. 34-50. [consulta: 13 abril 2019] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2014.11.002>

STRICKLAND, M. et al., 2010. Short-term associations between ambient air pollutants and pediatric asthma emergency department visits. *American journal of respiratory and critical care medicine* [en línea]. Vol. 182, no. 3, pp. 307-16. [consulta: 27 junio 2019]. DOI 10.1164/rccm.200908-1201OC. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2921597/>

TAYLOR, J.S., 1984. *Arquitectura anónima. Una visión cultural de los principios prácticos del diseño*. Barcelona: Stylos. ISBN: 84-7616-001-1.

THE UK PASSIVE HOUSE ORGANISATION, [2014]. *Passivhaus Trust* [web]. [Consulta: 9 agosto 2019]. Disponible en: <http://passivhausbuildings.org.uk/passivhaus.php>

URRUTIA LANDA, I. et al., 2019. Asma ocupacional o laboral. En: manual SEPAR, Sección X. Enfermedades respiratorias ocupacionales y laborales. *52º congreso SEPAR*. Santiago de

Compostela, 13-16 de junio de 2019. ISBN: 9788409016211.

VARGAS MARCOS, F., GALLEGO PULGARÍN, I., 2005. Calidad ambiental interior: bienestar, confort y salud. *Revista Española de Salud Pública* [en línea]. Madrid: Ministerio de sanidad, consumo y bienestar social. Vol. 79, no. 2, pp. 243-251. [consulta: 22 noviembre 2018]. ISSN: 1135-5727. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1153914>

VELASCO ROLDÁN, L., 2011. *El movimiento del aire condicionante de diseño arquitectónico* [en línea]. Madrid: Ministerio de fomento. [consulta: 20 julio 2019]. Disponible en: <https://publicacionesoficiales.boe.es/detail.php?id=010116111-0001>

VERDIER, T., 2016. *Élaboration de revêtements pour matériaux de construction visant à lutter contre la prolifération microbienne à l'intérieur des bâtiments : efficacité et mode d'action* [tesis doctoral en línea]. Alexandra BERTRON, directora. Université Toulouse III. [consulta : 1 julio 2019]. Disponible en: www.theses.fr/2015TOU30191/document

VOGEL, P., MORELO DAL BOSCO, S. y JUAREZ FERLA, N., 2015. Mites and the implications on human health. *Nutrición Hospitalaria* [en línea]. Vol. 31, no. 2, pp. 944-951. [consulta: 15 julio 2019]. ISSN: 1699-5198. Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25617585>

WADEL GERARDO, 2015. *Comparación de certificación de calidad ambiental y estándares energéticos de la edificación*. En: Ecohabitar [web]. [consulta: 1 enero 2019]. Disponible en: <http://www.ecohabitar.org/comparacion-de-sistemas-de-certificacion-de-la-calidad-ambiental-y-estandares-energeticos-de-la-edificacion/>

WASSOUF, M., 2017. *De la casa pasiva al estándar Passivhaus*. 1ª. Barcelona: Gustavo Gili. ISBN: 978-84-252-2452-2.

XUNTA DE GALICIA, 2010. *Plan de ordenación do litoral* [en línea]. [consulta: 3 julio 2019]. Disponible en: <http://www.xunta.es/litoral/web/index.php/descargables>

XUNTA DE GALICIA, 2018. *Radón. Guía de recomendacións de mitigación en vivendas existentes* [en línea]. [consulta: 30 marzo 2019]. Disponible en: http://igvs.xunta.gal/ipecos-opencmsportlet/export/sites/default/PortalVivenda/Biblioteca/Lexislacion/Calidade/RADON_GUIA_V1_gal_20190308.pdf

YU, Q. y BROUWERS, H.J.H., 2013. Design of a novel photocatalytic gypsum plaster: with the indoor air purification property. *Advanced Materials Research* [en línea]. Vol. 651, pp. 751-756. [consulta: 2 julio 2019]. DOI 10.4028/www.scientific.net/amr.651.751. Disponible en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.464.6963&rep=rep1&type=pdf>

ZHENG, W., et al. 2015. Association between air pollutants and asthma emergency room visits and hospital admissions in time series studies: a systematic review and meta-analysis. *PloS one* [en línea]. Vol. 10, no. 9. DOI 10.1371/journal.pone.0138146.

Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4575194/>

ANEXO I

Para elaborar la tabla de datos de valores límite admisibles para la salud, se han utilizado las siguientes guías de contaminantes en el aire:

- Información del Organismo Mundial de la Salud referido a:

- La nota descriptiva sobre la Calidad de aire ambiente exterior y salud (2018)
- El informe *Selected Pollutants* (2009) de la publicación *Guidelines for indoor air quality*, referido a calidad de aire interior.
- *Air quality guidelines* (datos del 2000 y 2006) mostradas en el informe *Air quality in Europe* (2018) de la Agencia Europea de Medio Ambiente.

- El Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad de aire, cuyo Anexo I indica los umbrales de los contaminantes.

- El informe *Air quality in Europe* (2018) de la Agencia Europea de Medio Ambiente, referido a los estándares de calidad de aire para la protección de la salud (datos del 2004 y 2008).

Se establecen en orden cronológico para realizar una valoración comparativa y señalar, al final, el valor más restrictivo.

	CONCENTRACIÓN PROMEDIO			CONCENTRACIÓN PROMEDIO			CONCENTRACIÓN PROMEDIO				CONCENTRACIÓN PROMEDIO				UD
	valor límite horario (1h)	valor límite diario (24h)	valor límite anual (año civil)	valor límite horario (1h)	valor límite diario (24h)	valor límite anual (año civil)	valor límite horario (1h)	valor límite diario (24h)	valor límite anual (año civil)	umbral de alerta (3h consecutivas)	valor límite horario (1h)	valor límite diario (24h)	valor límite anual (año civil)	umbral de alerta (3h consecutivas)	
MATERIAL PARTICULADO PM 2.5		25	10						25			25	10		µg/m ³
MATERIAL PARTICULADO PM 10		50	20					50	40			50	20		µg/m ³
OZONO (O₃)	100 (8h)			100 (8h)				120		240	100 (8h)				µg/m ³
DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO₂)	200	40		200	40		200		40	400	200		40	200	µg/m ³
MONÓXIDO DE CARBONO (CO)	30	10 (8h)		35	7			10							mg/m ³
DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂)															ppm
DIÓXIDO DE AZUFRE (SO₂)	500 (10min)	20		500 (10min)	20		350	125	20	500	500 (10min)	20			µg/m ³
BENCENO		1,7			1,7				5						µg/m ³
HAP: BENZO(A)PIRENO			0,12			0,12			1						ng/m ³
HAP: NAFTALENO						0,01									mg/m ³
COV: FORMALDEHÍDO (HCHO)				0,1 (30min)											mg/m ³
PLOMO (Pb)			0,5						0,5						µg/m ³
ARSÉNICO (As)			6,6						6						ng/m ³
CADMIO (Cd)			5						5						ng/m ³
NÍQUEL (Ni)			25						20						ng/m ³
RADÓN															Bq/m ³
	WHO: air quality guidelines (WHO 2000, 2006) 2006			WHO: indoor selected pollutants 2009			R.D 102/2011				WHO (calidad del aire ambiente exterior) 2018				

	CONCENTRACIÓN PROMEDIO				CONCENTRACIÓN PROMEDIO	CONCENTRACIÓN PROMEDIO	CONCENTRACIÓN PROMEDIO	CONCENTRACIÓN PROMEDIO				UD
	valor límite horario (1h)	valor límite diario (24h)	valor límite anual (año civil)	umbral de alerta (3h consecutivas)	umbral de alerta	valor límite horario (1h)	valor límite anual (año civil)	valor límite horario (1h)	valor límite diario (24h)	valor límite anual (año civil)	umbral de alerta	
MATERIAL PARTICULADO PM 2.5		25	20						25	10		µg/m ³
MATERIAL PARTICULADO PM 10		50	40						50	20		µg/m ³
OZONO (O ₃)	180	120		240				100 (8h)	120		240	µg/m ³
DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO ₂)	200		40	400				200		40	200	µg/m ³
MONÓXIDO DE CARBONO (CO)		10 (8h)						30	10 (8h)			mg/m ³
DIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂)					600						600	ppm
DIÓXIDO DE AZUFRE (SO ₂)	350	125	20					500 (10min)	20			µg/m ³
BENCENO			5						1,7			µg/m ³
HAP: BENZOPIRENO										0,12		ng/m ³
HAP: NAFTALENO										0,01		mg/m ³
COV: FORMALDEHÍDO (HCHO)						0,3		0,3				ppm
						0,37		0,1 (30min)				mg/m ³
PLOMO (Pb)			0,5							0,5		µg/m ³
ARSÉNICO (As)			6							6		ng/m ³
CADMIO (Cd)			5							5		ng/m ³
NÍQUEL (Ni)			20							20		ng/m ³
RADÓN							300			300		Bq/m ³
EEA: air quality standards (EU 2004, 2008) 2018					NTP 549*	INSST 2019 **	XUNTA 2018***	MÁS RESTRICTIVO				

No se incluyen los datos sobre el ozono, dióxidos de nitrógeno y dióxidos de azufre referidos a la protección de la vegetación.

*La NTP 549 sobre el dióxido de carbono en la evaluación de la calidad de aire interior indica que el CO₂ es un componente del aire exterior en una concentración de 300-400 ppm, pudiendo llegar a los 550 ppm en zonas urbanas. Para establecer valores en interiores:

- En el ámbito laboral se limita a 5000 ppm en 8h o 15000 ppm en 15 minutos.
- Para que el aire sea aceptable en interior de vivienda y teniendo en cuenta la emisión por la respiración humana, se sugieren 600 ppm aunque en la práctica se pueden aceptar 1000 ppm. (recomendación de la UNE 100-011-91)

** Como se indicó en el apartado 7.5, lo ideal para los formaldehídos sería un valor de 0 ppm, ya que no existe legislación para regular la exposición a larga duración. Sin embargo, sí la hay para una exposición corta en la que el Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo indica un valor límite ambiental-exposición de corta duración (VLA-EC) para el formaldehído de 0,3 ppm y 0,37 mg/m³, igual que la American Conference of Governmental Industrial Hygienists de USA. Por contra, la NTP 466 de calidad de aire: determinación ambiental de formaldehído y medición de su contenido en tableros, recomienda no superar los 100 µg/m³ para 30 min de exposición, al igual que establece la OMS. De todas formas, la mayoría de las concentraciones de TVOC informadas en ambientes interiores no industriales son inferiores a 1 mg/m³ y pocas superan los 25 mg/m³ (Molhave et al. 1997)

***A pesar de que los efectos del radón son perjudiciales para la salud, no se exponen en este trabajo por no ser directamente agravantes de las afecciones respiratorias de asma y rinitis alérgica. Sin embargo, dado que es un gas con bastante presencia en la zona de estudio es importante considerar su nivel máximo admitido, según la Directiva 2013/59/Euratom, de 300 Bq/l anuales en recinto cerrado, tanto en vivienda, como oficinas, como lugares de acceso público. (Xunta de Galicia 2018)

ANEXO II

Para la realización del gráfico se valora positivamente aquella característica de mejora en cuanto a sostenibilidad: 1 si es totalmente mejora, 0,5 si es parcial o alguna parte de la estrategia tiene esa mejora, 0 si no tiene esa característica, -0,5 si parcialmente se aleja de la sostenibilidad y -1 si se aleja totalmente de la sostenibilidad.

	VENTILACIÓN PASIVA: VENTILACIÓN NATURAL	VENTILACIÓN ACTIVA: VENTILACIÓN DE DOBLE FLUJO	MATERIAL REGULADOR DE LA HUMEDAD	MATERIAL PURIFICADOR DEL AIRE
ASPECTO SOCIAL				
Salud del usuario por la eliminación de contaminantes	1	1	0,5	1
Salud del usuario por el control de microorganismos	1	0,5	1	1
Conocer la calidad de aire		1		0,5
Relación usuario-entorno	1		0,5	0,5
Responsabilidad del usuario	-1	-0,5	-	-
Control intuitivo de la estrategia	1		1	1
Incorporación en la vivienda en cualquier momento	-	-	1	1
Mejora del confort en cuanto a corrientes de aire, ruido y filtraciones	-1	1	-	-
Impacto en el diseño arquitectónico: creación de espacios	1		-	-
Aspectos de regulación universal con una norma internacional		0,5	1	1
Garantizar caudal mínimo de ventilación adecuado	0,5	1	-	-
Fácil adquisición	1		1	

Tabla A.II_1. Valoración de estrategias en el aspecto social. Fuente: elaboración propia (2019)

	VENTILACIÓN PASIVA: VENTILACIÓN NATURAL	VENTILACIÓN ACTIVA: VENTILACIÓN DE DOBLE FLUJO	MATERIAL REGULADOR DE LA HUMEDAD	MATERIAL PURIFICADOR DEL AIRE
ASPECTO MEDIOAMBIENTAL				
No toxicidad ni inestabilidad	-	-	1	1
Aportación de aire fresco	0,5	1	-	-
Menor energía en climatización	0,5	0,5	0,5	
Eliminación de contaminantes químicos	1	1		1
Pretratamiento del aire sin energía	1	0,5	-	-
Regulación de humedad relativa	0,5	1	1	
Fundamentación en materiales naturales: bajo impacto ambiental	-	-	1	1
Uso de la energía de la naturaleza	-	-		1
Mejora de otras propiedades del material	-	-		1
Posibilidad de reciclaje		0,5	1	0,5

Tabla A.II_2. Valoración de estrategias en el aspecto medioambiental. Fuente: elaboración propia (2019)

	VENTILACIÓN PASIVA: VENTILACIÓN NATURAL	VENTILACIÓN ACTIVA: VENTILACIÓN DE DOBLE FLUJO	MATERIAL REGULADOR DE LA HUMEDAD	MATERIAL PURIFICADOR DEL AIRE
ASPECTO ECONÓMICO				
Consumo de energía		-1	-	-
Diseño económico y sencillo	1		1	1
Ahorro económico por el consecuente ahorro energético	1	1	1	
Fácil adquisición, menor huella ecológica	-	-	1	1
Mantenimiento simple, en coste y limpieza	0,5		1	1
Inversión en investigación	-	-	-1	-1
Incremento del precio con respecto a la construcción convencional		-1		-1

Tabla A.II_3. Valoración de estrategias en el aspecto económico. Fuente: elaboración propia (2019)

Se han incluido un total de 30 características, las más evidentes en esta investigación. De ellas se diferencian 23 relativas a la ventilación y 23 relativas a materiales, por lo que la puntuación final se obtiene sobre 23 puntos.

Sin afirmar rotundamente lo mejor o peor que pueda ser una estrategia, puesto que podría haber más características, se concluye que la ventilación pasiva 10,5, ventilación activa 8, material regulador de humedad 13,5 y material fotocatalítico 12,5.



Figura A.II_1. Gráfico sobre aspecto social. Fuente: elaboración propia (2019)



Figura A.II_2. Gráfico sobre aspecto medioambiental. Fuente: elaboración propia (2019)



Figura A.II_3. Gráfico sobre aspecto económico. Fuente: elaboración propia (2019)

ANEXO III

Visualización de gráficos en Grafana.



Figura A.III_1. Gráficos correspondientes a los sensores del experimento. Fuente: Grafana (2019)

Software utilizado en Rasperry Pi

Las siguientes imágenes ejemplifican el sistema operativo de la Rasperry Pi.

```
ssh pi@raspi-lab
Linux raspberrypi 4.14.98-v7+ #1200 SMP Tue Feb 12 20:27:48 GMT 2019 armv7l

The programs included with the Debian GNU/Linux system are free software;
the exact distribution terms for each program are described in the
individual files in /usr/share/doc/*/copyright.

Debian GNU/Linux comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY, to the extent
permitted by applicable law.
Last login: Sat Sep 7 11:33:44 2019 from 192.168.1.70
pi@raspberrypi:~$ sudo systemctl status sensores
● sensores.service - Sensores app
   Loaded: loaded (/usr/lib/systemd/system/sensores.service; enabled; vendor preset: enabled)
   Active: active (running) since Thu 2019-08-29 20:10:21 CEST; 1 weeks 1 days ago
     Main PID: 10728 (python3)
    CGroup: /system.slice/sensores.service
           └─10728 /usr/bin/pythbn3 app.py

Set 07 11:32:54 raspberrypi app.py[10728]: [INFO] INSERT INTO OUTSIDE (temperature, pressure, humidity) VALUES (17.9, 1025, 68)
Set 07 11:32:54 raspberrypi app.py[10728]: [INFO] INSERT INTO BME280 (temperature, pressure, humidity, altitude) VALUES (24.3, 1020, 44, 37.41)
Set 07 11:32:54 raspberrypi app.py[10728]: [INFO] INSERT INTO CCS811 (co2, tvoc) VALUES (400, 0)
Set 07 11:33:10 raspberrypi app.py[10728]: [INFO] INSERT INTO SDS011 (pm25, pm10) VALUES (1.9, 5.7)
Set 07 11:33:11 raspberrypi app.py[10728]: [INFO] Sleeping for 5 minutes
Set 07 11:38:12 raspberrypi app.py[10728]: [INFO] INSERT INTO OUTSIDE (temperature, pressure, humidity) VALUES (17.9, 1025, 68)
Set 07 11:38:12 raspberrypi app.py[10728]: [INFO] INSERT INTO BME280 (temperature, pressure, humidity, altitude) VALUES (24.3, 1020, 44, 37.79)
Set 07 11:38:12 raspberrypi app.py[10728]: [INFO] INSERT INTO CCS811 (co2, tvoc) VALUES (400, 0)
Set 07 11:38:28 raspberrypi app.py[10728]: [INFO] INSERT INTO SDS011 (pm25, pm10) VALUES (1.8, 5.1)
Set 07 11:38:28 raspberrypi app.py[10728]: [INFO] Sleeping for 5 minutes
pi@raspberrypi:~$
```

Figura A.III_1. Muestra del servicio de sensores en ejecución. Fuente: elaboración propia (2019)

```
def send_mysql_data(sentence):
    try:
        db = MySQLdb.connect(mysql_server, mysql_user, mysql_pass, mysql_db)
        cursor = db.cursor()
        cursor.execute(sentence)
        db.commit()
    except (MySQLdb.Error, MySQLdb.Warning) as e:
        error = "DB operation failed: {}".format(e)
        sys.stderr.write(error)

def read_MQ135():
    perc = mq.MQPercentage()

    sentence = "INSERT INTO gases (LPG, CO, fume) VALUES ({}, {}, {})".format(perc["GAS_LPG"], perc["CO"], perc["SMOKE"])
    logger.info(sentence)
    send_mysql_data(sentence)

def read_CCS811():
    while not ccs.available():
        pass

    temp = ccs.calculateTemperature()
    ccs.tempOffset = temp - 25.0

    attempt = 0
    max_attempts = 10

    while attempt < max_attempts:
        if not ccs.readData():
            CO2 = ccs.getCO2()
            TVOC = ccs.getTVOC()

            if CO2 is 0:
                logger.info("Incorrect data from CO2 sensor. Reading again")
                attempt += 1
                time.sleep(2)
            else:
                sentence = "INSERT INTO CCS811 (co2, tvoc) VALUES ({}, {})".format(CO2, TVOC)
                logger.info(sentence)
                send_mysql_data(sentence)
                break
```

Figura A.III_2. Código fuente que muestra las funciones de envío de datos al servidor MySQL y de toma de datos de los sensores. Fuente: elaboración propia (2019)

```
from __future__ import print_function
from mq import *
from Adafruit_CCS811 import Adafruit_CCS811
from sds011 import SDS011
import adafruit_bme280

import sys, time, datetime, MySQLdb, signal, busio, serial, struct, board, math
import json, requests
from systemd.journal import JournalHandler
import logging

# mysql server conf vars
mysql_server="metrics.maudv.net"
mysql_user="remote_sensors"
mysql_db="sensores"

# openweather conf
location_id = "3119841"
api_units_format = "metric"
endpoint_url = "https://api.openweathermap.org/data/2.5/weather"
url_call = endpoint_url + '?id=' + location_id + '&APPID=' + api_key + '&units=' + api_units_format

# Logging config
logger = logging.getLogger(__name__)

# instantiate the JournalHandler to hook into systemd
journal_handler = JournalHandler()

# set a formatter to include the level name
journal_handler.setFormatter(logging.Formatter(
    '%(levelname)s] %(message)s'
))

# add the journal handler to the current logger
logger.addHandler(journal_handler)

# optionally set the logging level
logger.setLevel(logging.DEBUG)

i2c = busio.I2C(board.SCL, board.SDA)

# Configuration for MQ-135 sensor

# Configuration for BME-280 sensor
bme280 = adafruit_bme280.Adafruit_BME280_I2C(i2c)

# Configuration for CCS811 sensor
ccs = Adafruit_CCS811()

sds011 = SDS011("/dev/ttyUSB0", use_query_mode=True)
```

Figura A.III_2. Código fuente de la configuración necesaria para la aplicación. Fuente: elaboración propia (2019)

Análisis con R

LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS VARIABLES AMBIENTALES.

```
# Asignación de datos a las variables de estudio
A <- table(datos1$Date)
frecA <- as.numeric(A)
x1 <- datos1$temperature
y1 <- datos1$pressure
z1 <- datos1$humidity
t1 <- datos1$altitude

C <- table(datos3$Date)
frecC <- as.numeric(C)
x3 <- datos3$temperature
y3 <- datos3$pressure
z3 <- datos3$humidity

summary(x1); summary(x3);

# Gráfico temperatura
par(mfrow=c(1,1))
y <- x1
y_2 <- x3[1:length(x1)]
x <- seq(min(y),max(y), length=length(y))

plot(x, y_2, type = "l", lty = 2, xlab = "1 de julio - 31 de agosto", col =
1, ylab = "Temperatura")
lines(x, y, col = 4)
legend("topleft",
      legend = c("Tª media interior = 24.99 °C", "Tª media exterior = 19.6
°C"),
      col = c("blue", "black"), lty = 1, cex = 0.7)

summary(z1); summary(z3)
```

```
# Gráfico humedad
y <- z1
y_2 <- z3[1:length(z1)]
x <- seq(min(y),max(y), length=length(y))

plot(x, y_2, type = "l", lty = 2, xlab = "1 de julio - 31 de agosto", col =
1, ylab = "Humedad")
lines(x, y, col = 4)
legend("bottomleft",
      legend = c("Humedad media interior = 56.91%", "Humedad media exterior
= 76.84%"),
      col = c("blue", "black"), lty = 1, cex = 0.7)
```

La temperatura puede ser mayor en el despacho que en el dormitorio.

```
# Comparación de la temperatura en el Despacho y en el Dormitorio (muestras
independientes)
y <- x1[datos1$room==1]; y_2 <- x1[datos1$room==2]
summary(y); summary(y_2)

shapiro.test(y); hist(y); shapiro.test(y_2); hist(y_2) # No se verifica la
normalidad.
wilcox.test(x = y, y = y_2, alternative = "greater", mu = 0, paired = FALSE,
conf.int = 0.95)
result=wilcox.test(x = y, y = y_2, alternative = "two.sided", mu = 0, paired
= FALSE, conf.int = 0.95)
result$conf.int
```

La humedad puede ser menor en el despacho que en el dormitorio.

```
# Comparación de la humedad en el Despacho y en el Dormitorio (muestras
independientes)
y <- z1[datos1$room==1]; y_2 <- z1[datos1$room==2]
summary(y); summary(y_2)
```

```
shapiro.test(y); hist(y); shapiro.test(y_2); hist(y_2) # No se verifica la normalidad.
```

```
wilcox.test(x = y, y = y_2, alternative = "less", mu = 0, paired = FALSE, conf.int = 0.95)
```

```
result=wilcox.test(x = y, y = y_2, alternative = "two.sided", mu = 0, paired = FALSE, conf.int = 0.95)
```

```
result$conf.int
```

Modificación de las variables ambientales con la ventilación en el dormitorio.

```
# Temperatura sin y con ventilación
```

```
y <- x1[datos1$room==2 & datos1$ventilation==0];
```

```
y_2 <- x1[datos1$room==2 & datos1$ventilation==2]
```

```
summary(y); summary(y_2); sd(y); sd(y_2);
```

```
A=t.test(A,mu=0); B=t.test(y_2,mu=0); A$conf.int; B$conf.int;
```

```
# Resumen de las salidas generadas por el código anterior
```

	Nula ventilación	Total ventilación
N	2327	2094
Mean	24.732	24.757
95% Confidence Interval	24.708 - 24.755	24.734 - 24.780
Median	24.700	24.800
Std. Deviation	0.5773	0.5429
Minimun	23.2	23.1
Maximun	26.1	26.0

```
shapiro.test(y); hist(y); shapiro.test(y_2); hist(y_2) # No se verifica la normalidad.
```

```
wilcox.test(x = y, y = y_2, alternative = "two.sided", mu = 0, paired = FALSE, conf.int = 0.95)
```

```
wilcox.test(x = y[1:length(y_2)], y = y_2, alternative = "two.sided", mu = 0,
paired = TRUE, conf.int = 0.95)
```

```
result=wilcox.test(x = y, y = y_2, alternative = "two.sided", mu = 0, paired
= FALSE, conf.int = 0.95)
```

```
result$conf.int
```

```
# Humedad sin y con ventilación
```

```
y <- z1[datos1$room==2 & datos1$ventilation==0];
```

```
y_2 <- z1[datos1$room==2 & datos1$ventilation==2]
```

```
summary(y); summary(y_2); sd(y); sd(y_2);
```

```
A=t.test(A,mu=0); B=t.test(y_2,mu=0); A$conf.int; B$conf.int;
```

```
# Resumen de las salidas generadas por el código anterior
```

	Nula ventilación	Total ventilación
N	2327	2094
Mean	56.56	61.48
95% Confidence Interval	56.40 - 56.72	61.26 - 61.70
Median	58.00	62.00
Std. Deviation	3.906	5.157
Minimun	45	46
Maximun	69	75

```
shapiro.test(y); hist(y); shapiro.test(y_2); hist(y_2) # No se verifica la
normalidad.
```

```
wilcox.test(x = y, y = y_2, alternative = "two.sided", mu = 0, paired =
FALSE, conf.int = 0.95)
```

```
wilcox.test(x = y[1:length(y_2)], y = y_2, alternative = "two.sided", mu = 0,
paired = TRUE, conf.int = 0.95)
```

```
result=wilcox.test(x = y, y = y_2, alternative = "two.sided", mu = 0, paired
= FALSE, conf.int = 0.95)
```

```
result$conf.int
```

Modificación de las variables ambientales con la ventilación en el despacho.

```
# Temperatura sin y con ventilación
y <- x1[datos1$room==1 & datos1$ventilation==0];
y_2 <- x1[datos1$room==1 & datos1$ventilation==2]
summary(y); summary(y_2); sd(y); sd(y_2);
A=t.test(A,mu=0); B=t.test(y_2,mu=0); A$conf.int; B$conf.int;
```

```
# Resumen de las salidas generadas por el código anterior
```

	Nula ventilación	Total ventilación
N	2077	2009
Mean	25.327	25.278
95% Confidence Interval	25.290 - 25.364	25.228 - 25.328
Median	25.300	25.500
Std. Deviation	0.8578	1.1439
Minimun	22.9	22.7
Maximun	27.2	27.6

```
shapiro.test(y); hist(y); shapiro.test(y_2); hist(y_2) # No se verifica la normalidad.
```

```
wilcox.test(x = y, y = y_2, alternative = "two.sided", mu = 0, paired = FALSE, conf.int = 0.95)
```

```
wilcox.test(x = y[1:length(y_2)], y = y_2, alternative = "two.sided", mu = 0, paired = TRUE, conf.int = 0.95)
```

```
result=wilcox.test(x = y, y = y_2, alternative = "two.sided", mu = 0, paired = FALSE, conf.int = 0.95)
```

```
result$conf.int
```

```
# Humedad con y sin ventilación
```

```
y <- z1[datos1$room==1 & datos1$ventilation==0];
y_2 <- z1[datos1$room==1 & datos1$ventilation==2]
summary(y); summary(y_2); sd(y); sd(y_2);
A=t.test(A,mu=0); B=t.test(y_2,mu=0); A$conf.int; B$conf.int;
```

Resumen de las salidas generadas por el código anterior

	Nula ventilación	Total ventilación
N	2077	2009
Mean	54.72	54.98
95% Confidence Interval	54.54 - 54.89	54.76 - 55.20
Median	55.00	56.00
Std. Deviation	4.092	5.019
Minimun	43	44
Maximun	67	65

```
shapiro.test(y); hist(y); shapiro.test(y_2); hist(y_2) # No se verifica la normalidad.
```

```
wilcox.test(x = y, y = y_2, alternative = "two.sided", mu = 0, paired = FALSE, conf.int = 0.95)
```

```
wilcox.test(x = y[1:length(y_2)], y = y_2, alternative = "two.sided", mu = 0, paired = TRUE, conf.int = 0.95)
```

```
result=wilcox.test(x = y, y = y_2, alternative = "two.sided", mu = 0, paired = FALSE, conf.int = 0.95)
```

```
result$conf.int
```

LA CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES EN CADA ESTANCIA

```
B <- table(datos2$Date)
frecB <- as.numeric(B)
x2 <- datos2$co2
y2 <- datos2$voc
```

```
D <- table(datos4$Date)
frecD <- as.numeric(D)
x4 <- datos4$pm2.5
y4 <- datos4$pm10
```

La concentración de CO2 puede ser mayor en el despacho por el día y en el dormitorio por la noche.

```
y <- x2[datos2$room==1 & datos2$daynigth==1] #noche
y_2 <- x2[datos2$room==1 & datos2$daynigth==2] #día
y_3 <- x2[datos2$room==2 & datos2$daynigth==1]
y_4 <- x2[datos2$room==2 & datos2$daynigth==2]
```

```
# Comparación de co2 en el Despacho entre la noche y el día (muestras independientes)
```

```
summary(y); summary(y_2)
```

```
shapiro.test(y); hist(y); shapiro.test(y_2); hist(y_2) # No se verifica la normalidad.
```

```
wilcox.test(x = y, y = y_2, alternative = "less", mu = 0, paired = FALSE, conf.int = 0.95)
```

```
result=wilcox.test(x = y, y = y_2, alternative = "two.sided", mu = 0, paired = FALSE, conf.int = 0.95)
```

```
result$conf.int
```

```
# Comparación de co2 en el Dormitorio entre la noche y el día (muestras independientes)
```

```
summary(y_3); summary(y_4)
```

```
shapiro.test(y_3); hist(y_3); shapiro.test(y_4); hist(y_4) # No se verifica la normalidad.
```

```
wilcox.test(x = y_3, y = y_4, alternative = "greater", mu = 0, paired = FALSE, conf.int = 0.95)
```

```
result=wilcox.test(x = y_3, y = y_4, alternative = "two.sided", mu = 0, paired = FALSE, conf.int = 0.95)
```

```
result$conf.int
```

La concentración de VOC puede ser similar en ambas estancias

```
y <- y2[datos2$room==1]; y_2 <- y2[datos2$room==2]
```

```
summary(y); summary(y_2)
```

```
shapiro.test(y); hist(y); shapiro.test(y_2); hist(y_2) # No se verifica la normalidad.
```

```
wilcox.test(x = y, y = y_2, alternative = "two.sided", mu = 0, paired = FALSE, conf.int = 0.95)
```

```
result=wilcox.test(x = y, y = y_2, alternative = "two.sided", mu = 0, paired = FALSE, conf.int = 0.95)
```

```
result$conf.int
```

La concentración de material particulado puede ser mayor en el despacho que en el dormitorio.

```
#PM2.5
```

```
y <- x4[datos4$room==1]; y_2 <- x4[datos4$room==2]
```

```
summary(y); summary(y_2)
```

```
shapiro.test(y); hist(y); shapiro.test(y_2); hist(y_2) # No se verifica la normalidad.
```

```
wilcox.test(x = y, y = y_2, alternative = "greater", mu = 0, paired = FALSE, conf.int = 0.95)
```

```
result=wilcox.test(x = y, y = y_2, alternative = "two.sided", mu = 0, paired = FALSE, conf.int = 0.95)
```

```
result$conf.int
```



```
#PM10
y <- y4[datos4$room==1]; y_2 <- y4[datos4$room==2]
summary(y); summary(y_2)

shapiro.test(y); hist(y); shapiro.test(y_2); hist(y_2) # No se verifica la
normalidad.
wilcox.test(x = y, y = y_2, alternative = "greater", mu = 0, paired = FALSE,
conf.int = 0.95)
result=wilcox.test(x = y, y = y_2, alternative = "two.sided", mu = 0, paired
= FALSE, conf.int = 0.95)
result$conf.int
```

La concentración de tóxicos puede disminuir con la ventilación en el dormitorio.

```
# co2
y <- x2[datos2$room==2 & datos2$ventilation==0];
y_2 <- x2[datos2$room==2 & datos2$ventilation==2]
summary(y); summary(y_2)

shapiro.test(y); hist(y); shapiro.test(y_2); hist(y_2) # No se verifica la
normalidad.
wilcox.test(x = y, y = y_2, alternative = "greater", mu = 0, paired = FALSE,
conf.int = 0.95)
wilcox.test(x = y[1:length(y_2)], y = y_2, alternative = "greater", mu = 0,
paired = TRUE, conf.int = 0.95)
result=wilcox.test(x = y, y = y_2, alternative = "two.sided", mu = 0, paired
= FALSE, conf.int = 0.95)
result$conf.int
```

```
# voc
y <- y2[datos2$room==2 & datos2$ventilation==0];
y_2 <- y2[datos2$room==2 & datos2$ventilation==2]
summary(y); summary(y_2)
```

```
shapiro.test(y); hist(y); shapiro.test(y_2); hist(y_2) # No se verifica la normalidad.
```

```
wilcox.test(x = y, y = y_2, alternative = "greater", mu = 0, paired = FALSE, conf.int = 0.95)
```

```
wilcox.test(x = y[1:length(y_2)], y = y_2, alternative = "greater", mu = 0, paired = TRUE, conf.int = 0.95)
```

```
result=wilcox.test(x = y, y = y_2, alternative = "two.sided", mu = 0, paired = FALSE, conf.int = 0.95)
```

```
result$conf.int
```

```
# pm2.5
```

```
y <- x4[datos4$room==2 & datos4$ventilation==0];
```

```
y_2 <- x4[datos4$room==2 & datos4$ventilation==2]
```

```
summary(y); summary(y_2)
```

```
shapiro.test(y); hist(y); shapiro.test(y_2); hist(y_2) # No se verifica la normalidad.
```

```
wilcox.test(x = y, y = y_2, alternative = "greater", mu = 0, paired = FALSE, conf.int = 0.95)
```

```
wilcox.test(x = y[1:length(y_2)], y = y_2, alternative = "greater", mu = 0, paired = TRUE, conf.int = 0.95)
```

```
result=wilcox.test(x = y, y = y_2, alternative = "two.sided", mu = 0, paired = FALSE, conf.int = 0.95)
```

```
result$conf.int
```

```
# pm10
```

```
y <- y4[datos4$room==2 & datos4$ventilation==0];
```

```
y_2 <- y4[datos4$room==2 & datos4$ventilation==2]
```

```
summary(y); summary(y_2)
```

```
shapiro.test(y); hist(y); shapiro.test(y_2); hist(y_2) # No se verifica la normalidad.
```

```
wilcox.test(x = y, y = y_2, alternative = "greater", mu = 0, paired = FALSE, conf.int = 0.95)
```

```
wilcox.test(x = y[1:length(y_2)], y = y_2, alternative = "greater", mu = 0, paired = TRUE, conf.int = 0.95)
```

```
result=wilcox.test(x = y, y = y_2, alternative = "two.sided", mu = 0, paired = FALSE, conf.int = 0.95)
```

```
result$conf.int
```

La concentración de tóxicos puede disminuir con la ventilación en el despacho.

```
# co2
y <- x2[datos2$room==1 & datos2$ventilation==0];
y_2 <- x2[datos2$room==1 & datos2$ventilation==2]
summary(y); summary(y_2)

shapiro.test(y); hist(y); shapiro.test(y_2); hist(y_2) # No se verifica la
normalidad.

wilcox.test(x = y, y = y_2, alternative = "greater", mu = 0, paired = FALSE,
conf.int = 0.95)

wilcox.test(x = y[1:length(y_2)], y = y_2, alternative = "greater", mu = 0,
paired = TRUE, conf.int = 0.95)

result=wilcox.test(x = y, y = y_2, alternative = "two.sided", mu = 0, paired
= FALSE, conf.int = 0.95)

result$conf.int

# voc
y <- y2[datos2$room==1 & datos2$ventilation==0];
y_2 <- y2[datos2$room==1 & datos2$ventilation==2]
summary(y); summary(y_2)

shapiro.test(y); hist(y); shapiro.test(y_2); hist(y_2) # No se verifica la
normalidad.

wilcox.test(x = y, y = y_2, alternative = "greater", mu = 0, paired = FALSE,
conf.int = 0.95)

wilcox.test(x = y[1:length(y_2)], y = y_2, alternative = "greater", mu = 0,
paired = TRUE, conf.int = 0.95)

result=wilcox.test(x = y, y = y_2, alternative = "two.sided", mu = 0, paired
= FALSE, conf.int = 0.95)

result$conf.int

# pm2.5
y <- x4[datos4$room==1 & datos4$ventilation==0];
y_2 <- x4[datos4$room==1 & datos4$ventilation==2]
summary(y); summary(y_2)
```

```
shapiro.test(y); hist(y); shapiro.test(y_2); hist(y_2) # No se verifica la normalidad.
```

```
wilcox.test(x = y, y = y_2, alternative = "greater", mu = 0, paired = FALSE, conf.int = 0.95)
```

```
wilcox.test(x = y[1:length(y_2)], y = y_2, alternative = "greater", mu = 0, paired = TRUE, conf.int = 0.95)
```

```
result=wilcox.test(x = y, y = y_2, alternative = "two.sided", mu = 0, paired = FALSE, conf.int = 0.95)
```

```
result$conf.int
```

```
# pm10
```

```
y <- y4[datos4$room==1 & datos4$ventilation==0];
```

```
y_2 <- y4[datos4$room==1 & datos4$ventilation==2]
```

```
summary(y); summary(y_2)
```

```
shapiro.test(y); hist(y); shapiro.test(y_2); hist(y_2) # No se verifica la normalidad.
```

```
wilcox.test(x = y, y = y_2, alternative = "greater", mu = 0, paired = FALSE, conf.int = 0.95)
```

```
wilcox.test(x = y[1:length(y_2)], y = y_2, alternative = "greater", mu = 0, paired = TRUE, conf.int = 0.95)
```

```
result=wilcox.test(x = y, y = y_2, alternative = "two.sided", mu = 0, paired = FALSE, conf.int = 0.95)
```

```
result$conf.int
```