



**Diseño de un Sistema de Biodepuración de aire basado en el sensado químico de
compuestos orgánicos volátiles en ambientes interiores**

Velasco Santamaría, Tannia Michelle y Zúñiga Navarrete, Marco David

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica,
Automatización y Control

Ing. Arcentales Viteri, Andrés Ricardo PhD.

26 de agosto del 2020

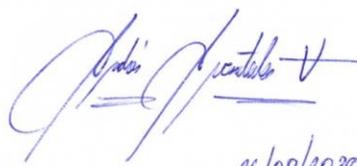


Document Information

Analyzed document	Tesis_Velasco_Zuniga.pdf (D78197446)
Submitted	8/26/2020 2:56:00 PM
Submitted by	Arcentales Viteri Andres Ricardo
Submitter email	ararcentales@espe.edu.ec
Similarity	1%
Analysis address	ararcentales.espe@analysis.orkund.com

Sources included in the report

SA	Trabajo de titulación - Gustavo Ruiz.pdf Document Trabajo de titulación - Gustavo Ruiz.pdf (D76123449)		2
SA	Trabajo_Titulacion_Jonathan_Escobar.pdf Document Trabajo_Titulacion_Jonathan_Escobar.pdf (D62500380)		2
SA	18528c5e07a6a39de4d8633d8d3df2c3dc7f5787.docx Document 18528c5e07a6a39de4d8633d8d3df2c3dc7f5787.docx (D72155058)		1
SA	GRADO DE CONTAMINACION POR DIÓXIDO DE CARBONO EN LA CIUDAD DEL CUSCO.docx Document GRADO DE CONTAMINACION POR DIÓXIDO DE CARBONO EN LA CIUDAD DEL CUSCO.docx (D61681890)		1


26/08/2020



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**Diseño de un Sistema de Biodepuración de aire basado en el sensado químico de compuestos orgánicos volátiles en ambientes interiores**” fue realizado por los señores **Velasco Santamaría, Tannia Michelle** y **Zúñiga Navarrete, Marco David** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 26 de agosto de 2020

Firma:

Arcentales Viteri, Andrés Ricardo

C. C. 1712480746



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Nosotros, **Velasco Santamaría, Tannia Michelle y Zúñiga Navarrete, Marco David**, con cédulas de ciudadanía n°1804423786 y n°1721225876, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Diseño de un Sistema de Biodepuración de aire basado en el sensado químico de compuestos orgánicos volátiles en ambientes interiores** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 26 de agosto de 2020

Firma

Velasco Santamaría, Tannia Michelle

C.C.: 1804423786

Firma

Zúñiga Navarrete, Marco David

C.C.: 1721225876



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Nosotros, **Velasco Santamaría, Tannia Michelle** y **Zúñiga Navarrete, Marco David**, con cédulas de ciudadanía n°1804423786 y n°1721225876, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Diseño de un Sistema de Biodepuración de aire basado en el sensado químico de compuestos orgánicos volátiles en ambientes interiores** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 26 de agosto de 2020

Firma

Velasco Santamaría, Tannia Michelle

C.C.: 1804423786

Firma

Zúñiga Navarrete, Marco David

C.C.: 1721225876

Dedicatorias

Dedicada a mis padres Luis y Miriam, quienes con su ejemplo, esfuerzo y apoyo incondicional me han permitido cumplir uno de los sueños más importantes en mi vida. A mis hermanos Daniel y Gabriela, los que me han sabido guiar y apoyar durante este largo camino. A mi abuelito Barney, que sé que desde el cielo está orgulloso al verme cumplir uno de sus sueños. A mi abuelita Carmen, a mis tíos, tías, primos y primas paternos y maternos, por su apoyo y preocupación en todo momento. A todas las personas que han formado parte de mi vida durante esta etapa universitaria, especialmente a todos mis amigos, amigas y compañeros, que han estado conmigo en los buenos y malos momentos, de los cuales me llevo hoy los mejores recuerdos. Y a ti David, gracias por haber estado a mi lado en todo momento, apoyándome y ahora cumpliendo este sueño juntos.

Tannia Michelle Velasco Santamaría

Quiero dedicar este trabajo primeramente a Dios, a Él sea toda la Gloria y la Honra. A mis padres Marco y Vivi, por su amor, esfuerzo y sacrificio. A mis hermanos Christian y Pablin, por su apoyo incondicional durante todo este tiempo. Por y para ustedes son todos mis logros. A mi abuelito Francklin, por siempre creer y estar orgulloso de sus nietos. A mis amigos Daniel Pujota, Paúl Changoluisa, Andrés Pujota, Daniel Meza, por estar incondicionalmente en todo momento. A mi novia Anita, por demostrarme su amor y apoyo desde que nos conocimos. A mis familiares, compañeros, docentes y amigos en general. Una dedicatoria especial a Michelle, a pesar de todo lo que vivimos en este proyecto, siempre ha sido una gran amiga en todo momento. En fin, a cada persona que fue parte de este largo proceso de aprendizaje.

Marco David Zúñiga Navarrete

Agradecimientos

A nuestro tutor, Dr. Andrés Arcentales por ser el guía en la elaboración de este trabajo de titulación, brindándonos sus consejos y conocimientos que nos ha permitido alcanzar esta meta.

A la Dra. Ana Guamán y al Dr. Vicente Delgado por toda su colaboración en las diferentes etapas del proyecto, ya que el apoyo brindado fue de gran relevancia durante todo este tiempo.

A nuestros compañero y docentes de la Universidad de las Fuerzas Armadas por formar parte de nuestro desarrollo personal y profesional.

Michelle Velasco y David Zúñiga

Índice de contenidos

Diseño de un Sistema de Biodepuración de aire basado en el sensado químico de compuestos orgánicos volátiles en ambientes interiores	1
Hoja de resultados de la herramienta Urkund.....	2
Certificación trabajo de titulación	3
Autoría de responsabilidad	4
Autorización de publicación	5
Dedicatorias	6
Agradecimientos.....	7
Índice de contenidos.....	8
Índice de tablas	11
Índice de figuras	12
Resumen.....	14
Abstract	15
Capítulo 1	16
Introducción.....	16
Antecedentes.....	16
Justificación e importancia	22
Alcance.....	24
Objetivos.....	27
Objetivo general	27
Objetivos específicos	27

Capítulo 2.....	28
Fundamentos teóricos	28
Contaminación química del aire en ambientes interiores	28
Contaminantes Orgánicos Volátiles (VOC).....	29
Calidad de aire interior	32
Efectos de los VOC sobre la salud humana.	37
Sistemas de sensado químico para calidad de aire	40
Sensores químicos.....	40
Sensores químicos para calidad de aire usados en la actualidad.....	41
Importancia de las plantas en el proceso de limpieza del aire.....	42
Fisiología de las plantas.....	43
Estudios de plantas como biodepuradores.....	44
Sistema de depuración del aire.....	47
Sistemas de depuración domésticos	48
Sistemas de biodepuración	49
Capítulo 3.....	54
Sistema de sensado químico.....	54
Introducción	54
Selección de los sensores químicos	54
Sensores de óxido metálico	56
Sensor óptico	58
Diseño del Sistema de sensado químico	59
Sistema de sensado.....	61
Sistema neumático.....	63
Sistema de control y adquisición de señales	64

	10
Integración del sistema de sensado	67
Calibración de sensores.....	68
Metodología para la calibración de los sensores	68
Estimación de las curvas de calibración	76
Selección final de los sensores.....	91
Capítulo 4.....	92
Sistema de biodepuración	92
Introducción	92
Selección de las plantas para el sistema de biodepuración	93
Diseño del sistema para el análisis de la fisiología de las plantas.....	95
Análisis de los procesos de biodepuración.....	100
Metodología para el estudio del proceso de biodepuración	100
Pruebas y Resultados	101
Sistema de biodepuración aplicado en ambientes interiores.....	111
Diseño e implementación del sistema de biodepuración	112
Pruebas y resultados.....	114
Capítulo 5.....	119
Conclusiones y recomendaciones	119
Sistema de sensado químico	120
Análisis de la fisiología de las plantas	124
Sistema de biodepuración.....	127
Referencias bibliográficas.....	130

Índice de tablas

Tabla 1. <i>Índice Quiteño de la Calidad del Aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).</i>	21
Tabla 2. <i>Fuentes frecuentes de VOC en ambientes interiores.</i>	31
Tabla 3. <i>Concentraciones de contaminantes comunes que definen los niveles de alerta, de alarma y de emergencia en la calidad del aire.</i>	35
Tabla 4. <i>Valores guía para contaminantes ambientales en interiores.</i>	36
Tabla 5. <i>Plantas de interior que filtran el aire.</i>	47
Tabla 6. <i>Sensores químicos de la familia MQ.</i>	57
Tabla 7. <i>Especificaciones técnicas del sensor SCD30.</i>	58
Tabla 8. <i>Especificaciones técnicas Bomba de diafragma R385.</i>	64
Tabla 9. <i>Especificaciones técnicas Teensy 3.6.</i>	65
Tabla 10. <i>Valores de concentración de los químicos.</i>	74
Tabla 11. <i>Datos estadísticos de la estimación de la curva del sensor CCS811.</i>	80
Tabla 12. <i>Datos estadísticos de la estimación de la curva del sensor MQ-3.</i>	83
Tabla 13. <i>Datos estadísticos de la estimación de la curva del sensor MQ-9.</i>	85
Tabla 14. <i>Datos estadísticos de la estimación de la curva del sensor MQ-135</i>	88
Tabla 15. <i>Datos estadísticos de la estimación de la curva del sensor SCD30.</i>	90
Tabla 16. <i>Selección final de los sensores para el Sistema de sensado químico.</i>	91
Tabla 17. <i>Planificación de las pruebas.</i>	102
Tabla 18. <i>Valores de concentración medidos al exponer las plantas con etanol.</i>	106
Tabla 19. <i>Valores de concentración medidos al exponer las plantas con CO_2.</i>	108
Tabla 20. <i>Valores de concentración medidos al exponer las plantas con acetona.</i>	109
Tabla 21. <i>Valores de concentración medidos al exponer las plantas con la mezcla de los gases.</i>	110
Tabla 22. <i>Valores promedio de los sensores ambientales durante las pruebas.</i>	111

Índice de figuras

Figura 1. <i>Plant Air Purifier</i>	19
Figura 2. <i>Filtro de aire vivo ANDREA</i>	25
Figura 3. <i>Diagrama de fases</i>	26
Figura 4. <i>Diagrama de bloques del sistema de control</i>	26
Figura 5. <i>Primer filtro de aire con plantas ornamentales</i>	45
Figura 6. <i>Diagrama de funcionamiento técnico del purificador de aire ‘Andrea’</i>	50
Figura 7. <i>Ecology Garden en el Hospital Universitario Showa</i>	51
Figura 8. <i>Galería verde</i>	51
Figura 9. <i>Biofiltros de Nedlaw usados en sistemas HVAC de edificios</i>	52
Figura 10. <i>CityTree creado por Green City Solutions</i>	53
Figura 11. <i>Diagrama esquemático del sistema de sensado químico</i>	60
Figura 12. <i>Caja de sensado químico</i>	61
Figura 13. <i>Matriz de sensores implementada</i>	62
Figura 14. <i>Sensores de monitoreo ambiental</i>	63
Figura 15. <i>Diagrama de conexión del Sistema de control y adquisición de señales</i>	66
Figura 16. <i>Implementación del Sistema de Sensado Químico</i>	67
Figura 17. <i>Análisis de temperatura de la Caja 1</i>	69
Figura 18. <i>Análisis de temperatura de la Caja 2</i>	69
Figura 19. <i>a) Tanque estándar de CO, b) Bombona de vidrio</i>	72
Figura 20. <i>Balanza digital para pesar los químicos</i>	73
Figura 21. <i>Comportamiento del sensor MQ-3 durante la prueba</i>	76
Figura 22. <i>Respuesta del sensor MQ-3 al aire cero</i>	77
Figura 23. <i>Curva de estimación del sensor CCS811 para el CO en la Caja 1</i>	79
Figura 24. <i>Curva de estimación del sensor CCS811 para el CO en la Caja 2</i>	79
Figura 25. <i>Curva de estimación del sensor MQ-3 para el etanol en la Caja 1</i>	81

Figura 26. <i>Curva de estimación del sensor MQ-3 para el etanol en la Caja 2.</i>	82
Figura 27. <i>Curva de estimación del sensor MQ-9 para la acetona en la Caja 1.</i>	84
Figura 28. <i>Curva de estimación del sensor MQ-9 para la acetona en la Caja 2.</i>	84
Figura 29. <i>Curva de estimación del sensor MQ-135 para el tolueno en la Caja 1.</i>	86
Figura 30. <i>Curva de estimación del sensor MQ-135 para el tolueno en la Caja 2.</i>	87
Figura 31. <i>Curva de estimación del sensor SCD30 para el CO₂ en la Caja 1.</i>	89
Figura 32. <i>Curva de estimación del sensor SCD30 para el CO₂ en la Caja 2.</i>	89
Figura 33. <i>Cuna de Moisés.</i>	94
Figura 34. <i>Lengua de suegra.</i>	95
Figura 35. <i>Placa de monitoreo ambiental interior.</i>	96
Figura 36. <i>Caja de vidrio para el análisis de la fisiología de la planta.</i>	97
Figura 37. <i>Implementación y acondicionamiento del sistema de sensado químico.</i>	98
Figura 38. <i>Prueba de hermeticidad de la caja.</i>	99
Figura 39. <i>Comportamiento del sensor CCS811.</i>	103
Figura 40. <i>Ventana con los valores máximos obtenidos durante la prueba.</i>	104
Figura 41. <i>Comparativa de concentraciones de la mezcla de gases medidas con la caja vacía, la caja con maceta sin planta y con planta.</i>	105
Figura 42. <i>Comparativa de las concentraciones de acetona medidas en una prueba.</i>	105
Figura 43. <i>Sistema de Biodepuración.</i>	113
Figura 44. <i>a) Concentración de CO₂ en el dormitorio al exterior de la caja, b) Concentración de CO₂ en el dormitorio al interior del sistema de biodepuración.</i>	116
Figura 45. <i>a) Concentración de CO₂ en la sala - comedor al exterior de la caja, b) Concentración de CO₂ en la sala - comedor al interior del sistema de biodepuración.</i>	117

Resumen

La calidad del aire en ambientes interiores ha sido tema de investigación en los últimos años debido a que afecta directamente a la salud, confort y bienestar de las personas. En este contexto, comercialmente se han desarrollado diversos sistemas que buscan monitorear y controlar la calidad del aire en ambientes interiores. Inicialmente, en este proyecto se presenta la revisión bibliográfica sobre la contaminación química en ambientes interiores, sensores químicos y plantas como sistemas de biodepuración. Seguido a esto se realiza el diseño de un sistema de sensado químico desarrollando una matriz con sensores de óxido metálico y un sensor óptico para la detección de CO, CO₂, etanol, acetona y tolueno. Se realiza la estimación de las curvas de calibración de los sensores mediante un modelo de regresión lineal con un valor de R² mayor a 0.88 asegurando la exactitud en la respuesta de los sensores. En base al sistema de sensado químico, se analiza el comportamiento de las plantas *Spathiphyllum 'Mauna Loa'* y *Sansevieria Trifasciata* frente a la exposición a los químicos en pruebas realizadas durante el día y la noche. Finalmente, con los resultados obtenidos del análisis de la fisiología de la planta, se presenta el diseño e implementación del sistema de biodepuración comprobando su funcionamiento al ubicarlo en ambientes reales dentro de una casa, observando que el rendimiento en el proceso de limpieza del aire depende del número de plantas implementadas de acuerdo con el volumen de la habitación en el que se ubique al sistema.

PALABRAS CLAVE:

- **BIODEPURACIÓN**
- **SENSORES QUÍMICOS**
- **AMBIENTES INTERIORES**
- **CALIBRACIÓN**

Abstract

Air quality in indoor environments has been a research topic in recent years because it directly affects people's health, comfort and well-being. In this context, various systems have been commercially developed to monitor and control air quality in indoor environments. Initially, this project presents the bibliographic review on chemical pollution in indoor environments, chemical sensors and plants as bio purification systems. This is followed by the design of a chemical sensing system by developing an array with metal oxide sensors and an optical sensor for detecting CO, CO₂, ethanol, acetone and toluene. Sensors calibration curves are estimated using a linear regression model with a value of R² greater than 0.88, ensuring accuracy in sensor response. Based on the chemical sensing system, the behaviour of the plants *Spathiphyllum* 'Mauna Loa' and *Sansevieria Trifasciata* is analysed against the exposure to the chemicals in tests performed during the day and night. Finally, with the results obtained from the analysis of the physiology of the plant, the design and implementation of the bio debugging system is presented by checking its functioning in real environments inside a house, observing that the performance in the process of air clean-up depends on the number of plants implemented according to the volume of the room in which the system is located.

KEY WORDS:

- **BIODEPURATION**
- **CHEMICAL SENSORS**
- **INDOOR ENVIRONMENTS**
- **CALIBRATION**

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

El tiempo aproximado que una persona pasa en un ambiente cerrado está entre el 80% y 90% del total de su día, es allí donde desarrolla la mayoría de sus actividades cotidianas como son: alimentarse, dormir, trabajar, estudiar, etc. Uno de los procesos fisiológicos del ser humano que es controlado de manera involuntaria es la respiración, por esto, el desempeño de cada una de las actividades realizadas depende de la calidad de aire con la que se está en contacto. Se conoce como calidad del aire en interiores al nivel de contaminación que se presenta en dicho ambiente. Esta contaminación viene relacionada con varios aspectos como son los vapores orgánicos e inorgánicos, ozono, monóxido de carbono, dióxido de carbono, además de las condiciones termohigrométricas y ruido presente. Los efectos de la contaminación del aire en interiores en el ambiente laboral suelen ser perjudiciales para la salud de los trabajadores, se conoce que si estos síntomas afectan a más del 20% de los ocupantes de un edificio se lo llama el “Síndrome del Edificio Enfermo” (Piñol et al., 2013).

Se ha encontrado que las sustancias contaminantes que afectan mayormente a los ambientes interiores son: formaldehídos, tricloroetileno, benceno, xileno, monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂). Este tipo de contaminantes se los encuentra comúnmente en muebles, madera, alfombras, tintas de impresión, pinturas, gomas, motores y en humo de tabacos. Los síntomas que se presentan en las personas que se encuentran en contacto con estos contaminantes en los ambientes interiores pueden ser: dolor de cabeza, pérdidas de apetito, dermatitis alérgica, irritación de ojos, nariz y

garganta, además de somnolencia. Todos estos efectos se producen por la recirculación de aire en el interior del edificio (UrbanArbolismo, 2009).

Realizando un análisis de los factores ambientales en construcciones cerradas; el denominado síndrome de edificio enfermo puede producir efectos negativos en las condiciones de salud de una persona dentro de este medio. Uno de los indicadores de contaminación del aire interior es el dióxido de carbono. Por ello, se desarrolló un sistema para monitorear y administrar la calidad de aire interior mediante la ventilación y circulación de aire. La implementación de sensores permite manejar de mejor manera las condiciones ambientales. La introducción de aire fresco y su circulación serán necesarios para mantener la calidad de aire interior dentro de los niveles aceptables para el confort de las personas (A. Ibrahim, 2016).

Con la finalidad de contrarrestar los efectos del “síndrome del edificio enfermo”, se presenta la biodepuración como una opción a los sistemas tradicionales. Pedraza la define como: “la técnica del campo de la fitorremediación, que pertenece a los procesos biotecnológicos utilizados para el tratamiento del aire y de efluentes gaseosos” (Pedraza Ortiz, 2013).

En los años 80, el científico de la NASA el Dr. Bill Wolverton, empezó a realizar por primera vez pruebas en plantas ornamentales para determinar si estas podían eliminar químicos orgánicos volátiles (VOC). Estas pruebas fueron realizadas en cámaras cerradas, por lo que los resultados encontrados no correspondían a las condiciones al aire libre. En el Centro Espacial Stennis de la NASA, se construyó el BioHome, un proyecto que permitió simular las condiciones ambientales de una casa, en el cual se usaron plantas comunes para la purificación del aire (NASA, 2007).

Los estudios y programas más importantes realizados por la NASA en relación con la biodepuración fueron: BioHome, Biosphere 2, Mars Desert Research Station, en los que se buscó comprobar la eficacia de diferentes plantas para actuar contra los contaminantes. Como resultado de estos experimentos, se publicó una lista de varias plantas que pueden ser utilizadas en el proceso de la biodepuración, entre las cuales figuran las siguientes:

- Potos (*Epipremnum aureum*), que es una de las plantas más fácil de cultivar de todas las plantas ornamentales, tolera toda variedad de condiciones ambientales a nivel indoor, y permite la eliminación de sustancias como los formaldehídos (Nieto, 2014).
- Flor de la paz (*Spathiphyllum Sp*), es una planta que se puede encontrar con frecuencia en ambientes húmedos, además, permite la eliminación de sustancias como xileno y tolueno, formaldehídos, también elimina alcoholes, acetona, tricloroetileno y benceno (Nieto, 2014).
- Lengua de suegra (*Sansevieria trifasciata*) de origen sudafricano, es una planta ideal para dormitorio, pues durante la noche se encarga de convertir el CO₂ en oxígeno. También es capaz de reducir los niveles de formaldehidos, benceno y monóxido de carbono presentes en el ambiente (Ortiz, 2016).
- Areca Palm (*Chrysalidocarpus lutescens*), esta planta puede ser utilizada en cualquier habitación, sin embargo, tiene mayor efectividad en lugares con muebles barnizados por su capacidad de absorción del xileno. Es eficaz en reducir los niveles de formaldehídos y tricloroetileno (UrbanArbolismo, 2009).

Después de la investigación realizada en la NASA, el Dr. Bill Wolverton fundó la empresa Wolverton Environmental Services, con el fin reducir los niveles de contaminación en espacios interiores (Wolverton Environmental Services, 2018a). En esta empresa desarrolló el sistema para purificar aire denominado Plant Air Purifier, en

donde se absorbe el aire por debajo de la maceta y los contaminantes son absorbidos por el carbón activado. El carbón activado y las piedras en la superficie mantienen los contaminantes y luego, los microbios en la zona de la raíz permiten su descomposición para ser absorbida por la planta. Así, el dispositivo es bioregenerativo.

Figura 1.

Plant Air Purifier.



Nota. Adaptado de Background of the Technology, por Wolverton Environmental Services, 2018. Tomado de Plant Air Purifier (<http://www.wolvertonenvironmental.com/plantairpurifier.html>).

Estas investigaciones se consolidaron cuando el profesor de química de la Universidad Estatal de Nueva York, Niri, decidió estudiar el efecto de las plantas antes mencionadas ante la contaminación ambiental, todo esto debido a que él no pudo soportar un ambiente contaminado cuando estuvo esperando por un largo periodo de tiempo en un salón de belleza. Los resultados corroboraron que las plantas tienen la capacidad de limpiar los ambientes interiores contaminados (Quintana Roo, 2016).

Como propuesta para eliminar la contaminación ambiental en ambientes cerrados, el diseñador Mathieu Lehanner construyó un dispositivo en el cual la planta está en el interior de una capsula, permitiendo que el aire ingrese para ser purificado y una vez realizado este proceso, se devuelve el aire purificado al ambiente (Mathieu Lehanner, 2011).

La Organización Mundial de la Salud ha emitido directrices sobre la Calidad del Aire, en las que se establece que cada país debe considerar normas que protejan la salud de las personas, acorde a la realidad social, técnica y económica. Basado en lo antes mencionado, en el Ecuador se establece el criterio nacional de evaluación del estado de la contaminación atmosférica, constituido en la Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire (NECA). En la normativa se establecen los objetivos de calidad del aire y los límites permisibles de contaminantes en el ambiente.

Las cantidades de contaminantes que se encuentran en el aire son medidas por medio del índice de calidad de aire, este índice es utilizado para expresar de manera cualitativa y cuantitativa el grado de contaminación que tiene el aire que se respira en las distintas ciudades del mundo. Con relación a esto, cada ciudad dispone de un índice de calidad de aire elaborado por la secretaría del ambiente o entidades similares. Este índice, en la ciudad Quito, es medido entre valores de 0 a 500, los valores cercanos a 0 muestran que el aire no se encuentra contaminado, mientras que los valores cercanos a 500 indican que el aire tiene altos niveles de contaminación (Norma Ecuatoriana de Calidad Del Aire, 2011).

Tabla 1.

Índice Quiteño de la Calidad del Aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Rango	Categoría	Monóxido	Ozono	Dióxido	Dióxido	Material	Material
		de Carbono CO	O ₃	de Nitrógeno NO ₂	de Azufre SO ₂	Particulado PM _{2.5}	Particulado PM ₁₀
	Concentración	8 horas	8 horas	1 hora	24 horas	24 horas	24 horas
0-50	Nivel deseable	0-5000	0-50	0-100	0-62.5	0-25	0-50
51-100	Nivel aceptable	5001-10000	51-100	101-200	63.5-125	26-50	51-100
101-200	Nivel de precaución	10001-15000	101-200	201-1000	126-200	51-150	101-250
201-300	Nivel de alerta	15001-3000	201-400	1001-2000	201-1000	151-250	251-400
301-400	Nivel de alarma	30001-40000	401-600	2001-3000	1001-1800	251-350	401-500
401-500	Nivel de emergencia	>40000	>600	>3000	>1800	>350	>500

Nota. Adaptado de Límites numéricos de cada categoría del IQCA (un/m^3), por Secretaria de Ambiente, 2016. Tomado de Índice Quiteño de la Calidad del Aire (<http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/index.php/documentos-indice-quiteno-de-calidad-del-aire>).

Sin embargo, la norma antes descrita, tiene como objeto principal el salvaguardar la salud de las personas, la calidad del aire ambiente y el bienestar de los ecosistemas. Por esto, es importante indicar que en el Ecuador no se cuenta con normativas que regulen la calidad de aire en interiores.

Actualmente se busca desarrollar sistemas que garanticen un determinado grado de confort para las personas en un ambiente cerrado. La idea de edificios y casas

inteligentes ha tenido constante desarrollo en los últimos años, con el fin de regular el uso energético y mejorar las condiciones de vida de las personas. Este rol tecnológico se lo puede aplicar de dos maneras, 1) para garantizar la seguridad, la salud y la comodidad de los ocupantes, así como para facilitar las operaciones domésticas, especialmente para reducir los costos de energía y 2) para ayudar a las personas adultas y con discapacidades especiales, mediante la tecnología de sensores inteligentes a permanecer independientemente en su propia casa el mayor tiempo posible (Schieweck et al., 2018).

1.2. Justificación e importancia

El término calidad del aire interior se aplica para ambientes en los que habita el ser humano, no industriales como edificios públicos y oficinas. En los últimos años ha tenido gran relevancia el término síndrome del edificio enfermo que comprende numerosos síntomas o enfermedades que afectan a personas que trabajan o habitan en dichos edificios.

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) cada año, cerca de 4 millones de personas mueren por enfermedades atribuidas a la contaminación del aire en los hogares (OMS, 2018). En la actualidad en las zonas rurales, las personas siguen cocinando y calentando los hogares con fuego (madera, carbón); siendo la contaminación del aire interior, nociva para la salud de sus habitantes. Estudios realizados por la OMS demuestran que esta es la principal razón por la que los países en vías de desarrollo tienen niveles de contaminación del aire mucho mayores a los países desarrollados.

Con el desarrollo del Plan Nacional de Calidad del Aire se busca cumplir con los derechos establecidos por la Constitución de la República del Ecuador. Estableciendo el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado.

Actualmente la gestión ambiental del país presenta graves falencias, como, por ejemplo: la falta de seguimiento de los convenios y normativas en vigencia. Otro de los problemas que acarrea, ha sido el crecimiento de las urbes que poco a poco ha ido desplazando las áreas verdes dentro de las zonas de aglomeración. La contaminación ambiental y la calidad del aire son algunos de los términos que actualmente se usan para calificar al medio ambiente. Las áreas verdes y las plantas tienen una gran influencia en mejorar la calidad de aire, reduciendo el CO₂ y generando oxígeno, regulando la temperatura ambiental, evitan la erosión de los suelos, además, desempeñan un rol psicológico en el bienestar de las personas. Por el grado de contaminación ambiental que existe en la actualidad, se ha generado la idea de crear ambientes herméticos (Salgado, 2002).

Según la información presentada por el Instituto Nacional de Estadística y Censos, en el Ecuador existen 4,69 metros cuadrados de espacios verdes por habitante, con un déficit de cerca de 4,31 metros cuadrados con relación a los 9 metros cuadrados recomendados por la OMS. Pichincha es una de las 10 provincias que cumplen con la recomendación de la OMS, cuenta con 21,6 metros cuadrados de áreas verdes por habitante (Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), 2014). Una de las alternativas sugeridas para mejorar la calidad del aire interior es el uso de plantas debido a el intercambio de CO₂ por O₂; la reducción de los compuestos orgánicos y elementos tóxicos volátiles que contaminan el aire. La biodepuración permite el acceso al aire limpio en espacios interiores.

Este trabajo se desarrolla con el fin de mejorar la calidad del aire interior en ambientes no industriales como viviendas y oficinas, mediante la reducción de los niveles de contaminación ambiental basado en el proceso de biodepuración de aire llevado a cabo por plantas. El proyecto busca fomentar la investigación en las áreas de

Instrumentación y Sensores, Biomédica y Procesamiento Digital de Señales, aportando con una base científica y técnica, dadas las necesidades actuales en relación con la calidad del aire en ambientes interiores y a los efectos nocivos de la contaminación ambiental que afectan a la salud humana.

1.3. Alcance

En el presente proyecto se propone el diseño de un sistema de biodepuración de aire, basado en el uso de plantas y en el sensado químico de contaminantes orgánicos volátiles que afectan la calidad del aire en los espacios interiores. Se diseñará un sistema en el cual la planta se encontrará encapsulada, aislada del medio, en un ambiente controlado.

El sistema se estructura en tres subsistemas que son: 1) Diseño del sistema de monitoreo y sensado de los contaminantes volátiles, 2) Diseño de un sistema de control para el ingreso y salida de aire, y 3) Integración de los sistemas de control y sensado en la cápsula que se colocará la planta.

1. El sistema de sensado realizará el monitoreo de los contaminantes orgánicos volátiles como CO₂, acetonas, formaldehídos y etanol, que se encuentran presentes tanto en ambientes interiores como exteriores a la cápsula en la que está ubicada la planta. Se trabajará con las siguientes plantas: *Chrysalidocarpus lutescens*, *Spathiphyllum Sp* y *Sansevieria trifasciata*. Se desarrollará una red de sensores químicos no especializados para monitorear el índice de calidad de aire dentro y fuera de la cápsula. Esta medición será comparada con el sensor especializado de Índice de Calidad del Aire de Adafruit (Adafruit, 2009) con el fin de analizar el comportamiento de los sensores de la red ante la exposición a diferentes VOC.
2. El sistema de control realizará la apertura y cierre de las compuertas de ingreso y

salida de aire de la cápsula cuando las condiciones internas de la misma sean mejores que las condiciones externas, es decir cuando los niveles de concentración de VOC sean menores que 100 según el rango establecido en el Índice Quiteño de Calidad de Aire (Tabla 1). Para el controlador se utilizará la tarjeta de desarrollo Teensy (PJRC, 2008) cuyo entorno de programación es de software libre.

3. Finalmente, se realizará la integración de los subsistemas de sensado y control en un solo sistema que será implementado sobre la cápsula en la que se ubica la planta seleccionada. El diseño estructural de la cápsula será similar al diseño presentado por Mathieu Lehanneur (Mathieu Lehanneur, 2011) que se muestra en la Figura 2.

Figura 2.

Filtro de aire vivo ANDREA.

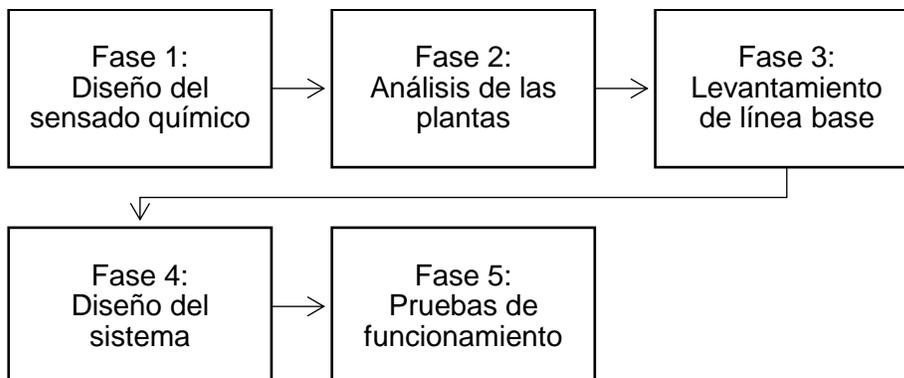


Nota. Adaptado de ANDREA [Fotografía], por Mathieu Lehanneur, 2011. Tomado de Mathieu Lehanneur (<http://www.mathieulehanneur.fr/project/andrea-90>).

El proyecto se desarrollará en base a cinco fases como se encuentra presentado en la Figura 3.

Figura 3.

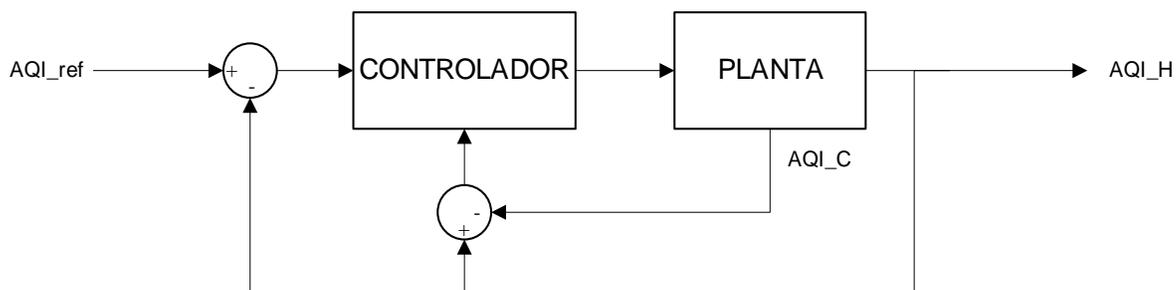
Diagrama de fases.



El diagrama de bloques del sistema de control se muestra en la Figura 4. En donde se puede observar que la variable a controlar es el Índice de Calidad de Aire de la habitación (AQI_H). Las entradas del sistema corresponden a los datos obtenidos por los sensores del índice de calidad de aire de la habitación y del interior de la cápsula, además de un valor de referencia (AQI_ref) aceptable dentro del rango del índice de calidad de aire quiteño (Tabla 1). Para el desarrollo se propone un controlador por reglas de decisión que actuará sobre la planta.

Figura 4.

Diagrama de bloques del sistema de control.



Las pruebas de funcionamiento del sistema se realizarán en dos ambientes: casas y oficinas. El protocolo de pruebas que se llevará a cabo consistirá en el análisis comparativo de sensores a partir del comportamiento de las plantas ante la exposición a químicos puros y sustancias mezcladas, como respiración humana y recolección de aire, en los ambientes antes mencionados.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Diseñar un sistema de control para la biodepuración de aire basado en el sensado químico de contaminantes orgánicos volátiles y monitoreo de condiciones ambientales para controlar la calidad de aire en espacios interiores.

1.4.2. Objetivos específicos

- Definir los principales VOC que afectan la calidad del aire y las principales plantas utilizadas en el proceso de biodepuración del aire.
- Diseñar un sistema de sensado químico para los principales contaminantes orgánicos volátiles y condiciones ambientales en espacios interiores.
- Cuantificar los niveles de concentración de VOC durante los procesos fisiológicos de las plantas seleccionadas en ambientes controlados.
- Integrar el sistema de control de biodepuración de aire basado en el sensado químico en ambientes interiores y en el estudio de la fisiología de las plantas.
- Comprobar el funcionamiento de biodepuración del aire en entornos reales.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos

2.1. Contaminación química del aire en ambientes interiores

El aire está constituido por una mezcla de varias sustancias como el oxígeno, nitrógeno y vapor de agua; pero además de esto, en él se alojan en menor porcentaje sustancias contaminantes como el dióxido de carbono, monóxido de carbono, metano, hidrógeno, helio, argón, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y ozono. La contaminación del aire es un término que se ha usado para describir la presencia de sustancias contaminantes en la atmósfera, los cuales pueden resultar potencialmente perjudiciales para la salud y el bienestar de los seres vivos. Las fuentes de contaminación se deben a causas naturales (emisiones volcánicas, polen de las flores, erosión eólica, etc.) o antropogénicas (industrias, fábricas, comercios, viviendas, etc.), siendo estas últimas las principales fuentes de generación y emisión de contaminantes (Korc, 1999; Matus C. & Lucero Ch., 2002; Michalos, 2014; Querol, 2008).

La calidad de aire en ambientes interiores o (IAQ del inglés *indoor air quality*), hace referencia al nivel de contaminación existente en ambientes cerrados, sean edificios, oficinas, escuelas, hospitales, viviendas, etc., con el fin de conocer el grado de comodidad de las personas y reducir el riesgo que puede representar la contaminación para la salud. Es importante conocer que la contaminación en ambientes interiores depende también de la composición de aire exterior, el diseño del sistema de ventilación o aire acondicionado, mobiliario, materiales de construcción, etc. (García Moreno, 2019; Piñol et al., 2013).

2.1.1. Contaminantes Orgánicos Volátiles (VOC)

Los compuestos orgánicos volátiles o (VOC del inglés *Volatile Organic Compounds*), son una clase importante de contaminantes del aire encontrados comúnmente en la atmósfera. El término VOC se refiere a aquellos compuestos orgánicos constituidos fundamentalmente por carbono, que están presentes en forma de gases, pero que en condiciones normales de temperatura y presión serían líquidos o sólidos (Hester & Harrison, 1995).

A pesar de que en la actualidad existe mayor concienciación sobre la presencia de los VOC y su influencia en las personas, es importante que se realicen más investigaciones enfocadas en la identificación, determinación y cuantificación de estos compuestos en ambientes interiores. La mayor parte de los estudios se han realizado en ciudades, en donde las mayores concentraciones de VOC están relacionadas con el tráfico y actividades industriales. Otros estudios se han enfocado en analizar los niveles de VOC a los que las personas están expuestas en espacios interiores, considerando que son peligrosos para el medio ambiente y perjudiciales para la salud humana (Chang et al., 2016; Sánchez Montero & Alcántara León, 2007).

Como se mencionó anteriormente, los compuestos orgánicos volátiles son el resultado de emisiones provenientes de diferentes fuentes; estas pueden ser biogénicas o antropogénicas. Una de las principales son las fuentes biogénicas, que consisten en compuestos orgánicos volátiles biogénicos que son emitidos naturalmente desde la superficie de la Tierra a la atmósfera. En esta categoría de compuestos se incluye a una amplia gama de especies orgánicas emitidas por la vegetación, los suelos y los océanos. Una subdivisión de las fuentes biogénicas son los biogénicos oxigenados (oxVOCs) que se definen como compuestos a base de carbono que contienen un átomo de oxígeno; estos incluyen a los alcoholes, cetonas, ésteres y éteres. En las especies dominantes de

los oxVOCs se incluye al metanol, etanol, metilbutenol (MBO), formaldehído, acetaldehído y acetona. Estas emisiones biogénicas son la fuente dominante de compuestos oxigenados en el ambiente, teniendo un impacto significativo en la química de la atmósfera (Hanks & Louglin, 2011; Koppmann, 2007).

Otro tipo de fuente de generación de compuestos orgánicos volátiles son las antropogénicas, relacionadas principalmente con el uso de combustibles fósiles, procesos industriales, producción de bienes de consumo, uso de solventes y productos relacionados. Estos compuestos son los responsables de alrededor del 55% del total de VOC producidos en actividades humanas, entre los que encontramos al benceno, cloroformo, cloruro de carbono (CCl_4), acetona, tolueno, propano y percloroetileno. Muchos de estos VOC, se han encontrado en aguas residuales de casas, pequeñas industrias y estaciones de servicio. Las principales fuentes de emisiones antropogénicas son las plantas de suministro de agua, pesticidas, pinturas, industrias metalúrgicas, entre otras (Hanks & Louglin, 2011).

Finalmente, los VOC se pueden generar en ambientes interiores a partir de materiales de construcción, decoración, productos de limpieza, humo de tabaco o leña, sistemas de renovación de aire, actividades domésticas y actividades en oficinas como el uso de ordenadores, impresoras y fotocopiadoras. Es importante indicar que el aire exterior y su contaminación influyen directamente en la calidad del aire en los ambientes interiores por lo que se considera como fuente importante de generación de VOC (Piñol et al., 2013). En la Tabla 2 se presenta un resumen de las fuentes de emisión de VOC más comunes encontradas en el aire en ambientes interiores.

Tabla 2.

Fuentes frecuentes de VOC en ambientes interiores.

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

Nota. Adaptado de Fuentes de COV más frecuentes en el aire interior de los edificios [Tabla], por Piñol et al., 2013. Tomado de Calidad de aire interior: compuestos orgánicos volátiles, olores y confort.

Como se ha mencionado previamente, muchas de las fuentes de emisión de VOC están presentes en lugares que son de uso cotidiano por las personas como oficinas, departamentos o aulas de clases. Por este motivo, el principal problema que afecta la calidad del aire en los ambientes interiores se lo denomina Síndrome del Edificio Enfermo. Este síndrome muestra un conjunto de síntomas que afectan la salud, confort y bienestar de las personas que habitan dichos ambientes dentro de un edificio (Daza Pérez et al., 2015; Schettler, 2006).

En 1982, la Organización Mundial de la Salud reconoció al Síndrome del Edificio Enfermo como una enfermedad, de la cual al momento se sabe poco a pesar de ser un padecimiento muy antiguo. Un edificio se caracteriza con este síndrome cuando la cantidad de personas afectadas del total de la comunidad que habita el edificio se encuentra entre el 10% y 30% y los síntomas afectan a un mínimo del 20% de los habitantes de este. Los síntomas más comunes que se presentan son enrojecimiento y dolor de ojos, dolor de cabeza, sequedad o enrojecimiento de la piel, congestión y hemorragia nasal, estornudos, sensación de ahogo, tos seca, náuseas, mareos o falta de concentración. Estos síntomas se pueden presentar mientras las personas permanecen en el lugar y se mantienen hasta varias horas después de que lo han abandonado (Daza Pérez et al., 2015; Ortiz Terán & Haro, 2015).

Las principales características comunes en este tipo de edificios son la presencia de un sistema de ventilación deficiente, elementos de construcción de mala calidad, gran cantidad de material textil en las superficies interiores del inmueble y falta de ventanas para circulación del aire. Un factor de riesgo muy importante es la presencia de compuestos químicos y agentes biológicos en el ambiente. Entre los contaminantes principales tenemos al dióxido de carbono, monóxido de carbono, aldehídos entre otros (Berenguer Subils et al., 1992).

2.1.2. Calidad de aire interior

En la actualidad, las personas permanecen entre el 80 y 90% de su tiempo en ambientes interiores privados como públicos, hogares, escuelas, oficinas, lugares de trabajo, gimnasios, vehículos de transporte, etc., exponiéndose a sustancias contaminantes que pueden representar un riesgo significativo para su salud y confort. El término Calidad de Aire Interior, permite determinar el nivel de contaminación existente en ambientes cerrados, principalmente por la presencia de compuestos orgánicos e

inorgánicos. La calidad del aire depende de diferentes factores como son los hábitos de las personas, el nivel socioeconómico, aglomeración de personas, la convivencia con animales domésticos, intercambio del aire al exterior, en general, por las condiciones físicas y ambientales (Cincinelli & Martellini, 2017).

La contaminación del aire interior es conocido como un asesino silencioso, especialmente en las zonas más pobres del mundo. La razón principal de esto se debe a la contaminación que generan las cocinas ineficientes y la poca ventilación por la quema de combustibles de biomasa como la madera, carbón, desechos de cultivos o abono. Estos contaminantes pueden penetrar hasta los órganos, especialmente a los pulmones por medio del sistema respiratorio, desarrollando importantes problemas en las vías respiratorias, enfermedades pulmonares obstructivas crónicas, cáncer u otro tipo de enfermedades (World Health Organization [WHO], 2010).

Las nuevas tendencias de construcción orientadas a mejorar la eficiencia energética han hecho que estos lugares sean cada vez más herméticos, lo que ha conllevado al empleo de materiales de construcción sintéticos, provocando que los ambientes alojen fácilmente contaminantes ambientales. Estudios han demostrado que los tableros de yeso que se utilizan al interior de edificios y casas emiten gran cantidad de contaminantes nocivos como acetona, nonanal y formaldehídos; demostrando que los materiales de construcción afectan directamente a la calidad del aire interior. Además de esto, la humedad interior en techo o paredes puede generar moho o albergar hongos, que en personas alérgicas pueden desencadenar picazón en ojos, nariz y garganta, cefaleas, y hasta ciertas enfermedades como asma, rinitis o bronquitis (Daza Pérez et al., 2015).

La Organización Mundial de la Salud es la encargada de emitir indicadores que permiten medir y controlar la calidad del aire, sin embargo, la misma organización establece que en cada país se deben considerar las normativas de calidad del aire de acuerdo con su realidad social y económica, con el fin de proteger la salud pública de las personas. Por esta razón fue establecido el Índice de la Calidad del Aire o (AQI del inglés *Air Quality Index*) como medida estandarizada para indicar el nivel de contaminación del aire ambiente producido por partículas y gases. En 1998, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA) establece el primer índice de calidad del aire, clasificando a los contaminantes ambientales de acuerdo a las concentraciones encontradas en el aire ambiente. A partir de esto, en cada país o región se empezaron a establecer normativas para la gestión y control de la calidad del aire (Kowalska et al., 2009).

En base a lo dicho, en el Ecuador se establece la Norma de Calidad del Aire Ambiente (NECA) como referencia nacional para evaluar la contaminación atmosférica. El objetivo principal de la NECA es preservar la salud de las personas, regular la calidad del aire y resguardar el bienestar del ambiente, definiendo los límites permisibles de contaminantes en el aire ambiente. En la atmósfera se pueden encontrar diversos tipos de sustancias contaminantes, sin embargo, la NECA considera a contaminantes comunes como: partículas sedimentables, material particulado menor a 10 micrones (PM_{10}) y 2,5 micrones ($PM_{2,5}$), dióxido de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO), ozono (O_3), dióxido de nitrógeno (NO_2), benceno, cadmio y mercurio inorgánico. En la Tabla 3, se muestran los límites permitidos de las concentraciones antes mencionadas, clasificadas según tres niveles: Alerta, Alarma y Emergencia (Secretaría del Ambiente, 2018).

Tabla 3.

Concentraciones de contaminantes comunes que definen los niveles de alerta, de alarma y de emergencia en la calidad del aire.

Contaminante y período de medición	Alerta	Alarma	Emergencia
Monóxido de Carbono			
Concentración promedio en ocho horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	15000	30000	40000
Oxidantes Fotoquímicos, expresados como ozono.			
Concentración promedio en ocho horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	200	400	600
Óxidos de Nitrógeno, como NO₂			
Concentración promedio en una hora ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1000	2000	3000
Dióxido de Azufre			
Concentración promedio en veinticuatro horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	200	1000	1800
Material Particulado PM₁₀			
Concentración en veinticuatro horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	250	400	500
Material Particulado PM_{2,5}			
Concentración en veinticuatro horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	150	250	350

Nota. Adaptado de Concentraciones de contaminantes criterio que definen los niveles de alerta, de alarma y de emergencia en la calidad del aire [Tabla], por Secretaria de Ambiente, 2011. Tomado de Norma Ecuatoriana de la Calidad del Aire (<http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/index.php/norma-ecuatoriana-de-la-calidad-del-aire>).

En el 2004, el Municipio del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) recibe la acreditación como Autoridad Ambiental de Aplicación Responsable (AAAr) otorgada por el Sistema Único de Manejo Ambiental, para la prevención, regulación y control de la contaminación ambiental. En Pichincha se cuenta con la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito (REMMAQ), a la que componen varias redes de monitoreo de la calidad del aire ambiente, cumpliendo con las recomendaciones que establece la EPA. Las medidas realizadas por estas estaciones son analizadas de acuerdo con el Índice

Quiteño de la Calidad del Aire (IQCA). El IQCA muestra los límites de las concentraciones en una escala numérica entre 0 y 500, clasificándolos en seis categorías de acuerdo con el nivel de contaminación ambiental como se muestra en la Tabla 1 (Secretaría del Ambiente, 2018).

Las normas ecuatorianas que regulan la calidad del aire ambiental, tienen enfoque únicamente para ambientes exteriores, por este motivo se toma como referencia a las guías de calidad del aire interior presentados por organizaciones o instituciones que regulan la calidad del aire en el mundo. En un documento presentado por el Servicio de Sanidad Ambiental de la Dirección General de Ordenación e Inspección de la Comunidad de Madrid, España, se describen los contaminantes ambientales más comunes encontrados en el aire interior, así como los niveles límites de exposición que deben tener las personas. En la Tabla 4, se muestra un resumen de los contaminantes ambientales del aire interior clasificados de acuerdo a normativas establecidas por la Organización Mundial de la Salud, la Agencia de Protección Ambiental (EPA), por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT) y la Norma Española UNE 171330-2 de Procedimientos de Inspección de calidad ambiental en interior (Morales et al., 2010).

Tabla 4.

Valores guía para contaminantes ambientales en interiores.

Compuesto	Normativa	Tiempo de exposición	Valor guía
Monóxido de carbono	INSHT	8 horas	29 (mg/m ³) (25 ppm)
		15 minutos	100 (mg/m ³) (87 ppm)
	OMS	30 minutos	60 (mg/m ³) (52 ppm)
		1 hora	30 (mg/m ³) (26 ppm)
		8 horas	10 (mg/m ³) (9 ppm)

Compuesto	Normativa	Tiempo de exposición	Valor guía
Monóxido de carbono	EPA	8 horas	10 (mg/m ³) (9 ppm)
		1 hora	40 (mg/m ³) (35 ppm)
Dióxido de carbono	INSHT	Calidad de aire interior alta	350 ppm
		Calidad de aire interior media	500 ppm
		Calidad de aire interior moderada	800 ppm
		Calidad de aire interior baja	1.200 ppm
Compuestos Orgánicos Volátiles			
Formaldehído	OMS	30 minutos	100 (ug/m ³)
Tolueno	OMS	7 días	260 (ug/m ³)
Estireno	OMS	7 días	260 (ug/m ³)
Tetracloroetileno	OMS	1 año	0,25 (mg/m ³)
Compuestos Orgánicos Volátiles Totales	UNE 171330-2	Rango de confort	< 200 (ug/m ³)
		Rango de exposición multifactorial	200 – 3.000 (ug/m ³)
		Rango de disconfort	3.000 – 25.000 (ug/m ³)
		Rango tóxico	> 25.000 (ug/m ³)

Nota. Adaptado de Plan de prevención y control de la calidad del aire interior [Tabla], por Morales, I., Acevedo,

V. y Nieto, A., 2010. Tomado de Calidad del Aire Interior en edificios de uso público.

2.1.3. Efectos de los VOC sobre la salud humana.

La gran cantidad de tiempo que las personas pasan dentro de los ambientes interiores, permite que estén en contacto directo con los diversos contaminantes orgánicos volátiles que se generan en interiores. A pesar de que muchas personas ya han aprendido a tolerar y convivir con dichos contaminantes, esto no implica que no exista una afectación a la salud humana. Los efectos pueden ir desde un nivel muy bajo como

pequeñas irritaciones o sensaciones olfativas que generan una molestia a corto plazo y llegar a efectos muy tóxicos como daños en órganos vitales, cáncer y problemas psicológicos que afectan a largo plazo (Piñol et al., 2013).

Los riesgos a la salud humana dependen del tipo de contaminante y la cantidad de tiempo de exposición a los mismos. Esta exposición puede ser al contacto directo con la piel, o por la ingestión o inhalación de los contaminantes. Existe evidencia de los efectos provocados por contaminantes volátiles cuyo contacto es por medio de la inhalación, mayormente en disolventes orgánicos como los ésteres, cetonas y frecuentemente el tetracloruro de carbono; a los cuales el cuerpo humano reacciona presentado un estado de ebriedad, somnolencia, vómito, convulsiones, provocando hasta la muerte. Contaminantes como el tiner y el benceno llegan a producir daños en el sistema nervioso central con énfasis en el tejido nervioso. Diversos casos clínicos han mostrado los daños que se generan en el cerebro por la exposición al tolueno, produciendo una atrofia cerebral y polineuropatía en los pacientes (Martínez et al., 2002; Sánchez Montero & Alcántara León, 2007).

Como se mencionó anteriormente, en algunos casos los efectos en la salud humana empiezan a aparecer cuando la persona está en exposición al químico por tiempos muy extensos, como es el caso de los alcoholes. A pesar de que este tipo de compuestos son llamados contaminantes verdes por sus características, el etanol, metanol, entre otros, pueden desarrollar a largo plazo diversas afectaciones en la salud como son irritación en los ojos, fatiga y dolor de cabeza. (Sánchez Montero & Alcántara León, 2007).

Se debe tener muy en cuenta los efectos que producen los contaminantes hidrocarburos aromáticos, dentro de los cuales se encuentran el benceno, tolueno o los aromáticos clorados. Estos contaminantes tienen un alto nivel de peligro debido a sus

características volátiles y su presencia en los materiales utilizados en actividades cotidianas, como son la combustión de la gasolina y el humo del tabaco, o también pueden ser emitidos por la pintura, plásticos, explosivos, productos farmacéuticos, alfombras, entre otros. Sus efectos pueden ir desde la irritación en los ojos, fatiga, dolor de cabeza y llegar a producir cáncer en el hígado o leucemia. (Sánchez Montero & Alcántara León, 2007).

Las cetonas son VOC del grupo de disolventes polares apróticos, cuyos efectos en la salud humana se relacionan con deficiencias respiratorias, ya que tienen la capacidad de inhibir la cadena respiratoria provocando daño en pulmones. Otros sistemas que se pueden ver afectados cuando la persona se expone a este químico es el Sistema Nervioso Central, Sistema Hepático o presentar problemas en la piel como dermatitis. (Sánchez Montero & Alcántara León, 2007).

El Monóxido de Carbono es un contaminante que puede ser encontrado comúnmente en los ambientes interiores y que es generado por el humo del tabaco o también por elementos propios de los hogares como calefones a gas, estufas, motores de gasolina, linternas, garajes y malos sistemas de ventilación. Sus efectos en la salud humana son diversos como la disminución de la capacidad motora de la persona, problemas en el Sistema Nervioso Central y Autónomo provocando irritabilidad, disminución de percepción auditiva, entre otros. La exposición durante tiempos muy elevados puede provocar hipoxia, que es la falta de oxigenación del cerebro lo que puede llevar a la muerte (Oyarzún, 2010).

El CO₂, también llamado dióxido de carbono, es un contaminante originado en la respiración humana y animal. En ambientes interiores puede ser generado también por fuentes como calefactores de gas o por el humo del tabaco. Este contaminante puede

generar hipoxemia además de hiperventilación, aumento de temperatura, sudoración y falta de concentración (Oyarzún, 2010).

2.2. Sistemas de sensado químico para calidad de aire

Con el objetivo de controlar el impacto ambiental producido por las emisiones contaminantes que conlleva en una problemática ambiental a nivel mundial, se ha buscado el desarrollo de herramientas tecnológicas que ayuden a monitorear, evaluar y de esta forma mitigar los efectos producidos por la contaminación. En el diseño de sistemas de monitoreo y control, los sensores tienen un papel importante ya que a partir de los datos obtenidos se pueden determinar los diferentes problemas de contaminación. Los sensores químicos son utilizados en estos sistemas para detectar contaminantes orgánicos volátiles y de esta manera evaluar las condiciones de ambientes interiores como exteriores (Escalona et al., 2012).

2.2.1. Sensores químicos.

Un sensor químico es aquel dispositivo que transforma una señal química o bioquímica, que puede estar en estado gaseoso o estado líquido, y transformarlo a una señal física que se pueda medir. La clasificación de los sensores químicos está dada por el tipo de transducción de la señal, en esta clasificación se encuentran los sensores químicos piezoeléctricos cuyo principio de funcionamiento es la obtención de un potencial eléctrico a partir de la deformación del material piezoeléctrico (Cortés et al., 2006; Parra García, 2008; Santamaría Alonso, 2010).

Otro tipo de sensores químicos son los sensores electroquímicos que tienen como principio de funcionamiento la transferencia de electrones por un medio electrolítico, generando una señal eléctrica como resultado de la interacción del químico con el electrodo. Los sensores electroquímicos están divididos en potenciométricos, conductimétricos y amperimétricos. Los sensores electroquímicos conductimétricos,

dentro de los cuales se encuentran los sensores químicos de óxido metálico, basan su funcionamiento en la conductividad eléctrica de un material debido a la variación que sufre al interactuar con el químico. En su estructura no es necesario la presencia de un electrodo de referencia por lo que son dispositivos de tamaño pequeño y de bajo costo. Entre sus aplicaciones se encuentran los sensores de gas, sensores de impedancia de NO_2 , detección de olores y humo de tabaco, sensores de humedad a partir de la conductividad del óxido mixto, medición de CO_2 y alcohol etílico (De Paz Menéndez, 2015; Parra García, 2008; Stradiotto et al., 2003).

Como parte de la clasificación de los sensores químicos se encuentran los sensores ópticos cuyo funcionamiento se basa en la medición de la absorción o emisión de luz como respuesta a una reacción química. Los principios ópticos aplicados por estos sensores son reflectancia, absorbancia, fluorescencia, luminiscencia, siendo los dos primeros principios los más utilizados en la medición de señales. Entre las aplicaciones del sensor óptico en la detección de gases y compuestos orgánicos volátiles se puede indicar la detección de O_2 , CH_4 y CO_2 , y la medición de concentración de CO_2 y H_2O (Escalona et al., 2012; Juárez Díaz, 2016; Santamaría Alonso, 2010).

2.2.2. Sensores químicos para calidad de aire usados en la actualidad

El monitoreo y control de la calidad del aire ambiental se ha venido desarrollando en los últimos años con el fin de implementar estrategias que sean útiles para reducir los niveles de contaminación y generar conciencia ambiental en la población. Históricamente, el control de la calidad del aire se lo ha realizado utilizando estaciones de monitoreo estáticas que han sido equipadas con instrumentos certificados para medir contaminantes como: monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno (NO_x), ozono y material particulado (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$). Sin embargo, estos equipos además de ser relativamente grandes, pesados y caros, también están sujetos a estrictos procesos de

mantenimiento y calibración para garantizar los datos obtenidos. Por esta razón, en las grandes ciudades se han venido utilizando redes de monitoreo ambiental remotas como complemento a las estaciones de monitoreo ambiental (Castell et al., 2017; Penza et al., 2014).

En la actualidad, se ha desarrollado una tendencia en todo el mundo para incrementar la recopilación de datos de calidad del aire, más allá de las estaciones de monitoreo de referencia. Varios proyectos han mostrado la posibilidad de desarrollar diferentes sistemas de monitoreo de calidad del aire basados en sensores precisos y de bajo costo, como también de sensores no específicos que proporcionan características mejoradas. Los sensores de bajo costo, al igual que sensores no específicos, pueden integrarse en nodos de sensores que forman parte de redes de sensado fijas o móviles (Castell et al., 2017; Lozano et al., 2019; Penza et al., 2014).

La mayoría de los sensores de bajo costo que se han desarrollado en los últimos años están permitiendo la creación de nuevas herramientas para el monitoreo de la calidad del aire. Muchos de estos sensores son usados con plataformas de uso libre como Arduino. Los estudios realizados con sensores de bajo costo muestran relaciones con sensores previamente calibrados, asegurando así, que se podría calibrar menos sensores e incluirlos en redes de monitoreo mucho más grandes. Sin embargo, el alto consumo de energía y gran empaque hacen que no sean los más adecuados para el futuro, por lo que se ha empezado a utilizar la tecnología de los sistemas microelectromecánicos (SMEM) para integrar diferentes sensores en un solo chip compacto (Park et al., 2015; Piedrahita et al., 2014).

2.3. Importancia de las plantas en el proceso de limpieza del aire

Durante muchos años los humanos han tenido una relación cercana con la naturaleza, por lo que la integración de plantas en casas, edificios o espacios cerrados

se ha convertido en una tendencia que representa el compromiso de las personas con el medio ambiente, y una forma de mejorar su calidad de vida. Se ha demostrado que las plantas en ambientes interiores tienen efectos psicológicos directos sobre las personas, aumentando su rendimiento en diversas tareas, mejorando su salud y reduciendo los niveles de estrés. A la vez, se han realizado diversos estudios que muestran que las plantas en ambientes interiores pueden actuar como purificadores de aire, debido a que son una forma natural de sintetizar los contaminantes ambientales (Deng & Deng, 2018).

2.3.1. Fisiología de las plantas.

El estudio de la fisiología de las plantas busca comprender de mejor manera el proceso de crecimiento y desarrollo de estas, además de su relación con los factores del medio. Se constituye como parte de las ciencias biológicas enfocada a estudiar el funcionamiento de las plantas, su capacidad para sintetizar moléculas orgánicas utilizando la luz solar, sus procesos de reproducción y adaptación al medio ambiente, su ciclo biológico, entre otros. Entre los aspectos importantes de la fisiología vegetal se encuentran las relaciones hídricas que muestra el proceso de transporte de agua en la planta desde su absorción hasta su expulsión. La nutrición mineral estudia la función que cumplen los macronutrientes y micronutrientes necesarios para el proceso de crecimiento y reproducción de las plantas (Kirkby & Römheld, 2007; Ortuño Tomás et al., 2015; Sandoval, 2017).

El proceso que caracteriza al reino vegetal y que lo distingue de los demás reinos es la fotosíntesis, que consiste en la absorción y conversión de energía lumínica en potencial químico a partir de la síntesis de compuestos orgánicos. La importancia de este proceso radica en la producción de alimento y de O_2 . La respiración a su vez corresponde al proceso bioquímico en el que los compuestos orgánicos obtenidos en la fotosíntesis son oxidados dando lugar a CO_2 y H_2O . Existen factores externos e internos a las plantas

que regulan la actividad respiratoria y fotosintética de las mismas, entre los que se mencionan la temperatura, luz, estrés hídrico, heridas o composición del aire (Bidwell, 1993; Ortuño Tomás et al., 2015).

En el ecosistema terrestre, las plantas son muy importantes para el ser humano, ya que, al ser productores primarios, todos los alimentos provienen directa o indirectamente de ellas. Representan también la fuente principal de oxígeno para la respiración humana y animal, y un sistema natural de depuración de aire a partir de los procesos fisiológicos propios de las plantas (Ortuño Tomás et al., 2015).

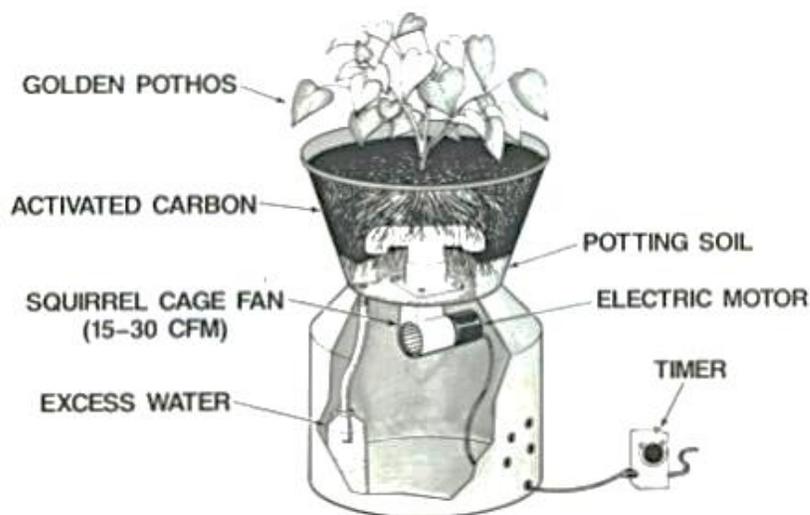
2.3.2. Estudios de plantas como biodepuradores

El término biodepuración es utilizado para describir los procesos fisiológicos de las plantas y organismos para la reducción de concentraciones de contaminantes ambientales. Depende netamente de procesos naturales para la limpieza y prevención de la contaminación del aire, utilizando técnicas más tradicionales, no invasivas y de bajo costo (Pedraza Ortiz, 2013; Pilon-Smits & Freeman, 2006).

El Dr. Bill Wolverton, científico ambiental de la NASA, fue uno de los primeros en investigar las capacidades que tiene el medio ambiente para limpiarse. Sus primeras investigaciones se centraron en determinar el uso de plantas para limpiar aguas residuales, sin embargo, posteriormente su estudio tomó un enfoque en el uso de plantas para mejorar la calidad del aire en interiores. Varios estudios por parte de científicos de la NASA conllevaron al primer diseño de un filtro de aire que combinó el uso de plantas y de carbón activo, para reducir los niveles de contaminantes ambientales, como se puede observar en la Figura 5 (NASA, 2007; Bill Wolverton et al., 1989).

Figura 5.

Primer filtro de aire con plantas ornamentales.



Nota. Adaptado de Indoor air purification system combining houseplants and activated carbon (p. 3), por Wolverton, B., Johnson, A. & Bounds, K., 1989. Tomado de Interior landscape plants for indoor air pollution abatement.

El diseño presentado se basa en el movimiento de grandes volúmenes de aire contaminado a través de las raíces de la planta y del carbón activado, con el fin absorber los contaminantes del aire, virus y bacterias. Para las pruebas de este sistema, se utilizaron varias plantas ornamentales recomendadas por el Área de Libre Comercio de las Américas. Una vez acondicionadas las plantas en ambientes herméticos, se introdujeron dosis de químicos comúnmente encontrados dentro de casas y oficinas. Se llevaron a cabo dos periodos de pruebas con altas y bajas dosis de contaminantes, en donde se empezaron a determinar que plantas sintetizan de mejor forma los químicos. Los estudios de las plantas de interior continuaron, por lo que en la NASA se construyó el laboratorio ambiental llamado *Biohome*, que permitió demostrar que las plantas reducían los niveles de VOC que existían en un inicio en el ambiente interior. De esta forma la NASA, con el Dr. Wolverton buscaron promover en la sociedad el valor que tienen

las plantas de interior para mejorar la calidad del aire (Stutte & Kennedy, 2002; Bill Wolverton et al., 1989).

En 1990, el Dr. Wolverton se retiró de la NASA y decidió comenzar con su pequeña empresa, Wolverton Environmental Services. Desde ahí continuó con la investigación de cómo utilizar a las plantas de interior para purificar el aire. A finales de 1990, el Dr. Wolverton realizó la publicación del texto “*Cómo cultivar aire fresco*”, en el que muestra una lista de 50 plantas identificadas para mejorar la calidad de aire. La calificación que se realizó a las plantas fue basada en cuatro criterios: eliminación de vapores químicos, facilidad de crecimiento y mantenimiento, resistencia a la infestación de insectos y tasa de transpiración. De acuerdo con estos criterios, se definieron a 12 plantas como las mejores calificadas: Areca palm (*Dypsis lutescens*), Lady palm (*Rhapis excelsa*), Bamboo palm (*Chamaedorea seifrizii*), Rubber plant (*Ficus robusta*), Dracaena Janet (*Dracaena deremensis* ‘Janet Craig’), English ivy (*Hedera hélix*), Dwarf Date Palm (*Phoenix roebelenii*), Ficus alii (*Ficus binnendijkii* ‘Alii’), Boston fern (*Nephrolepis exaltata* ‘Bostoniensis’), Peace Lily (*Spathiphyllum* sp.), Corn plant (*Dracaena fragrans* ‘Massangeana’) y Golden pothos (*Epipremnum aureum*) (Stutte & Kennedy, 2002; B. C. Wolverton, 1996; Wolverton Environmental Services, 2018a).

De las investigaciones realizadas se pudo determinar que cada una de las plantas tiene su propio código genético, que les permite cultivar microbios necesarios para la biodegradación de los diferentes químicos que son contaminantes del aire en interiores. Si bien la investigación se ha realizado desde 1989, con el pasar de los años estos resultados únicamente se han ido completando y precisando hasta la actualidad. En el 2017, se presentó una infografía que muestra a 18 plantas de las estudiadas por la NASA y qué químicos son mejor sintetizados por cada una de ellas. En la Tabla 5, se muestran

cinco de las plantas mejor calificadas para la depuración del aire (Love The Garden, 2017; Bc Wolverton & Wolverton, 1996).

Tabla 5.

Plantas de interior que filtran el aire.

Nombre de las plantas		Tricloro etileno	Formalde hído	Benceno	Xileno	Amonio
Florist's chrysanthem um	<i>Chrysanthemu m morifolium</i>	X	X	X	X	X
Peace Lily	<i>Spathiphyllum 'Mauna Loa'</i>	X	X	X	X	X
Red-edged dracaena	<i>Dracaena marginata</i>	X	X	X	X	
Varigated snake plant	<i>Sansevieria trifasciata 'Laurentii'</i>	X	X	X	X	
English ivy	<i>Hedera hélix</i>	X	X	X	X	

Nota. Adaptado de Air-Filtering Plants [Tabla], de Love the garden, 2017. Tomado de NASA guide to air-filtering houseplants (<https://www.lovethegarden.com/uk-en/article/nasa-guide-air-filtering-houseplants>).

2.4. Sistema de depuración del aire

El proceso de eliminar o atenuar la cantidad de polvo y partículas presentes en el aire se lo conoce como depuración de aire. El sistema más común de depuración de aire es la ventilación, cuyo proceso puede ser de forma general o por extracción localizada. La ventilación general también llamada dilución, consiste en mantener el aire de los trabajos en un nivel óptimo para el ser humano con el fin de tener una buena condición de trabajo. Tiene un bajo valor económico, pero no es eficiente en la eliminación de

riesgos higiénicos. Este tipo de ventilación puede ser de forma natural a partir del movimiento del aire en el interior de la instalación o ventilación en forma mecánica en la que el control de humo y polvo se vuelve difícil. Estos tipos de ventilación son usados de manera especial como métodos de limpieza cuando el nivel de contaminación está próximo al valor límite ambiental de referencia (Fierro González, 2004).

2.4.1. Sistemas de depuración domésticos

Con el objetivo de mejorar la calidad del aire en ambientes interiores como oficinas, departamentos, aulas, se han desarrollado dispositivos comerciales para depuración de aire, también llamados purificadores de aire. En el mercado se puede encontrar gran diversidad de dispositivos y empresas que los fabrican, entre las que sobresalen Phillips, Blueair, Bionaire, Trotec, entre otras. Los dispositivos de purificación basan su funcionamiento principalmente en la ventilación del aire interior, además de la utilización de diferentes filtros para completar el proceso de depuración del aire.

Philips con su dispositivo de purificación de aire AC4072/11 (Philips, 2019) es uno de los dispositivos con más alto valor económico en el mercado que utiliza un ventilador de cinco velocidades, filtros de carbono activado y tecnología HEPA que son los filtros con alta eficiencia para el control de partículas de aire. Blueair presenta el purificador Classic 203 (Blueair, 2020) cuya característica principal es su bajo nivel sonoro, el dispositivo cuenta con un ventilador con únicamente tres velocidades, un indicador de cambio de filtro y es recomendado para habitaciones de 22m².

El purificador BAPI700 de la empresa Bionaire (Bionaire, 2020) destaca de los demás dispositivos ya que tiene un bajo valor económico en el mercado, elimina partículas de polvo, polen y humo, descamaciones de mascotas y esporas de moho. La empresa Trotec con su dispositivo AirgoClean 205S (Trotec, 2020) es recomendado para habitaciones grandes de 70m². Tiene tecnología de filtros de carbono activado y filtros

HEPA, además cuenta con un ventilador de tres velocidades e indicadores de calidad del aire y de cambio de filtro.

2.4.2. Sistemas de biodepuración

Como se había mencionado antes, la biodepuración del aire es un área perteneciente al campo de la fitorremediación en donde se utilizan plantas y microorganismos para eliminar, reducir o degradar los contaminantes del aire. Los sistemas de biodepuración se han ido desarrollando en los últimos años con el fin de mejorar la calidad del aire y las condiciones de vida de las personas (Pedraza Ortiz, 2013; Pilon-Smits & Freeman, 2006).

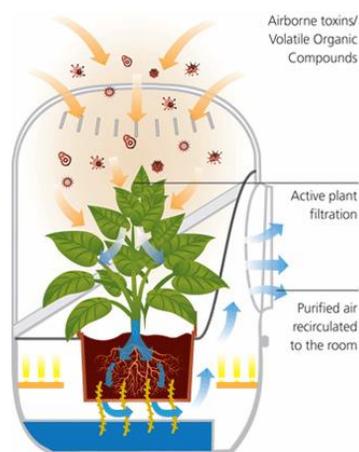
Wolverton Environmental Services junto a la empresa americana Health Equipment Company, desarrollaron el sistema conocido como *Plant Air Purifier*, siguiendo el mismo concepto del sistema desarrollado en la NASA, pero con estructura mejorada. Se buscó mejorar los ventiladores y los filtros usados en el primer dispositivo, debido a que en la mayoría de los casos no se realizaba un mantenimiento adecuado por lo que el carbón activado terminaba saturado de contaminantes, volviendo al sistema ineficaz. El nuevo sistema fue modificado volviéndolo bioregenerativo o en otras palabras autolimpiante, de esta forma no existen filtros que reemplazar en el sistema (Wolverton Environmental Services, 2018b).

A finales del 2009, el diseñador francés Mathieu Lehanneur y el profesor de Harvard David Edwards, sacaron a la venta un sistema de filtración de aire que utiliza plantas para purificar los ambientes interiores. Originalmente establecido como Bel-Air, su nombre comercial se conoció en octubre de ese año como 'Andrea' (Chin, 2009). Andrea es un filtro vivo que absorbe los contaminantes tóxicos del aire que son emitidos por los diferentes objetos que se encuentran en ambientes interiores. El sistema aspira el aire de la habitación, posteriormente las plantas absorben los compuestos tóxicos a

través de sus hojas y raíces, hasta que finalmente el aire limpio es recirculado al exterior, como se muestra en la Figura 6 (Mathieu Lehanneur, 2011).

Figura 6.

Diagrama de funcionamiento técnico del purificador de aire 'Andrea'.



Nota. Adaptado de Technical diagram of how 'andrea' Works, por Andrea Chin, 2009. Tomado de Designboom Architecture & Design Magazine (<https://www.designboom.com/design/mathieu-lehanneur-andrea-air-purifier-now-available/>).

Un tipo diferente de sistema de depuración de aire desarrollado en la empresa Takenaka Garden Afforestation Inc. fue denominado Ecology Garden, como una nueva idea de jardines al interior. Esta idea fue consolidada por el Dr. Wolverton quien trabajó como consultor varios años en la empresa. El sistema Ecology Garden se conforma de sus Eco-plants, plantas que fueron tomadas del estudio realizado por la NASA, y Eco-do un suelo especial que contiene carbón activado que permite maximizar las capacidades de depuración de las plantas. Estos jardines ecológicos se han implementado en instalaciones públicas, privadas, áreas de espera de hospitales, etc., con el fin de brindar tranquilidad a las personas además de purificar el aire (ver Figura 7). Otras de las alternativas presentadas son las galerías verdes (Green Gallery), en las que se utilizan plantas para convertir espacios en galerías y las paredes verdes (Green Walls) creadas

como galerías cultivadas en edificios, mejorando así los espacios urbanos (ver Figura 8) (Takenaka, 2016).

Figura 7.

Ecology Garden en el Hospital Universitario Showa.



Nota. Adaptado de Showa University Hospital [Fotografía], por Wolverton Environmental Services, 2018. Tomado de Ecology Gardens (<http://www.wolvertonenvironmental.com/ecologygardens.html>).

Figura 8.

Galería verde.

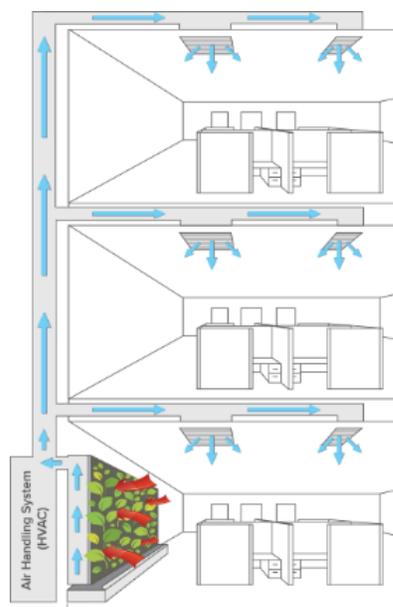


Nota. Adaptado de The Green Gallery [Fotografía], por Takenaka Garden Afforestation Inc., 2016. Tomado de Green Gallery (<http://www.takenakateien.co.jp/english/ecologygarden.html>).

Siguiendo este mismo concepto, en la empresa Nedlaw Living Walls, se diseñan y construyen paredes verdes en las que combinan tres tecnologías de filtrado biológico: biofiltración, fitorremediación e hidroponía. Este sistema fue diseñado específicamente para tratar los problemas de calidad del aire que se generan en interiores. A diferencia de otros muros verdes, en Nedlaw se construyen biofiltros que permiten que la raíz de las plantas crezca libremente. El diseño permite el flujo de aire óptimo a través de las raíces, dejando que los microbios se encarguen de eliminar los contaminantes del aire. Los proyectos diseñados han sido implementados en casas, escuelas, oficinas, hospitales, y edificios. En la Figura 9, se observa uno de los biofiltros de Nedlaw con sistema de HVAC implementado en edificios (Nedlaw Group, 2018).

Figura 9.

Biofiltros de Nedlaw usados en sistemas HVAC de edificios.

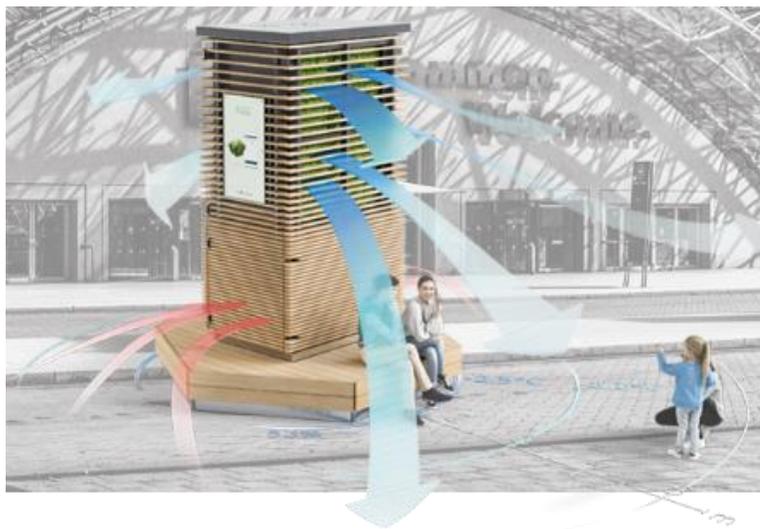


Nota. Adaptado de Air Handling Fully Integrated, de Nedlaw Group, 2018. Tomado de Nedlaw Living Wall Biofilters (<http://nedlawlivingwalls.com/services-air-handling/>).

Por su parte, la compañía de tecnología verde Green City Solutions, construyó un prototipo de filtro biotecnológico de aire, conocido como CityTree (ver Figura 10). El diseño de este sistema se basa en el uso de musgo que, junto a las toxinas ambientales producen oxígeno, mejorando la calidad del aire. El suministro de agua se lo realiza automáticamente, además, la capacidad de almacenaje de humedad de los musgos genera un efecto de frescura o enfriamiento del ambiente. Todos los sensores que se encuentran instalados se cargan directamente a la nube, mientras que en el software AirCare se puede visualizar los datos registrados de cada CityTree (Green City Solutions, 2018).

Figura 10.

CityTree creado por Green City Solutions.



Nota. Adaptado de CityTree, de Green City Solutions, 2020, (<https://greencitysolutions.de/en/>).

Capítulo 3

Sistema de sensado químico

3.1. Introducción

El sistema de sensado químico como base del sistema de biodepuración, permite realizar un análisis cuantitativo de las concentraciones de diferentes gases contaminantes. De la obtención de las concentraciones de los gases se desarrolla el sistema de control basado en la relación de contaminación interna y externa del biodepurador. Adicional, en base a este sistema se realiza un estudio de la fisiología de las plantas basado principalmente en el consumo de los gases nocivos encontrados en ambientes interiores.

De acuerdo con la bibliografía revisada, se decidió trabajar con sensores químicos de óxido metálico y sensores ópticos. Estos sensores, por su construcción y principio de funcionamiento, tienen un alto rendimiento en la detección de químicos y contaminantes, además de ser de bajo costo y de tamaño pequeño. Por esto, son utilizados de manera frecuente en estudios del análisis y monitoreo de la calidad del aire.

En este capítulo se presentan las consideraciones y criterios de diseño para la construcción del sistema de sensado químico. Además, se describe la metodología usada para la calibración de los sensores escogidos y el análisis de los resultados obtenidos como respuesta a los diferentes químicos.

3.2. Selección de los sensores químicos

De acuerdo con la bibliografía revisada en el capítulo anterior, de los principales contaminantes que afectan la calidad del aire en ambientes interiores se seleccionaron para este estudio al CO, CO₂, etanol, acetona y tolueno. En relación con los químicos

escogidos, se analizaron las características técnicas de diferentes tipos de sensores utilizados para la estimación de las concentraciones de los contaminantes y en general para la determinación de la calidad del aire. En el análisis bibliográfico se observa que los sensores de óxido metálico y sensores ópticos son los más comúnmente usados para el desarrollo de sistemas de estimación y monitoreo de concentraciones de gases en interiores, por su simplicidad y bajo costo.

Se analizó la familia de sensores MQ de la empresa Hanwei Electronics, estos sensores no son específicos para un solo químico, sino que responden con diferentes sensibilidades a las concentraciones de los contaminantes seleccionados. Se seleccionó el sensor MQ-3 que es recomendado para la detección de etanol (Hanwei Electronics CO. LTD, 2013a). Con relación al monóxido de carbono, se escogieron los sensores MQ-7 (A. Ibrahim et al., 2018) y MQ-9, los mismos que presentan una alta sensibilidad a este gas. El MQ-135 está diseñado para la detección de la calidad de aire, de acuerdo con su hoja de datos presenta una alta sensibilidad frente a químicos como: acetona, tolueno, alcohol, CO, CO₂ y amoníaco (Hanwei Electronics CO. LTD, 2009). El sensor MQ-4 que tiene una alta sensibilidad al metano (Hanwei Electronics CO. LTD, 2013b), y el sensor MQ-8 que presenta una alta sensibilidad al hidrógeno (Hanwei Electronics CO. LTD, 2015), fueron seleccionados con el fin de observar su respuesta frente a los químicos escogidos a pesar de no ser especializados en alguno de ellos.

Para el estudio y la detección de la calidad de aire se escogió el sensor especializado CCS811 de la empresa AMS implementado en la placa de evaluación de Adafruit, el cual presenta una respuesta en función a las concentraciones del total de compuestos orgánicos volátiles (TVOC), además de un valor equivalente de CO₂ (eCO₂). Mientras que para la detección de las concentraciones de CO₂ se escogió el sensor óptico

especializado SCD30 de SENSIRION por su alto rango de detección (Sensirion Staff, 2019).

3.2.1. Sensores de óxido metálico

El principio de funcionamiento de los sensores de óxido metálico se basa en la obtención de su respuesta a partir de la variación de una resistencia eléctrica. Estos sensores están compuestos por una superficie de óxido metálico comúnmente hecha de dióxido de estaño, aunque también pueden ser óxido de indio u óxido de tungsteno. La superficie del sensor, al estar en contacto con el químico reacciona de manera que su resistencia eléctrica disminuye. Los sensores de óxido metálico generalmente son sensores no especializados para un solo químico o gas, ya que de acuerdo con sus características técnicas su sensibilidad y rango de detección varía en función de diferentes químicos. La sensibilidad de los sensores de óxido metálico es dependiente de la temperatura ambiente en la que se encuentre, debido a esto, una de las técnicas utilizadas en los sensores de dióxido de estaño es incluir un filamento por el que pasa corriente eléctrica con el objetivo de mantener la temperatura constante en el sensor (Castañeda, 2018).

La familia de sensores MQ tienen características similares entre ellos ya que son sensores semiconductores de dióxido de estaño con una respuesta resistiva y una alimentación de 5 V. En su interior, se encuentra un filamento para calentar el sensor, por lo que su temperatura suele ser elevada cuando está en funcionamiento. En el mercado se los puede obtener junto con una tarjeta de evaluación prefabricada, en la que se encuentra la instrumentación del sensor para obtener su respuesta en función de voltaje de manera analógica o digital (Delgado Castro & Rojas Bolaños, 2015). En la Tabla 6 se muestran las características técnicas individuales de los sensores MQ escogidos.

Tabla 6.

Sensores químicos de la familia MQ.

Características	MQ-3	MQ-4	MQ-7	MQ-8	MQ-9	MQ-135
Rango de detección típico	0.05 mg/L – 10mg/L Alcohol	200 - 10000 ppm CH4	20 – 2000 ppm CO	100 – 10000 ppm H2	10 – 10000 ppm CO	10 – 1000 ppm Benceno 10ppm- 300ppm Alcohol 10ppm- 300ppm NH3
Resistencia de carga	200k	20k	Ajustable	10k	Ajustable	Ajustable
Consumo de potencia en el calentamiento	≤750 mW	≤750 mW	350 mW aprox,	≤800 mW	≤350 mW	≤800 mW
Resistencia del sensor	1M – 8M	10k – 60k	2 – 20k	10k – 60k	2k – 20k	30k – 200k
Condiciones de prueba	20 ±2°C, 65±5% de R.H					
Condiciones del circuito	VC=5.0 ±0.1V DC, VH=5.0±0 .1 V DC					
Tiempo de acondicionamiento antes de la prueba	Mayor a 24 horas	Mayor a 24 horas	Mayor a 48 horas	Mayor a 24 horas	Mayor a 48 horas	Mayor a 24 horas

El sensor CCS811, es también un sensor químico de óxido metálico adecuado para la detección compuestos orgánicos volátiles (VOC) como alcoholes, aldehídos, cetonas, ácidos orgánicos, aminas, hidrocarburos alifáticos y aromáticos; además del monitoreo de calidad del aire. Permite medir la concentración de eCO₂ y la concentración de TVOC a partir de su sensor de MOX. Entrega su respuesta al microcontrolador por medio de la tecnología I2C. El rango de medición de eCO₂ está entre los 400 a 8192 partes por millón (ppm) y el rango de medición del TVOC está entre 0 a 1187 partes por billón (ppb) (Adafruit, 2017; ams AG, 2012).

3.2.2. Sensor óptico

Los sensores ópticos aplicados para la detección de químicos se clasifican de acuerdo al rango de luz utilizado para la detección de los gases, como son: la luz ultravioleta, luz visible y luz infrarroja. Dentro de los sensores ópticos de luz infrarroja se encuentran los de tipo NIR que son analizadores cercanos de infrarrojo y los del tipo NDIR o sensores de infrarrojo no dispersivos. Estos sensores basan su funcionamiento en el estudio de la espectroscopía obteniendo su respuesta en función de la absorción de la energía de la luz infrarroja en las moléculas de gas. Los sensores NDIR son específicos para un gas determinado ya que se puede establecer la longitud de onda del gas para así detectar su “huella digital” y distinguirlo del resto de los gases a pesar de que se encuentren en una mezcla (Mondragón Cortez, 2017).

Por lo mencionado anteriormente, el sensor óptico seleccionado para el estudio del CO₂ es el SCD30 de la empresa Sensirion. Este sensor infrarrojo es de tipo NDIR y su respuesta está dada en partes por millón de CO₂, además de la medición de humedad y temperatura del ambiente. El sensor se encuentra ubicado en una placa desarrollada por el fabricante junto con un microcontrolador que sirve para que los datos se envíen por medio del puerto I2C. (Sensirion Staff, 2019). En la Tabla 7 se describen las principales características de operación del sensor.

Tabla 7.

Especificaciones técnicas del sensor SCD30.

Características / Modelo	SCD30
Tensión de alimentación	3.3 - 5.5 V
Corriente promedio	19 mA
Corriente máxima	75 mA

Características / Modelo	SCD30
Detección	CO₂
Rango de medición	0 – 40'000 ppm
Exactitud	± (30 ppm + 3% MV) (25 ° C, 400 - 10'000 ppm)
Repetibilidad	10 ppm
Temperatura estabilidad	0 ... 50 °C
Tiempo de respuesta	20 s (T 63%)
Precisión a lo largo del tiempo	400 ppm - 10'000 ppm
Detección	Humedad
Rango medido de humedad relativa	0 – 100% HR
Precisión	± 3% HR (0-100% HR)
Repetibilidad	0.1% HR
Tiempo de respuesta	8 s (T 63%)
Detección	Temperatura
Rango medición	-40 ° C - 70 ° C
Precisión	± (0.4 ° C + 0.023 x (T [° C] - 25 ° C))
Repetibilidad	0.1 °C
Tiempo de respuesta	> 10 s (T 63%)

Nota. Adaptado de Sensor Module Specifications [Tabla], de Sensirion Staff, 2019. Tomado de Technical Sheet CO2 Sensors (<https://www.sensirion.com/en/environmental-sensors/carbon-dioxide-sensors/carbon-dioxide-sensors-co2/>).

3.3. Diseño del Sistema de sensado químico

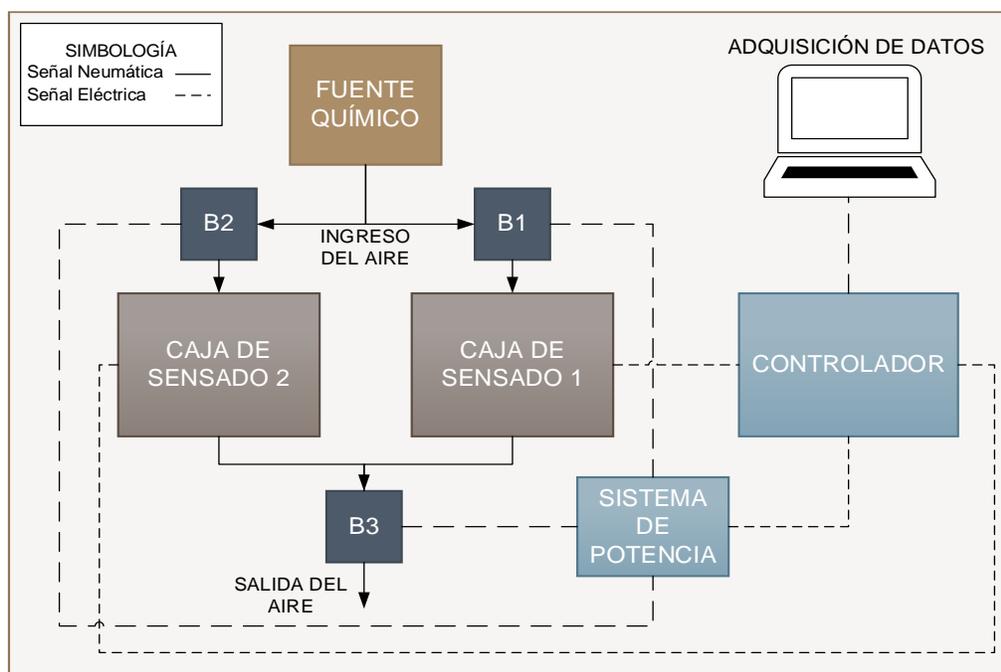
El sistema de sensado químico fue diseñado y construido de acuerdo a varias consideraciones tales como: la necesidad de posicionar los sensores de forma correcta asegurando la interacción con los gases contaminantes, la reducción de la influencia del ambiente exterior y la eliminación de fugas desde el interior en las cajas de sensado, el

consumo de energía en el sistema de sensado y en el sistema de potencia, la circulación y limpieza del aire en el sistema de sensado.

El sistema se conforma de una fuente para el ingreso del químico, dos cajas de acero inoxidable herméticamente cerradas para asegurar las condiciones de concentración del gas en donde se encuentran los sensores, un sistema neumático compuesto de las bombas B1 y B2 que permiten el flujo de aire al ingreso y distribución del químico a las cajas de sensado y la bomba B3 para la limpieza de las cajas. Además, cuenta con un sistema de potencia para la alimentación de las bombas y un sistema de control y adquisición de datos encargado del accionamiento automático del proceso y del registro de la información obtenida por los sensores (ver Figura 11).

Figura 11.

Diagrama esquemático del sistema de sensado químico.



3.3.1. Sistema de sensado

Una vez seleccionados los sensores para la detección de los diferentes químicos, se diseñaron dos matrices de sensores idénticas las cuales se utilizarán para la detección de los contaminantes al interior y exterior del sistema de biodepuración. Las matrices de sensores se ubicaron dentro de dos cajas de acero inoxidable, herméticamente cerradas de 5x7x19 cm de dimensión. Estas cajas cuentan con una entrada de aire para el ingreso del químico al interior del sistema, y una salida para la expulsión del aire de las cajas como se muestra en la Figura 12.

Figura 12.

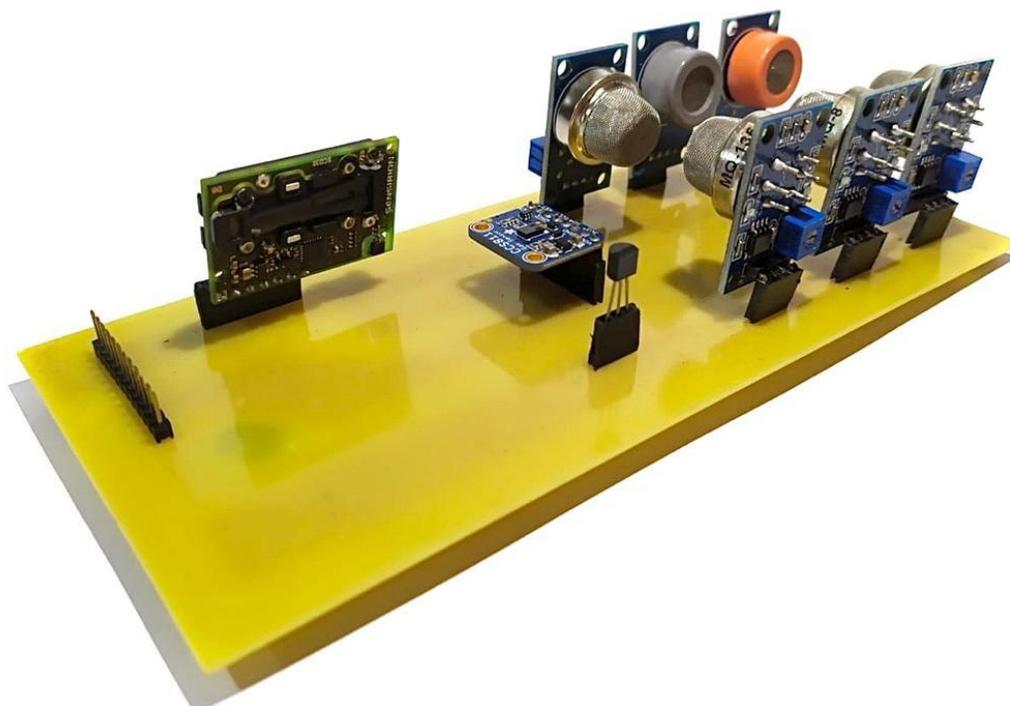
Caja de sensado químico.



Los sensores fueron implementados en una tarjeta PCB de 18x8 cm de dimensión. Colocando en primera instancia a los sensores MQ, el sensor de calidad del aire CCS811 fue ubicado en el centro de la placa y mientras que el sensor óptico SCD30 se encuentra en la parte final asegurando un espacio para que el haz de luz infrarroja no tenga obstáculos en la detección del químico. Además, en la placa se colocó el sensor DS18B20 con el fin de monitorear la temperatura dentro de las cajas. En la Figura 13 se observa el diseño de la matriz de sensores implementada.

Figura 13.

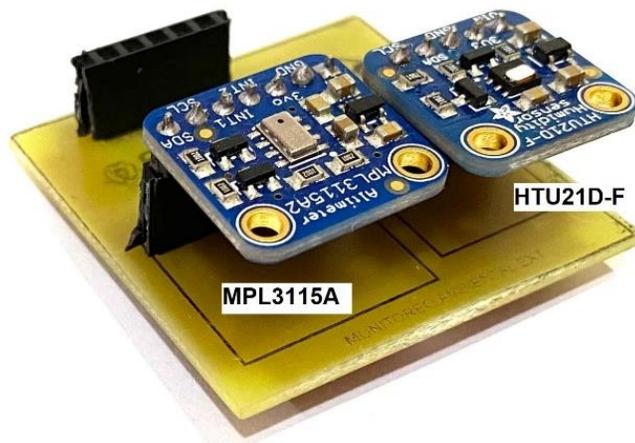
Matriz de sensores implementada.



Como complemento al sistema de sensado químico, se implementó una placa en la que se monitorean las condiciones ambientales del sistema como presión barométrica, temperatura y humedad relativa del aire (ver Figura 14). Para lo cual se utilizó el sensor MPL3115A2 de Freescale en el módulo de Adafruit, utilizado para la medición de la presión barométrica, altitud y temperatura. Además, el sensor HTU21D-F especializado de TE Connectivity (TE) implementado en el módulo de Adafruit para la medición de temperatura y humedad relativa del ambiente. Estos sensores son alimentados con 5 V y se comunican por medio del protocolo I2C, por lo que su respuesta está dada en función de las unidades utilizadas para la magnitud física a medir (Adafruit, 2014b, 2014c; Freescale Xtrinsic, 2011; TE Connectivity, 2017).

Figura 14.

Sensores de monitoreo ambiental.



3.3.2. Sistema neumático

El sistema neumático permite el ingreso del gas en las cajas de sensado con un flujo constante de aire, asegurando que se llenen de manera homogénea al momento del monitoreo de la señal. Además, el sistema también permite la limpieza de la caja a través de la expulsión del gas hacia el exterior. El ingreso del químico se realiza con una bomba de absorción para cada caja de sensado, conectadas a la fuente del gas a través de mangueras y una unión de tipo T. Para la limpieza de las cajas de sensado se utiliza una sola bomba de las mismas características que las anteriores, para esto se conecta las dos cajas a la bomba por medio de una unión de tipo T.

Las bombas utilizadas en el sistema corresponden al modelo R385 normalmente usados en dispensadores y aplicaciones de filtrado de líquidos (cafeteras, máquinas de refrescos), además de acuarios o peceras (RAMBAL Automatización y Robótica, 2017). En la Tabla 8 se indican las especificaciones técnicas de las bombas.

Tabla 8.

Especificaciones técnicas Bomba de diafragma R385.

Características / Modelo	R-385
Especificaciones eléctricas	
Tensión de alimentación	6 - 12 V
Tensión máxima	12.5 A (Máx.)
Corriente de carga	0.5 - 0.75 A (Máx.)
Potencia	6 W
Diámetro de entrada y salida	6mm interior, 8.5mm exterior
Flujo	1.5 a 2 l/min
Tamaño	90mm x 40mm x 35mm
Temperatura	75 °C (en el agua)

Nota. Adaptado de Bomba Diafragma Fluidos 6W 6-12V DC R385-PLUS, de RAMBAL Automatización y Robótica, 2017, (<https://rambal.com/bomba-valvula-solenoide/694-bomba-de-diafragma-6-12v-dc-r385.html>).

Debido a que en el datasheet se indica únicamente el flujo de agua de las bombas, se realizó la medición del flujo de aire a partir de un caudalímetro, obteniendo un resultado promedio de 0,48 l/min de aire en cada bomba. Con relación a esto se estimó que el tiempo necesario para llenar con el gas cada una de las cajas es de 1 minuto y 23 segundos, debido a que el volumen de las cajas de sensado es de 665 cm³.

3.3.3. Sistema de control y adquisición de señales

Con el dimensionamiento del sistema de biodepuración se establecieron los requerimientos para la elección de la tarjeta de desarrollo necesaria. Para la adquisición de los datos del sistema de sensado se requieren 14 pines de entrada analógicas y pines SDA y SCL utilizados en el protocolo de comunicación I2C. Además, para el control del sistema neumático son necesarios 3 pines digitales para el accionamiento de un sistema

de potencia en el que se utilizó el módulo de relés de Tongling los cuales tienen una señal de activación de 5v, soportando voltajes de carga de 30 V.

Debido a que los sensores utilizados con el protocolo I2C poseen direcciones establecidas por el fabricante, no es posible realizar la conexión directa en la tarjeta de adquisición, ya que se generan problemas de lectura de datos. Por esta razón, es necesario el uso del dispositivo multiplexor de señales I2C TCA9548A de Texas Instrument, capaz de interactuar entre 8 canales diferentes permitiendo la conexión de los sensores con la tarjeta a través de un solo canal de comunicación I2C.

En base al dimensionamiento del sistema de sensado, se analizaron diferentes tarjetas de adquisición que dispongan de varios pines analógicos, digitales y puerto de comunicación I2C, además de una alta velocidad de procesamiento. Por estas razones, se escogió a la tarjeta Teensy 3.6, la cual satisface con los requerimientos establecidos para el sistema, como se muestra en el detalle de sus características técnicas en la Tabla 9 (PJRC, 2008).

Tabla 9.

Especificaciones técnicas Teensy 3.6.

Características / Modelo	Teensy 3.6
Tensión de alimentación	3.3 V
Voltaje de entrada recomendado (V_{IN})	3.6 – 6.0 V
Memoria flash	1 M
Memoria RAM	256 KB
Memoria EEPROM	4 KB
Frecuencia	180 MHz
Comunicación	I2C, SPI, UART, CAN, USB

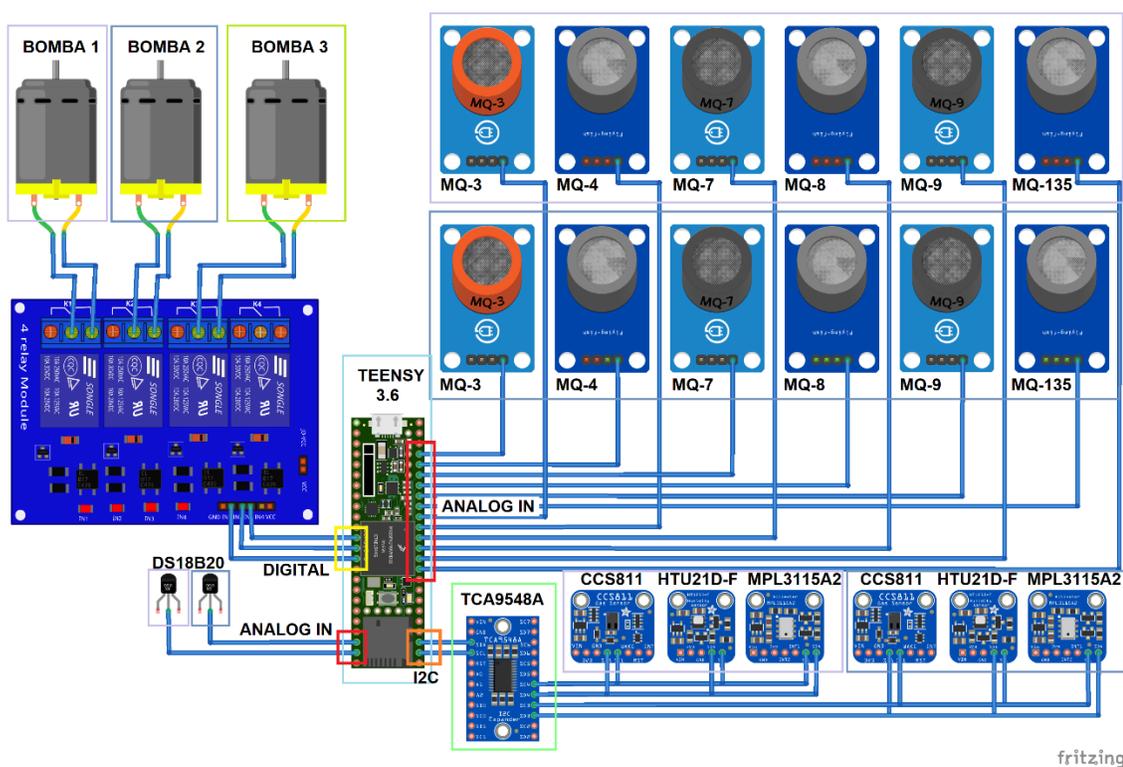
Características / Modelo	Teensy 3.6
Pines de E/S digital	62
Entradas analógicas	25
Salidas analógicas	2
Salida PWM	22

Nota. Adaptado de Teensy 3.6 without headers, de Adafruit, 2016. Tomado de ARM DEVELOPMENT, (<https://www.adafruit.com/product/3266>).

En la Figura 15 se observa el diagrama de conexión de los elementos del sistema de sensado, sistema neumático y sistema de control en función de las señales de entrada y salida requeridas.

Figura 15.

Diagrama de conexión del Sistema de control y adquisición de señales.

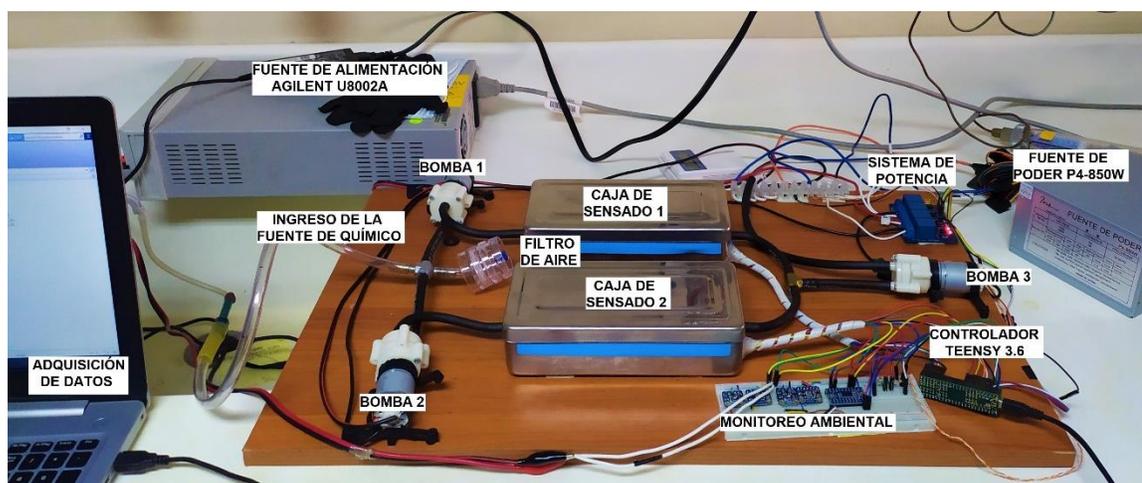


3.3.4. Integración del sistema de sensado

Al concluir el diseño de los sistemas se procedió a la integración del sistema de sensado químico. Los elementos utilizados se ubican en una base de madera en la posición indicada en la Figura 16, con el fin de que no existan perturbaciones por la vibración o por movimientos causados por las bombas. Además, se incluyó en la unión T del ingreso del gas un filtro de aire con el objetivo de no permitir el ingreso de partículas al sistema de sensado.

Figura 16.

Implementación del Sistema de Sensado Químico.



El sistema de sensado está alimentado con dos fuentes de voltaje, una para los sensores y relés, y la otra fuente para el encendido de las bombas. La fuente escogida para la alimentación de los sensores fue la Agilent U8002A, la cual es una fuente de voltaje variable entre 0V – 30V, una corriente máxima de 5 A y una potencia de 150W. Para el encendido de las bombas se utilizó la fuente Codegen de 350 W, este tipo de fuentes es usado generalmente para computadoras y es de utilidad en el sistema ya que cuenta con varios terminales de voltaje como +3VC, +5VDC, -5VDC, +12VDC y GND.

3.4. Calibración de sensores

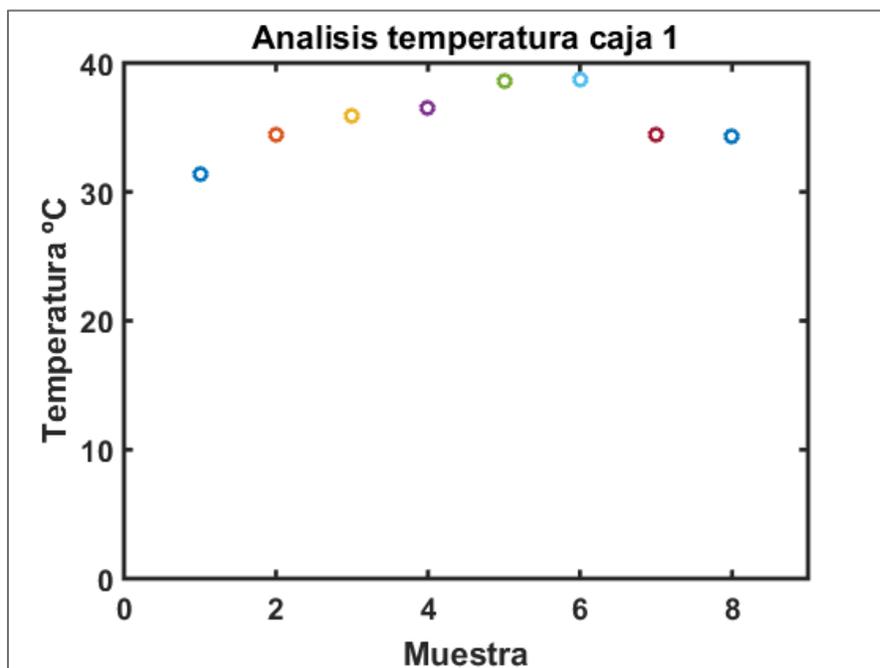
3.4.1. Metodología para la calibración de los sensores

Previo a las pruebas de calibración de los sensores, se realizó el precalentamiento de estos para obtener el máximo valor de sensibilidad del sensor. Mientras que en los sensores que tienen su propio microprocesador, se realiza el precalentamiento para establecer su propia línea base. Este periodo de precalentamiento es recomendado por el fabricante y varía entre 24 y 48 horas de acuerdo con cada sensor.

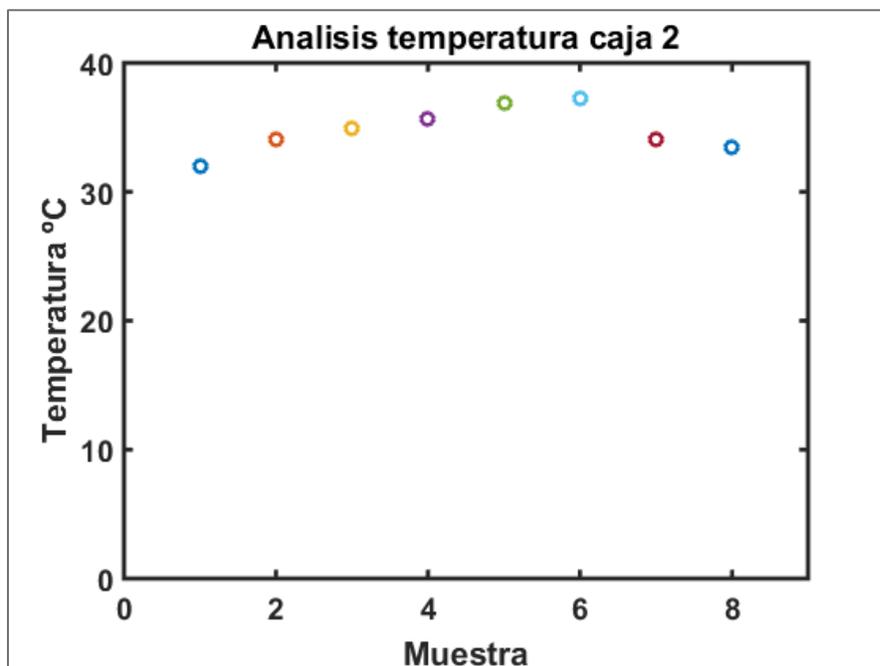
En trabajos anteriores en los que se utilizaron varios sensores MQ, fue necesario la implementación de un sistema de enfriamiento debido al aumento de la temperatura dentro de las cajas de sensado (Villacrés Estrada, 2020). Por este motivo, se analizó la temperatura de las cajas con las matrices de sensores, realizando 8 pruebas con los sensores encendidos durante 20 minutos. En la Figura 17 y Figura 18, se muestran las gráficas de los promedios de temperatura obtenidos en cada prueba. El promedio de temperatura en la caja de sensado 1 es de 31.5989 °C mientras que en la caja de sensado 2 es de 30.9311 °C. En base a este análisis y conociendo que la temperatura de trabajo que soportan los sensores es de hasta 50 °C, no es necesario el uso de un sistema de enfriamiento en el sistema de sensado químico.

Figura 17.

Análisis de temperatura de la Caja 1.

**Figura 18.**

Análisis de temperatura de la Caja 2.



Una vez implementado el sistema de sensado químico, se establecen los intervalos de tiempo requeridos dentro del proceso de análisis del comportamiento de los sensores para garantizar el llenado, limpieza y monitoreo del gas en las cajas de sensado. Este proceso es realizado de manera automática para cada prueba y se tiene un registro continuo de los datos entregados por los sensores con un periodo de muestreo de 2 segundos.

El procedimiento general inicia con la adaptación de la fuente de emisión del químico con el sistema de sensado. Después de esto, el sistema permanece en reposo durante 2 minutos, tiempo recomendado para el precalentamiento de los sensores, en el cual éstos adquieren y establecen los valores de su línea base previo a la realización de pruebas. En este punto, se encienden las bombas B1 y B2 durante 2 minutos 40 segundos, permitiendo el ingreso y distribución del químico en el interior de las cajas de sensado, tiempo suficiente para llenar el volumen de aire de estas, de acuerdo con los cálculos de flujo de aire de las bombas. Al concluir este tiempo, se apagan las bombas y el sistema queda en reposo durante 1 minuto 20 segundos, permitiendo la difusión homogénea del químico en el interior de las cajas para su análisis. Para finalizar, se enciende la bomba B3 durante 7 minutos 20 segundos permitiendo la limpieza de las cajas de sensado. Este proceso se repite para cada una de las pruebas.

Previo al inicio de las pruebas, es importante establecer lo que representa el valor de una ppm, que será la unidad de medida en la que se realizará la calibración de los sensores. Por tanto, se define como 1 ppm a 1 parte en 1000000 de partes o a 1 parte de contaminante en 1000000 de partes de aire. La Ecuación 1 es utilizada para la determinación del valor de ppm en relación con el Volumen molar y el Peso Molecular, es:

$$ppm = \left[\frac{\text{Volumen molar } (V_M)}{\text{Peso Molecular } (PM)} \right] \times \left[\frac{mg}{m^3} \right] \quad \text{Ecuación 1}$$

Para conocer el valor del volumen molar utilizamos la ecuación general de los gases ideales.

$$P \cdot V = \eta \cdot R \cdot T \quad \text{Ecuación 2}$$

$$V = \frac{\eta \cdot R \cdot T}{P} \quad \text{Ecuación 3}$$

En donde:

P = Presión absoluta.

V = Volumen.

n = Número de moles.

R = Constante universal de los gases ideales.

T = Temperatura absoluta.

Sabiendo que las condiciones ambientales son:

$$T = 22 \text{ } ^\circ\text{C} + 273.15 = 295.15 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$P = 564 \text{ mmHg}$$

$$n = 1$$

$$R = 62.32$$

Reemplazando estos valores en la Ecuación 4, se obtiene el volumen molar:

$$V = \frac{1 \times 62.32 \times 295.15}{564} = 32.61 \text{ l} \quad \text{Ecuación 4}$$

De esta forma, la Ecuación 5 es necesaria para determinar el valor estimado en mg/m^3 del químico equivalente a un valor de ppm, es la siguiente:

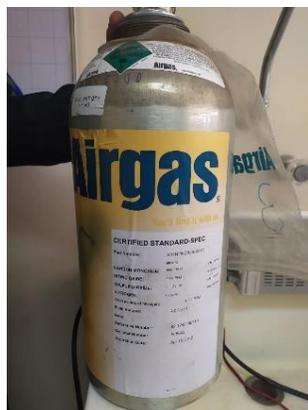
$$\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} = \left[\frac{\text{Peso Molecular (PM)}}{\text{Volumen molar (Vm)}} \right] \times [\text{ppm}] \quad \text{Ecuación 5}$$

$$\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} = \frac{\text{PM} \times \text{ppm}}{22.414 \text{ lt}} \quad \text{Ecuación 6}$$

Los químicos seleccionados para la obtención de la curva de calibración de los sensores son CO , CO_2 , etanol, acetona y tolueno. De los cuales, para el CO se utilizaron tanques certificados con valores establecidos en ppm como fuente de emisión del gas (ver Figura 19 a). En el caso del CO_2 , se utiliza hielo seco, mientras que, para el etanol, acetona y tolueno, los químicos se encontraban en forma líquida. Como fuente de generación de los gases se utilizó una bombona de vidrio (ver Figura 19 b), con un volumen de 0.032 m^3 , en la cual se depositaron los químicos previamente pesados en una balanza digital de precisión con una resolución de 0.1 mg como se ve en la Figura 20.

Figura 19.

a) Tanque estándar de CO , b) Bombona de vidrio.



a)



b)

Figura 20.

Balanza digital para pesar los químicos.



En el caso de los químicos en estado líquido, se utilizó una jeringuilla de 10 ml y una jeringuilla de precisión de 1 μ l. Se determinó el peso de una gota en la balanza digital y en función de este valor se estimó el equivalente teórico del químico en partes por millón. Para la jeringuilla de 10 ml el peso de la gota es de 5mg mientras que para la jeringuilla de 1 μ l el peso es de 0.5 mg. Debido a que las densidades de los diferentes líquidos son parecidas, se puede trabajar considerando que el peso de la gota es el mismo para cada químico. Posterior a esto, se depositan las gotas en la bombona, la cual es calentada en una incubadora para que el químico se evapore y se difunda en forma de gas en todo el volumen de la bombona.

Como ejemplo, partiendo de la Ecuación 6, para la estimación del peso necesario de etanol equivalente a 400 ppm en la bombona, y sabiendo que el peso molecular es de 46,07 g/mol se reemplazan estos valores. De esta forma se puede estimar el peso necesario de etanol como se muestra en la Ecuación 7.

$$\frac{mg}{m^3} = \frac{46,07 \frac{g}{mol} \times 400 ppm}{32.61 lt} = 565.1 \quad \text{Ecuación 7}$$

Este valor representa el peso necesario para 1 m³ de aire, debido a que la bombona que se utiliza como fuente de gas tiene un volumen de 0,028 m³, se realiza la transformación a mg utilizando una regla de tres mostrada en la Ecuación 8.

$$mg = \frac{0.028 m^3 \times 751.86}{1 m^3} = 15.82 \quad \text{Ecuación 8}$$

De esta forma, se obtiene que el peso necesario de etanol equivalente a 400 ppm teóricas es de 15.82 mg. Conociendo que el peso de cada gota de la jeringuilla de 10mL es 5 mg, se depositan 3 gotas de etanol en la bombona.

El procedimiento anteriormente detallado es repetido para cada uno de los químicos y para los diferentes valores de concentración requeridas. En la Tabla 10, se presentan las relaciones de peso y concentraciones calculados para las pruebas de calibración de los sensores, utilizando los tanques estandarizados de CO y la bombona de vidrio con un volumen de 0.032 m³ para el CO₂, etanol, acetona y tolueno.

Tabla 10.

Valores de concentración de los químicos.

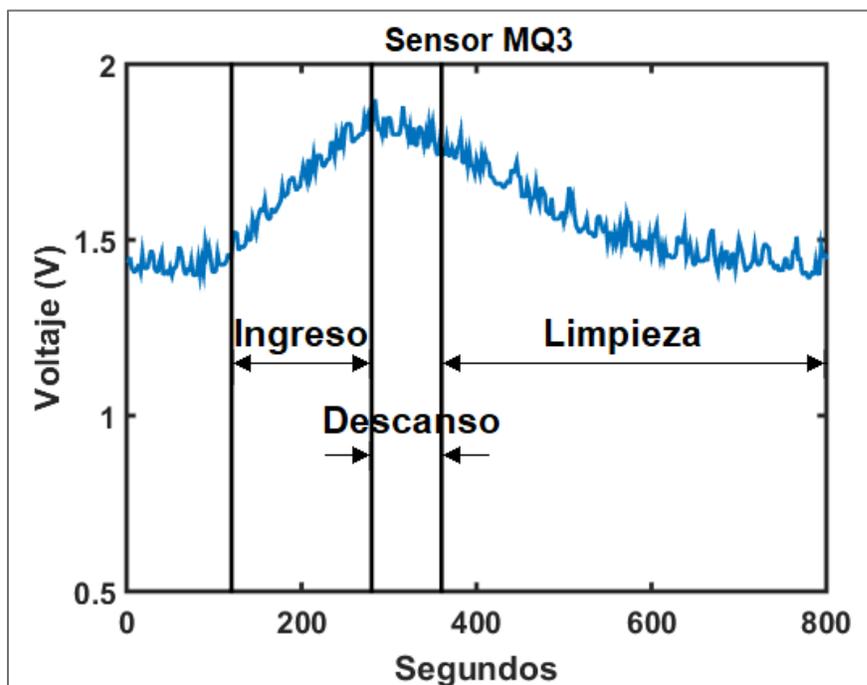
Químico	Peso Molecular	Peso	Concentración
Monóxido de carbono	28,01 (g/mol)	-	10 (ppm)
		-	100 (ppm)
		-	1000 (ppm)

Químico	Peso Molecular	Peso	Concentración
Dióxido de Carbono	44,01 (g/mol)	10 (mg)	265 (ppm)
		40 (mg)	1059 (ppm)
		100 (mg)	2646 (ppm)
		400 (mg)	10585 (ppm)
		700 (mg)	18524 (ppm)
		1000 (mg)	26463 (ppm)
Etanol	46,07 (g/mol)	0,5 (mg)	13 (ppm)
		1 (mg)	25 (ppm)
Acetona	58,08 (g/mol)	0,5 (mg)	10 (ppm)
		2,5 (mg)	50 (ppm)
Tolueno	32,14 (g/mol)	5 (mg)	63 (ppm)
		10 (mg)	126 (ppm)

Como ejemplo del proceso del análisis de los sensores, en la Figura 21 se muestra el comportamiento del sensor MQ-3 durante una prueba. Se puede observar el tiempo que tiene el sensor para estabilizar su línea base, el intervalo en el que entra en contacto con el químico y el tiempo de limpieza en el que el sensor vuelve a su línea base. A partir de esto, se establece la ventana de tiempo utilizada para determinar el voltaje del sensor a un valor de ppm del químico establecido previamente, la cual es en el momento en el que el sensor alcanza su máximo valor durante el intervalo de tiempo de descanso de las bombas. La ventana está conformada por 10 valores de los cuales el promedio de ellos será utilizado para la determinación de la curva de calibración del sensor.

Figura 21.

Comportamiento del sensor MQ-3 durante la prueba.



3.4.2. Estimación de las curvas de calibración

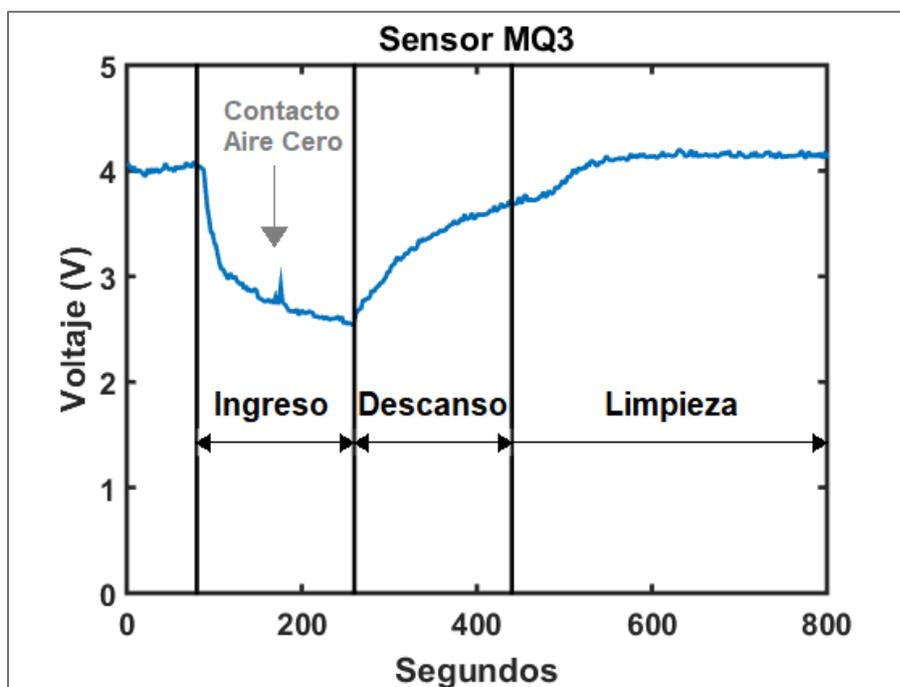
Para la obtención de las curvas de calibración se obtuvo una nube de puntos para cada uno de los valores de concentración determinados para cada químico, repitiendo varias veces el proceso de sensado en cada valor de concentración. Gracias a la correcta selección de resistencias de carga en los sensores, se pueden ajustar las curvas de comportamiento de los sensores de forma lineal, por lo que los datos obtenidos se ajustaron a una curva de primer orden (Villacrés Estrada, 2020). Debido a que la respuesta de los sensores está dada en función de su voltaje de salida, las curvas de calibración se calculan con la diferencia de valor entre el promedio del voltaje máximo del sensor al estar en contacto con el químico y su línea base. A pesar de que las curvas obtenidas tienen un aspecto lineal, se realizaron estimaciones con funciones de segundo

orden y exponenciales, sin encontrar una mejora considerable en el error estadístico en relación con las curvas lineales.

Adicional, previo a la realización de las pruebas con los químicos seleccionados, se estableció la línea base del sistema al interactuar con aire cero, es decir, aire sin contaminantes. Esto permite obtener un dato extra en la curva de calibración cuando el valor de ppm de los contaminantes es igual a cero. Como ejemplo en la Figura 22 se muestra el comportamiento del sensor MQ-3 al interactuar con el aire sin contaminantes. Se puede observar que al ingresar el aire cero a la caja de sensado, el sensor tiene una caída notable de voltaje. Posteriormente, cuando la caja es limpiada, el sensor regresa a sus niveles de línea base.

Figura 22.

Respuesta del sensor MQ-3 al aire cero.



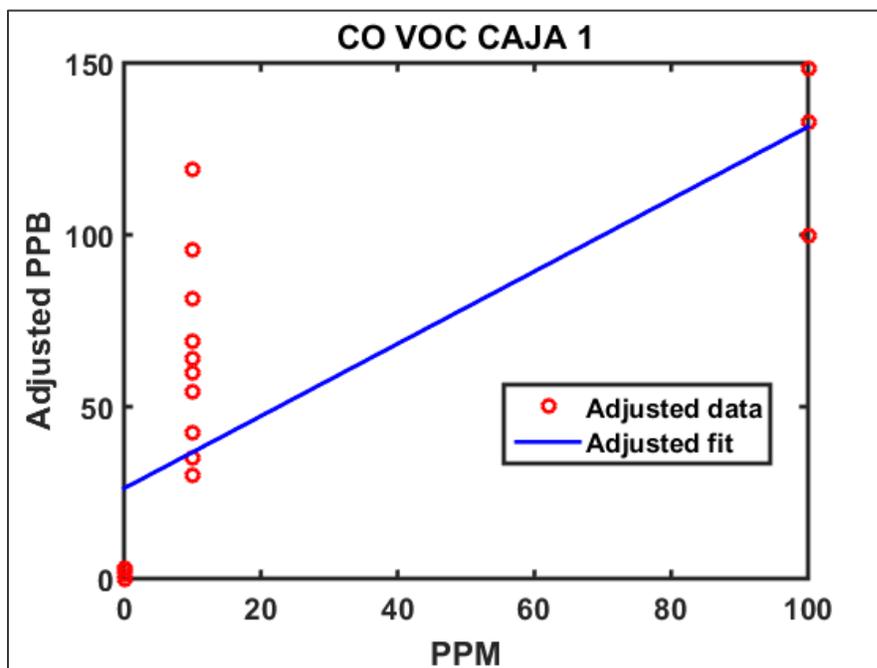
Es importante recordar que en el diseño del sistema de sensado químico se implementaron dos cajas de sensado, una para el interior y otra para el exterior del sistema de biodepuración, a pesar de que se cuenta con los mismos sensores en las dos cajas, se realizó la calibración de cada uno de ellos. Se realizaron las pruebas con los sensores químicos MQ-3, MQ-4, MQ-7, MQ-8, MQ-9, MQ-135, CCS811 y el SCD30, para los químicos y concentraciones indicados en la Tabla 10, sin embargo, varios sensores no presentaba respuesta o la sensibilidad era muy baja, por lo que fueron descartados y se decidió estimar la curva para un solo sensor por cada químico. A continuación, se presentan las curvas de calibración estimadas para los sensores seleccionados para cada químico.

3.4.2.1. Estimación de curva de CO

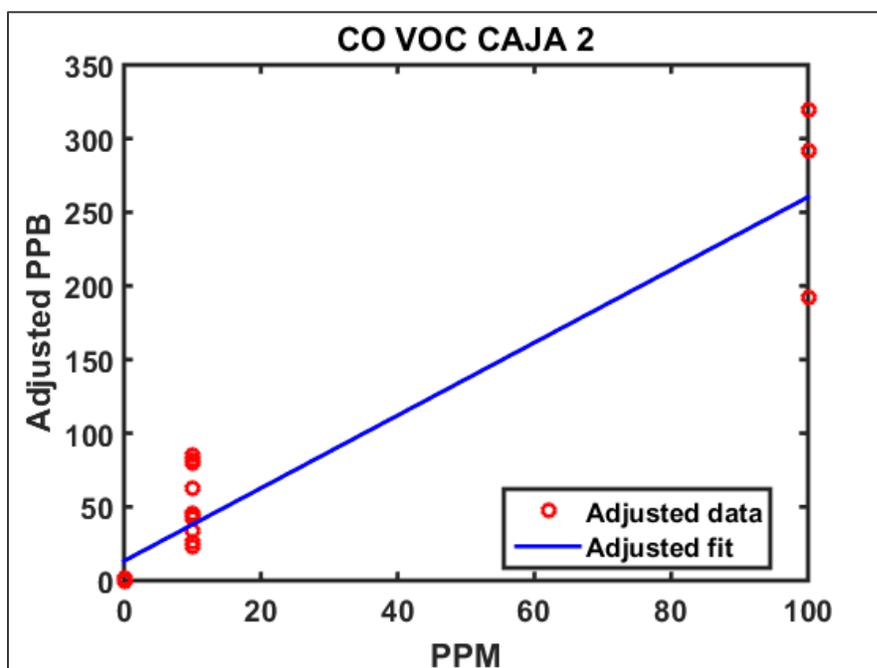
Para el caso del CO, se realizaron las pruebas con tres tanques con valores estándar certificados, establecidos en concentraciones 10, 100 y 1000 ppm. El sensor que presentó un mejor desempeño al analizar las gráficas de las dos cajas de sensado fue el CCS811. Este sensor tiene incorporado un microcontrolador en el que realiza el cálculo de la concentración del total de contaminantes orgánicos volátiles, por lo que en su salida se presenta un valor en función de partes por billón de TVOC por medio del protocolo de comunicación I2C. En la Figura 23 y Figura 24, se observan las gráficas del ajuste lineal del sensor para cada una de las cajas.

Figura 23.

Curva de estimación del sensor CCS811 para el CO en la Caja 1.

**Figura 24.**

Curva de estimación del sensor CCS811 para el CO en la Caja 2.



En la Ecuación 9 y Ecuación 10 se presentan los valores de la curva de calibración del sensor en función de la caja de sensado 1, mientras que la Ecuación 11 y Ecuación 12 se presentan los valores de la curva de calibración con relación a la caja de sensado 2. La Tabla 11 presenta un resumen de los valores estadísticos de las curvas obtenidas.

$$ppb = 26.217 + 1.523 \times ppm \quad \text{Ecuación 9}$$

$$ppm = \frac{ppb - 26.217}{1.523} \quad \text{Ecuación 10}$$

$$ppb = 13.24 + 2.4709 \times ppm \quad \text{Ecuación 11}$$

$$ppm = \frac{ppb - 13.24}{2.4709} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

ppb = Respuesta del sensor en partes por billón.

ppm = Valor de concentración de tolueno en ppm calculado teóricamente

Tabla 11.

Datos estadísticos de la estimación de la curva del sensor CCS811.

	Sensor Caja 1	Sensor Caja 2
Root Mean Squared Error	32.4	32
R-squared:	0.626	0.905
Adjusted R-Squared	0.61	0.901
p-value	2.46e-06	3.06e-13

3.4.2.2. Estimación de curva de etanol

Se utilizaron tres valores de concentración de etanol para las pruebas, los cuales son 0, 13 y 25 ppm. Al analizar los datos obtenidos, se observa que el sensor MQ-3 es el que tiene un mejor rendimiento en las dos cajas de sensado. Es importante indicar que este sensor tiene como salida un valor de voltaje. En la Figura 25 y Figura 26, se observan las gráficas del ajuste lineal del sensor para cada una de las cajas.

Figura 25.

Curva de estimación del sensor MQ-3 para el etanol en la Caja 1.

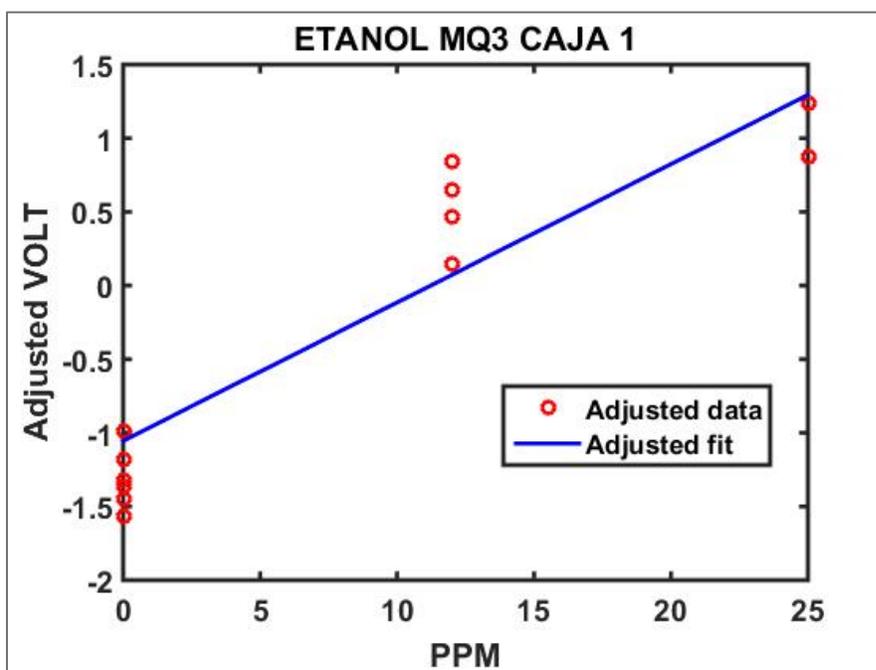
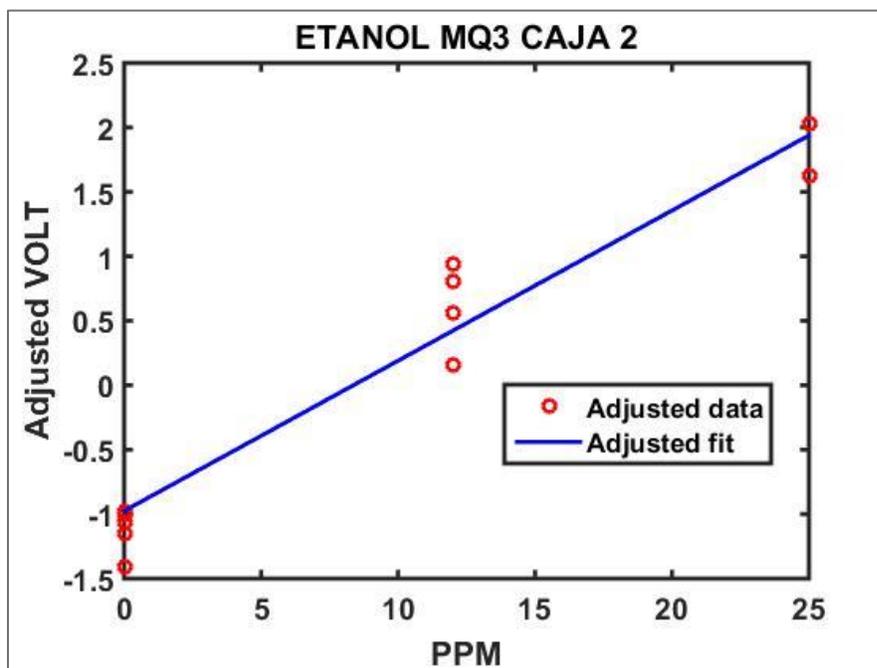


Figura 26.

Curva de estimación del sensor MQ-3 para el etanol en la Caja 2.



En la Ecuación 13 y Ecuación 14 se presentan los valores de la curva de calibración del sensor en función de la caja de sensado 1, mientras que la Ecuación 15 y Ecuación 16 se presentan los valores de la curva de calibración con relación a la caja de sensado 2. La Tabla 12 presenta un resumen de los valores estadísticos de las curvas obtenidas.

$$v = -1.0542 + 0.093905 \times ppm \quad \text{Ecuación 13}$$

$$ppm = \frac{v + 1.0542}{0.093905} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$v = -0.97545 + 0.11655 \times ppm \quad \text{Ecuación 15}$$

$$ppm = \frac{v + 0.97545}{0.11655} \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

v = Voltaje de salida del sensor.

ppm = Valor de concentración de etanol en ppm calculado teóricamente

Tabla 12.

Datos estadísticos de la estimación de la curva del sensor MQ-3.

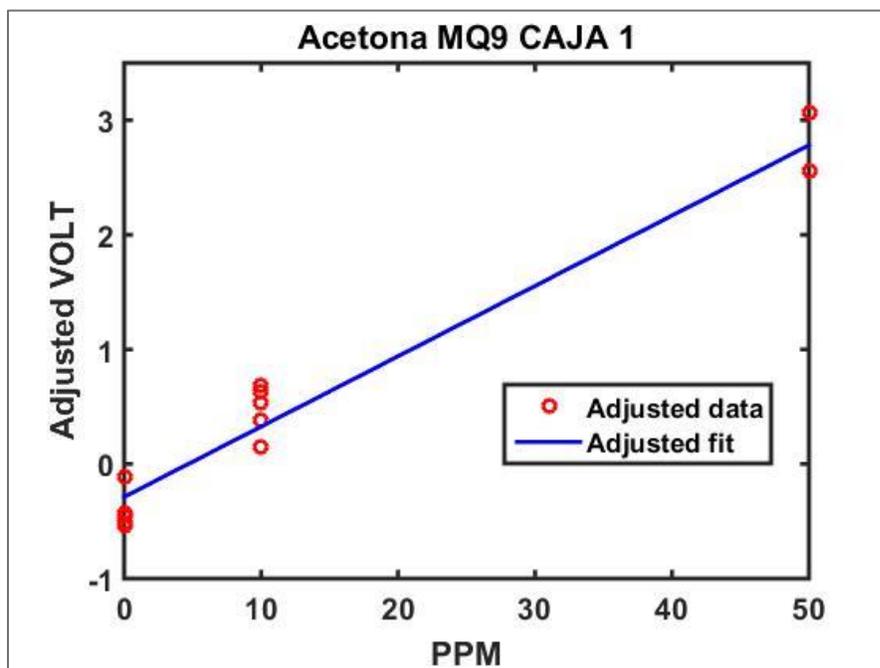
	Sensor Caja 1	Sensor Caja 2
Root Mean Squared Error	0.432	0.29
R-squared:	0.847	0.95
Adjusted R-Squared	0.837	0.947
p-value	6.39e-08	7.96e-12

3.4.2.3. Estimación de curva de acetona

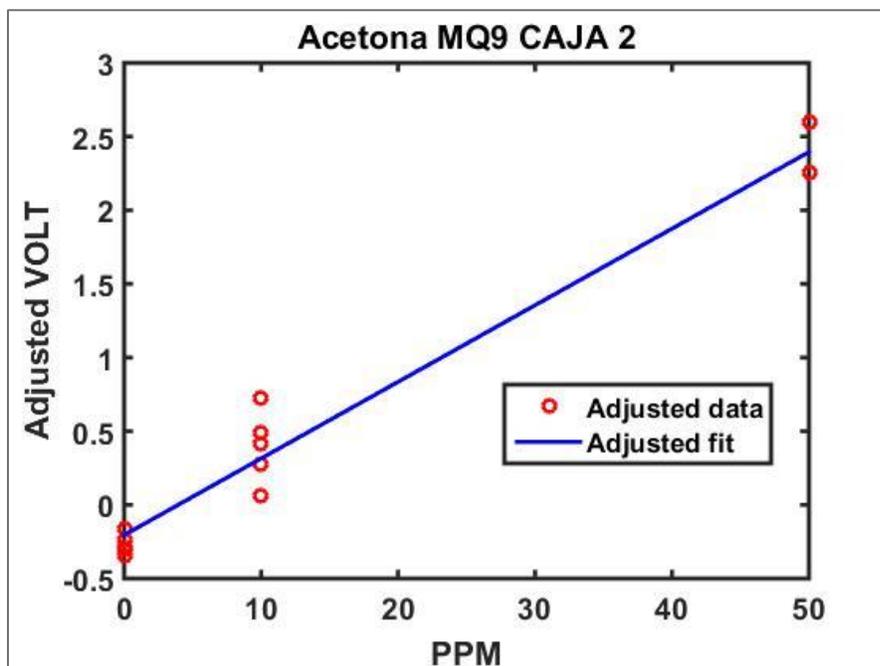
Con la acetona se realizaron pruebas con tres valores de concentración establecidos, que son 0, 10 y 50 ppm. De los datos obtenidos, se observa que el sensor MQ-9 es el que tiene un mejor rendimiento. Este sensor tiene como respuesta una salida de voltaje. En la Figura 27 y Figura 28, se observan las gráficas del ajuste lineal del sensor para cada una de las cajas.

Figura 27.

Curva de estimación del sensor MQ-9 para la acetona en la Caja 1.

**Figura 28.**

Curva de estimación del sensor MQ-9 para la acetona en la Caja 2.



En la Ecuación 17 y Ecuación 18 se presentan los valores de la curva de calibración del sensor en función de la caja de sensado 1 mientras que la Ecuación 19 y Ecuación 20 presenta los valores de la curva de calibración con relación a la caja de sensado 2. La Tabla 13 presenta un resumen de los valores estadísticos de las curvas obtenidas.

$$v = -0.28766 + 0.061395 \times ppm \quad \text{Ecuación 17}$$

$$ppm = \frac{v + 0.28766}{0.061395} \quad \text{Ecuación 18}$$

$$v = -0.20522 + 0.052012 \times ppm \quad \text{Ecuación 19}$$

$$ppm = \frac{v + 0.2052}{0.052012} \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde:

v = Voltaje de salida del sensor.

ppm = Valor de concentración de acetona en ppm calculado teóricamente

Tabla 13.

Datos estadísticos de la estimación de la curva del sensor MQ-9.

	Sensor Caja1	Sensor Caja2
Root Mean Squared Error	0.247	0.191
R-squared:	0.965	0.971
Adjusted R-Squared	0.962	0.968
p-value	2.31e-09	8.64e-10

3.4.2.4. Estimación de curva de tolueno

En el caso del Tolueno se realizaron pruebas con 3 concentraciones diferentes que son 0, 63, 126 ppm. De estas pruebas se pudo observar que el sensor con un mejor rendimiento en sus curvas de calibración es el MQ-135. Se debe mencionar que la respuesta de este sensor está dada en un valor de voltaje de salida. En la Figura 29 y Figura 30 se observan las gráficas del ajuste lineal del sensor para cada una de las cajas.

Figura 29.

Curva de estimación del sensor MQ-135 para el tolueno en la Caja 1.

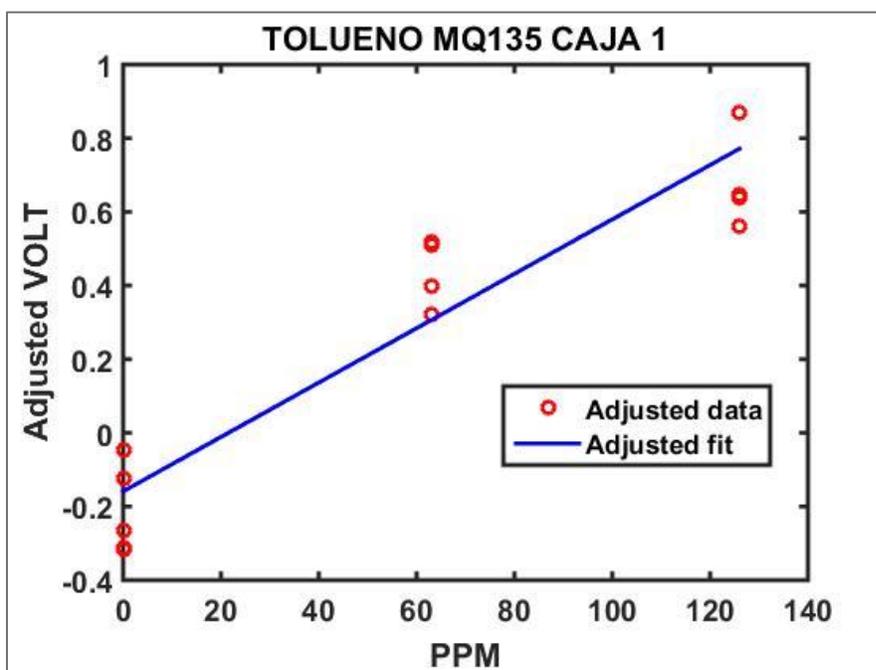
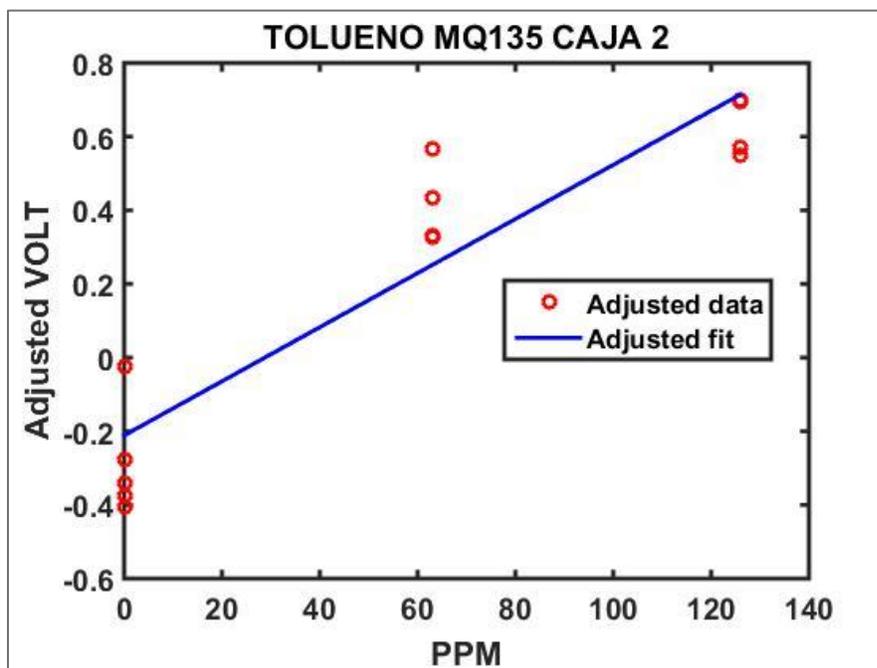


Figura 30.

Curva de estimación del sensor MQ-135 para el tolueno en la Caja 2.



En la Ecuación 21 y Ecuación 22 se presentan los valores de la curva de calibración del sensor en función de la caja de sensado 1, mientras que la Ecuación 23 y Ecuación 24 se presentan los valores de la curva de calibración con relación a la caja de sensado 2. La Tabla 14 presenta un resumen de los valores estadísticos de las curvas obtenidas.

$$v = -0.15897 + 0.058249 \times ppm \quad \text{Ecuación 21}$$

$$ppm = \frac{v + 0.15897}{0.058249} \quad \text{Ecuación 22}$$

$$v = -0.21128 + 0.073468 \times ppm \quad \text{Ecuación 23}$$

$$ppm = \frac{v + 0.21128}{0.073468} \quad \text{Ecuación 24}$$

Donde:

v = Voltaje de salida del sensor.

ppm = Valor de concentración de tolueno en ppm calculado teóricamente

Tabla 14.

Datos estadísticos de la estimación de la curva del sensor MQ-135

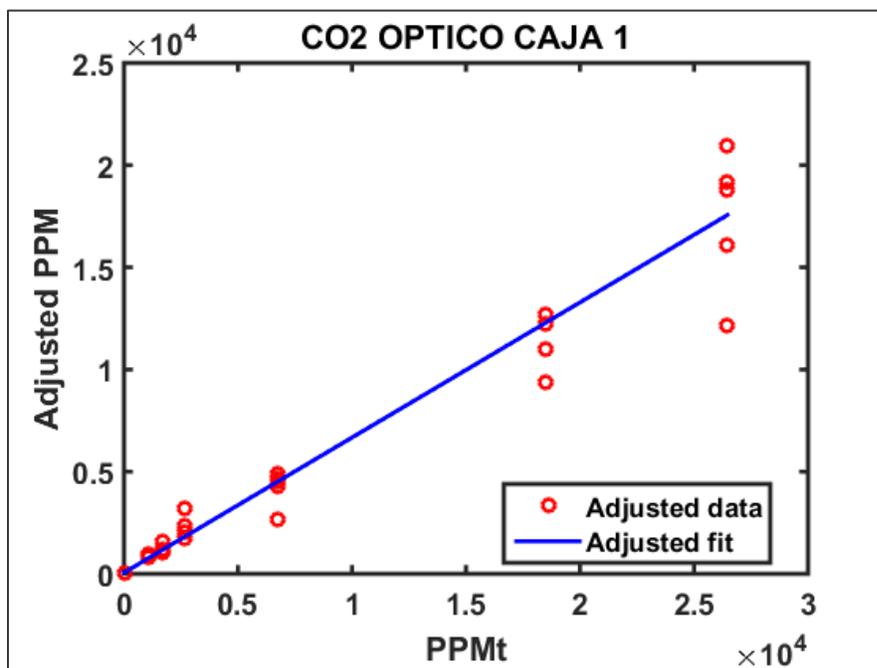
	Sensor Caja1	Sensor Caja2
Root Mean Squared Error	0.143	0.158
R-squared:	0.891	0.869
Adjusted R-Squared	0.883	0.859
p-value	1.26e-07	4.25e-07

3.4.2.5. Estimación de curva de CO₂

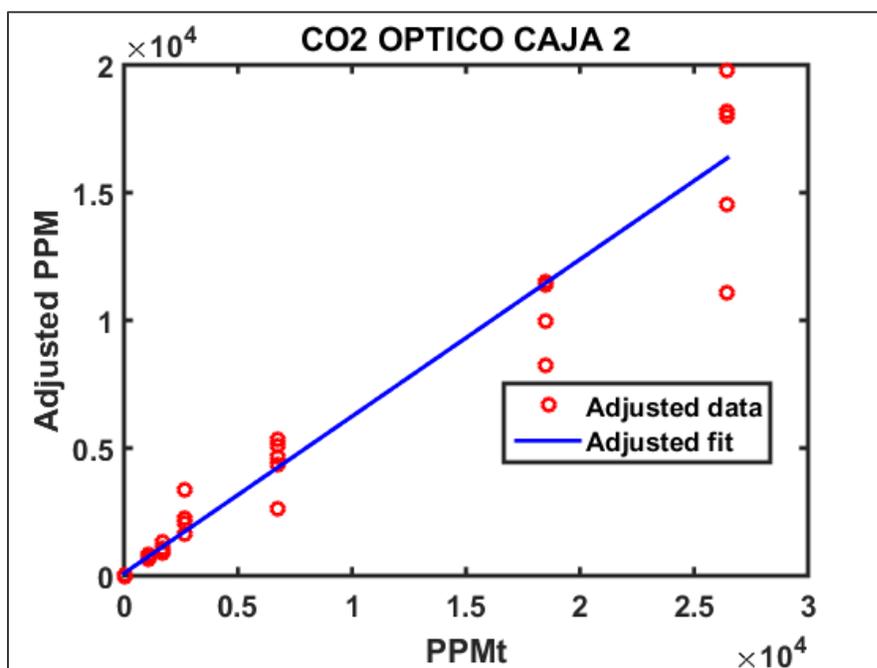
El sensor específico utilizado para la medición de CO₂ fue el sensor óptico SCD30, su salida está dada en ppm. Las pruebas se realizaron con 7 valores de concentración de CO₂ que son 265, 1059, 2646, 10585, 18524, 26463 ppm. En la Figura 31 y Figura 32 se observan las gráficas del ajuste lineal del sensor para cada una de las cajas.

Figura 31.

Curva de estimación del sensor SCD30 para el CO₂ en la Caja 1.

**Figura 32.**

Curva de estimación del sensor SCD30 para el CO₂ en la Caja 2.



En la Ecuación 25 y Ecuación 26 se presentan los valores de la curva de calibración del sensor en función de la caja de sensado 1, mientras que la Ecuación 27 y Ecuación 28 se presentan los valores de la curva de calibración con relación a la caja de sensado 2. La Tabla 15 presenta un resumen de los valores estadísticos de las curvas obtenidas.

$$ppm = 80 + 0.66182 \times ppmt \quad \text{Ecuación 25}$$

$$ppmt = \frac{ppm - 80}{0.66182} \quad \text{Ecuación 26}$$

$$ppm = 116 + 0.61489 \times ppmt \quad \text{Ecuación 27}$$

$$ppmt = \frac{ppm - 116}{0.61489} \quad \text{Ecuación 28}$$

Donde:

ppm = Respuesta del sensor en ppm de CO₂.

$ppmt$ = Valor de concentración de CO₂ en ppm calculado teóricamente

Tabla 15.

Datos estadísticos de la estimación de la curva del sensor SCD30.

	Sensor Caja 1	Sensor Caja 2
Root Mean Squared Error	1.41e+03	1.46e+03
R-squared:	0.954	0.944
Adjusted R-Squared	0.953	0.943
p-value	2.01e-28	1.1e-26

3.5. Selección final de los sensores.

A manera de resumen, en base a la bibliografía revisada se escogieron los sensores por sus características técnicas, características de sensibilidad y recomendaciones dadas por el fabricante. Como se mencionó, los sensores seleccionados como parte del sistema de sensado fueron: MQ-3, MQ-4, MQ-7, MQ-8, MQ-9, MQ-135, CCS811, SCD30. Sin embargo, una vez realizadas las pruebas con todos los químicos, y al analizar las curvas obtenidas de cada sensor, varios de ellos fueron descartados por su bajo rendimiento o baja sensibilidad, por esto se seleccionó un sensor para cada uno de los químicos establecidos. En la Tabla 16 se presenta la selección de los sensores con mejor rendimiento a cada químico y su ecuación característica.

Tabla 16.

Selección final de los sensores para el Sistema de sensado químico.

Químico	Sensor	Ecuación Caja 1	Ecuación Caja 2
Monóxido de Carbono (CO)	CCS811	$ppm = \frac{ppb - 26.217}{1.523}$	$ppm = \frac{ppb - 13.24}{2.4709}$
Etanol	MQ-3	$ppm = \frac{v + 1.0542}{0.093905}$	$ppm = \frac{v + 0.97545}{0.11655}$
Acetona	MQ-9	$ppm = \frac{v + 0.28766}{0.061395}$	$ppm = \frac{v + 0.2052}{0.052012}$
Tolueno	MQ-135	$ppm = \frac{v + 0.15897}{0.058249}$	$ppm = \frac{v + 0.21128}{0.073468}$
Dióxido de Carbono (CO₂)	SCD30	$ppmt = \frac{ppm - 80}{0.66182}$	$ppmt = \frac{ppm - 116}{0.61489}$

Capítulo 4

Sistema de biodepuración

4.1. Introducción

Durante varios años se han realizado diversos estudios con el fin de comprender los procesos fisiológicos de las plantas como sistemas de limpieza del aire. Los primeros estudios llevados a cabo por la NASA junto con el Dr. Bill Wolverton, permitieron desarrollar el primer filtro biológico de aire a base de plantas, para reducir los niveles de contaminación de los ambientes. Posteriormente, fue desarrollado el proyecto *Biohome*, un laboratorio ambiental en el que se realizaron los primeros estudios con plantas ornamentales, que permitieron demostrar que las plantas reducían los niveles de VOC en ambientes interiores. Es por esto que las plantas son consideradas como el principal sistema de biodepuración del aire (Meng et al., 2018; Stutte & Kennedy, 2002; Bc Wolverton & Wolverton, 1996; Bill Wolverton et al., 1989).

En las plantas, la absorción de los contaminantes volátiles está relacionada a la cantidad, tamaño, estomas o pelos de las hojas, entre otras características. Los estudios iniciales con las plantas fueron empíricos, sin embargo, sirvieron para observar la disminución de los VOC presentes en el ambiente. A partir de esto, se clasificaron las especies de plantas con mejor desempeño al momento de reducir los niveles de contaminación en ambientes interiores. Dentro de este grupo, las plantas ornamentales a las que se les dio mayor importancia en las investigaciones fueron *Spatiphyllum*, *Dracaena*, *Chlorophytum* y *Sansviera* ya que mostraron tener buen desempeño en la remoción de contaminantes ambientales (De Visser, 2017).

En base a la bibliografía revisada, en el presente capítulo se analizan a las plantas como sistemas de biodepuración. Una vez realizada la calibración de los sensores, se

utiliza el sistema de sensado químico para realizar el análisis del comportamiento de las plantas cuando se encuentran en interacción con contaminantes orgánicos volátiles. A partir de esto se presenta el diseño e implementación de un sistema de biodepuración de aire para ambientes interiores.

4.2. Selección de las plantas para el sistema de biodepuración

En base a las investigaciones realizadas sobre las plantas como sistemas de depuración, se tomó como referencia a los estudios realizados por el Dr. Bill Wolverton. En estos estudios se clasifican a diversas plantas de interior como las óptimas para realizar los procesos de depuración del aire, siendo esta la razón por la que se concientizo a las personas sobre la importancia que tienen las plantas en lugares cerrados. A pesar de que en muchos de estos estudios se trabajaron con varios químicos, la investigación en curso toma enfoque en los contaminantes orgánicos que se encuentran con mayor frecuencia en los ambientes interiores. Las plantas seleccionadas para el presente estudio son el Lirio de la paz (*Spathiphyllum 'Mauna Loa'*) y la Dracaena trifasciata (*Sansevieria trifasciata 'Laurentii'*), las cuales se encuentran detalladas dentro de las plantas mejor calificadas en las investigaciones realizadas por la NASA (Meng et al., 2018; Stutte & Kennedy, 2002; Bc Wolverton & Wolverton, 1996; Bill Wolverton et al., 1989).

El Lirio de la paz, cuyo nombre científico es *Spathiphyllum 'Mauna Loa'*, o también conocida como Cuna de Moisés. Tiene sus orígenes en América tropical y Malasia. Esta planta se puede adaptar a lugares con poca iluminación y temperaturas cálidas que varían entre 25° y 30°C. Es una planta ornamental de interiores ideal para dormitorios, ya que elimina las toxinas del aire, incluyendo el formaldehído, benceno y tricloroetileno (ver Figura 33) (Espinosa et al., 2014; Schneider Clinic, n.d.; Wijesooroya et al., 2018).

Figura 33.

Cuna de Moisés.



Nota. Adaptado de Peace Lily (Spathiphyllum 'Mauna Loa') [Fotografía], de Schneider Clinic, 2017. Tomado de 25 House Plants That Detox Your Home Naturally (<https://www.schneiderclinic.com/25-house-plants-that-detox-the-air-in-your-home-naturally/>).

La planta conocida como Lengua de suegra o Lengua de Tigre, recibe su nombre por la forma característica de sus hojas (ver Figura 34). Su nombre científico es *Sansevieria Trifasciata*. Es una planta ornamental proveniente de África ideal para ambientes interiores. La temperatura promedio en la que puede desarrollarse está entre 18° y 27°C. Por sus características es de fácil mantenimiento y es considerada dentro de las plantas con mejor rendimiento en la purificación y limpieza del aire en hogares y oficinas. Elimina contaminantes orgánicos volátiles como el benceno, formaldehídos y otros VOC (Rosas Villanueva, 2018; The Nunhead Gardener, 2018).

Figura 34.

Lengua de suegra.



Nota. Adaptado de Sansevieria Trifasciata (Mother In-Laws Tongue) [Fotografía], de The Nunhead Gardener, 2018. Tomado de House Plants (<https://thenunheadgardener.com/indoor-house-plants/snake-plant>).

Considerando que las plantas realizan sus procesos fisiológicos de respiración y fotosíntesis por medio de sus hojas, se contabilizó la cantidad de hojas que tiene cada planta y se estimó el valor aproximado de área efectiva de las mismas. La planta Lengua de Tigre utilizada en el estudio tiene tres hojas, siendo el valor aproximado de su área efectiva de 444 cm². Por su parte, la planta Cuna de Moisés tiene 3 hojas y su valor aproximado de área efectiva es de 230 cm².

4.3. Diseño del sistema para el análisis de la fisiología de las plantas

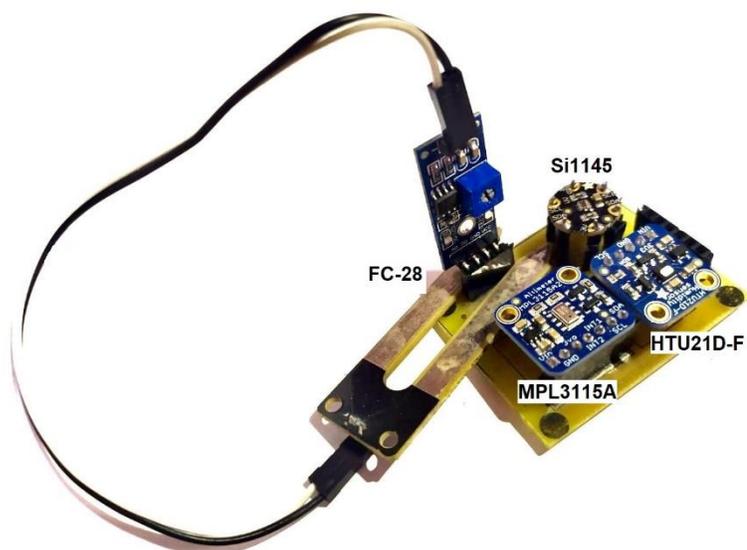
El diseño del sistema de biodepuración para el análisis de la reducción de los contaminantes ambientales por las plantas, utiliza el sistema de sensado químico descrito en el Capítulo 3, con varias adecuaciones. En el caso del sistema de sensado, se utiliza una sola caja con la matriz de sensores de mejor rendimiento. El sistema neumático utiliza

una sola bomba para el ingreso del gas hacia la caja de sensado y otra bomba para la limpieza de esta.

En relación con los sensores químicos seleccionados en la Sección 3.5. (Tabla 16), se trabaja únicamente con el sensor de calidad del aire CCS811, el sensor SCD30 para la detección de CO₂ y el sensor de alcohol MQ-3. Además, como complemento a los sensores de monitoreo ambiental se adiciona el sensor de índice UV de Flora Si1145 conectado al bus de comunicación I2C, el sensor electroquímico ME2-O2-Φ20 de Winsen, utilizado para la detección de la concentración de oxígeno presente en el ambiente y el sensor FC-28 para el monitoreo de la humedad del suelo de la planta como se observa en la Figura 35 (Adafruit, 2014a; Silicon Labs, 2013; Texas Instruments, 2018; Winsen, 2016). Al reducir el número de sensores en el sistema, disminuyó el consumo de potencia, por lo que el sistema se alimenta con la fuente de poder CODIGEN para los sensores y los relés, mientras que para la alimentación de las bombas se utiliza otra fuente de las mismas características.

Figura 35.

Placa de monitoreo ambiental interior.



Para el análisis del consumo de contaminantes ambientales, se utiliza una caja de vidrio en el que se coloca a la planta junto con el químico para realizar las pruebas. Esta caja tiene como dimensiones 30,5 x 31,5 cm de base y 54 cm de alto, como se muestra en la Figura 36.

Figura 36.

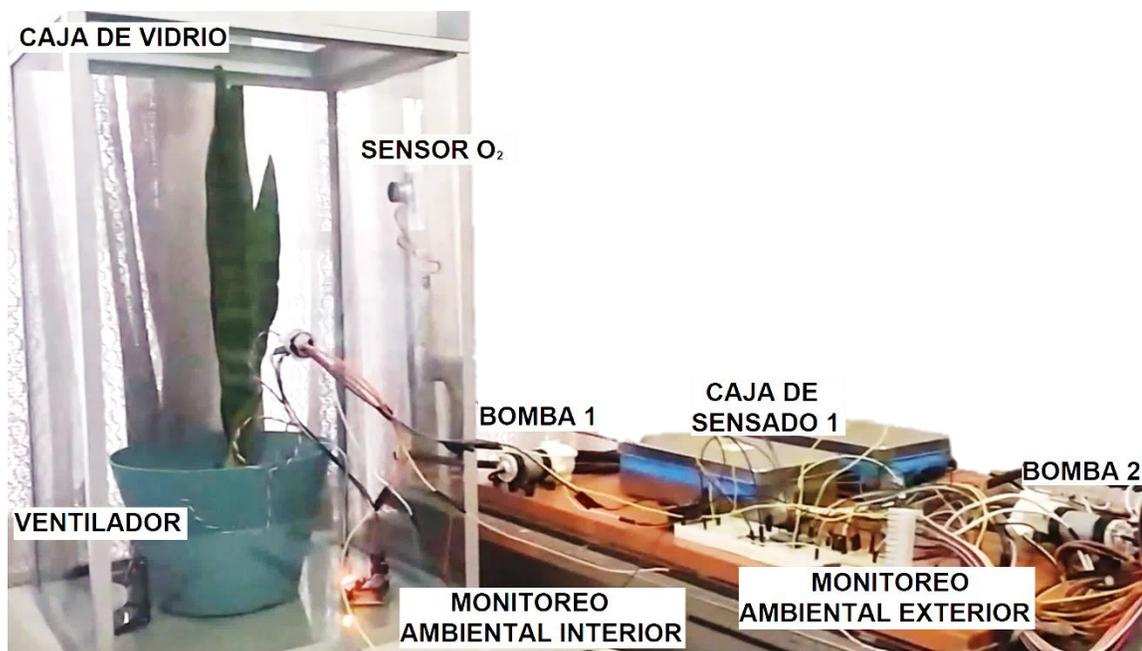
Caja de vidrio para el análisis de la fisiología de la planta.



Para observar los niveles de consumo de químico por parte de las plantas, se integró el sistema de sensado químico a la caja de vidrio. De esta forma, se conecta directamente la bomba 1 a la caja de vidrio para la absorción de aire y distribución en la caja de sensado, mientras que la bomba 2 se encarga de la limpieza de la caja de sensado al final del periodo de pruebas. El monitoreo de las condiciones ambientales se lo realiza al interior y exterior de la caja de vidrio. Finalmente, se coloca un ventilador en el interior de la caja de vidrio con el fin de mantener en circulación el aire dentro de la caja. En la Figura 37, se observa el sistema implementado y acondicionado para el análisis del consumo de contaminantes por parte de la planta.

Figura 37.

Implementación y acondicionamiento del sistema de sensado químico.

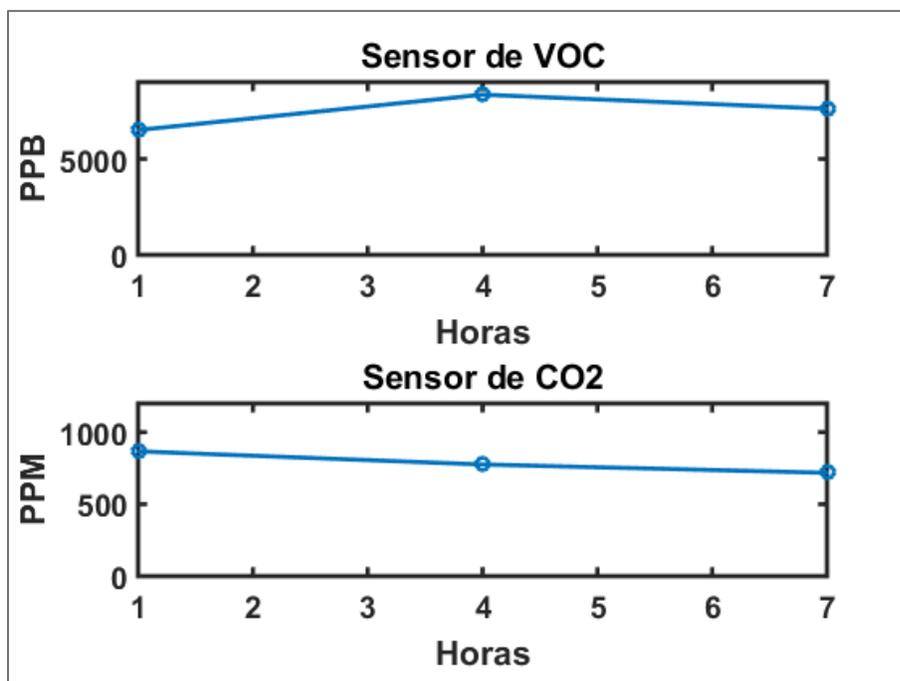


Con el fin de controlar las condiciones de difusión de los gases dentro de la caja, se realizó una prueba para analizar posibles pérdidas del químico en el interior de la caja, o el ingreso y fugas de aire desde el exterior de esta. El procedimiento de la prueba consistió en introducir en la caja de vidrio vacía un algodón con la mezcla de los químicos y observar la pérdida de concentración existente durante un periodo de tiempo de 7 horas. Utilizando el sensor de calidad del aire y el sensor de CO₂, se tomaron tres medidas de concentración en un intervalo de tres horas entre cada medición. A partir de estos tres valores se estimó la línea de comportamiento del químico en función del tiempo. En la Figura 38, se muestra el comportamiento de los gases durante un periodo de 7 horas. Se observa que en relación con la curva del sensor de VOC existe un incremento en el valor de concentración del gas entre la primera y la segunda muestra debido a la difusión del químico en la caja de vidrio. En el caso del sensor de CO₂ existe una pequeña disminución

del valor de concentración la cual es despreciable y se debe principalmente al gas extraído en cada muestra.

Figura 38.

Prueba de hermeticidad de la caja.



Con el objetivo de analizar si los químicos introducidos en la caja se adherían a la tierra, en la maceta o en las paredes de la caja, se realizaron pruebas para analizar las pérdidas de la concentración del químico en el ambiente. Para esto se utiliza una maceta con la misma cantidad de tierra similar a las macetas en las que están ubicadas las plantas. En el procedimiento se observa que no existe una disminución considerable del valor de concentración del químico durante 7 horas. Además, se repitió el procedimiento sellando la maceta con papel film sin observar una variación considerable de concentración, por lo que se desprecia el valor de la disminución de concentración por la presencia de la tierra.

4.4. Análisis de los procesos de biodepuración

Se sabe que las plantas son sistemas de biodepuración natural a partir de sus procesos fisiológicos. Por esto, para analizar el proceso de depuración del aire por medio de la planta, se la sometió a la interacción con diferentes químicos en un ambiente controlado. En relación con lo descrito en la sección 3.3.4, se decidió trabajar con los contaminantes volátiles que se presentan en mayor porcentaje en ambientes interiores. Se realizaron pruebas individuales con el CO₂, etanol, y acetona; adicional se realizó una prueba con la mezcla de estos gases a la que se incluyó tolueno. Considerando que las plantas son seres vivos y que sus procesos fisiológicos como la respiración tienen un comportamiento diferente con la presencia o ausencia de luz solar, se realizaron pruebas con el mismo químico en el día y en la noche para observar el consumo de contaminantes por parte la planta.

4.4.1. Metodología para el estudio del proceso de biodepuración

Como se mencionó, es importante recordar que las plantas son seres vivos, por lo que necesitan un tiempo de ambientación en el lugar en el que se realiza el estudio. Una vez colocada la planta dentro de la caja de vidrio, se realizan las pruebas para la determinación de la variación de concentración del químico al estar en interacción con la planta. Los químicos seleccionados son depositados en un algodón el cual sirve como fuente de emisión del gas contaminante en el sistema. Para estandarizar el procedimiento se depositan en el algodón 10 gotas del químico medidas con una jeringuilla de 10 ml equivalentes a 50 mg.

Se realizaron pruebas con periodos de monitoreo cada treinta minutos, en donde se observó que la absorción del aire hacia las cajas de sensado disminuye de manera considerable el nivel de concentración del químico en la caja de vidrio. Considerando que los procesos fisiológicos de las plantas son lentos, se determinó que el periodo de

monitoreo de la caja debe ser prolongado por varias horas. Por esto, se realizaron pruebas de 7 horas de duración con intervalos de sensado cada 3 horas.

Una vez depositado el algodón con el químico dentro de la caja, el sistema permanece en reposo durante una hora para que el químico se difunda de manera homogénea en toda la caja. Como se mencionó, para esto se ubicó un ventilador dentro de la caja de vidrio, el cual está encendido durante todo el proceso con el objetivo de mantener el aire interior en constante circulación.

El procedimiento de sensado consta de tres horas. En la primera hora el sistema permanece en reposo hasta asegurar la difusión homogénea de la fuente de gas en el interior de la caja. Posteriormente se enciende la bomba de ingreso del aire a la caja de sensado durante 3 minutos, tiempo necesario para llenar el volumen de la caja con el gas. Después de este tiempo, se apaga la bomba de ingreso del gas y el sistema permanece en reposo durante 57 minutos con el fin de que los sensores estén en contacto con el químico. En este periodo de tiempo se obtienen los valores de concentración máximos medidos al momento de la interacción del químico con los sensores. Para finalizar, se enciende la bomba de salida del aire durante 1 hora para realizar la limpieza de la caja de sensado. Este procedimiento de sensado se repite tres veces, registrando las concentraciones a la primera, cuarta y séptima hora de haber iniciado la prueba.

4.4.2. Pruebas y Resultados

A modo de resumen, las plantas seleccionadas para el estudio fueron la Lengua de Tigre (*Sansevieria Trifasciata*) y la Cuna de Moisés (*Spathiphyllum 'Mauna Loa'*). Los químicos utilizados fueron el CO₂, etanol, acetona, además de una mezcla de los gases en la que se incluyó tolueno. Para cada planta se realizó una prueba con cada químico durante el día y otra prueba en la noche, estableciendo los horarios de medición entre las 8 am a las 17 pm y desde las 20 pm hasta las 5 am del siguiente día.

En la Tabla 17 se muestra en detalle la planificación de las pruebas realizadas de acuerdo con horario, día, planta y químico en el que se realizó la medición. Entre cada prueba se tiene un periodo de descanso de 3 horas en el que se retira la fuente del gas para limpiar el aire interior, preparar el químico.

Tabla 17.

Planificación de las pruebas.

HORARIO	DÍA	PLANTA	QUÍMICO
Día	Día 1	Lengua de Tigre	Etanol
Noche	Día 1	Lengua de Tigre	Etanol
Día	Día 2	Lengua de Tigre	CO ₂
Noche	Día 2	Lengua de Tigre	CO ₂
Día	Día 3	Lengua de Tigre	Mezcla de gases
Noche	Día 3	Lengua de Tigre	Mezcla de gases
Día	Día 4	Cuna de Moisés	Etanol
Noche	Día 4	Cuna de Moisés	Etanol
Día	Día 5	Cuna de Moisés	CO ₂
Noche	Día 5	Cuna de Moisés	CO ₂
Día	Día 6	Cuna de Moisés	Mezcla de gases
Noche	Día 6	Cuna de Moisés	Mezcla de gases
Día	Día 7	Lengua de Tigre	Acetona
Noche	Día 7	Lengua de Tigre	Acetona
Día	Día 8	Cuna de Moisés	Acetona
Noche	Día 8	Cuna de Moisés	Acetona

A modo de ejemplo, en la Figura 39 se presenta el comportamiento del sensor de calidad del aire CCS811 durante la prueba, en la que se puede observar el tiempo que el

sistema permanece en reposo, el tiempo que los sensores están en contacto con el químico y el periodo de limpieza de la caja. Por su parte, en la Figura 40 se observa que en cada medida se toma una ventana de 20 datos de los valores máximos obtenidos en la curva de respuesta del sensor de los cuales se calcula el promedio para la estimación del valor de la concentración.

Figura 39.

Comportamiento del sensor CCS811.

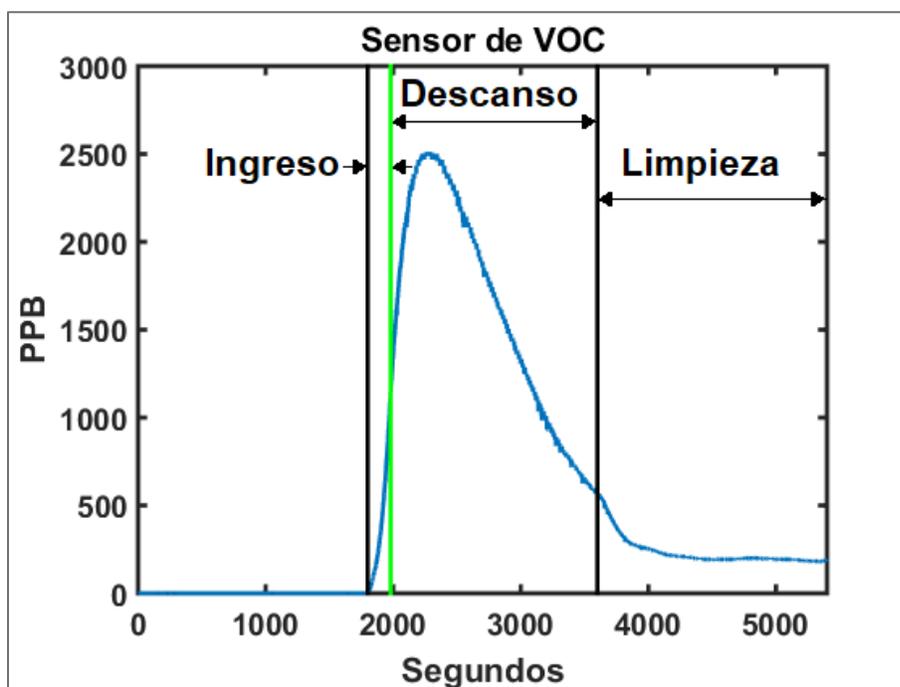
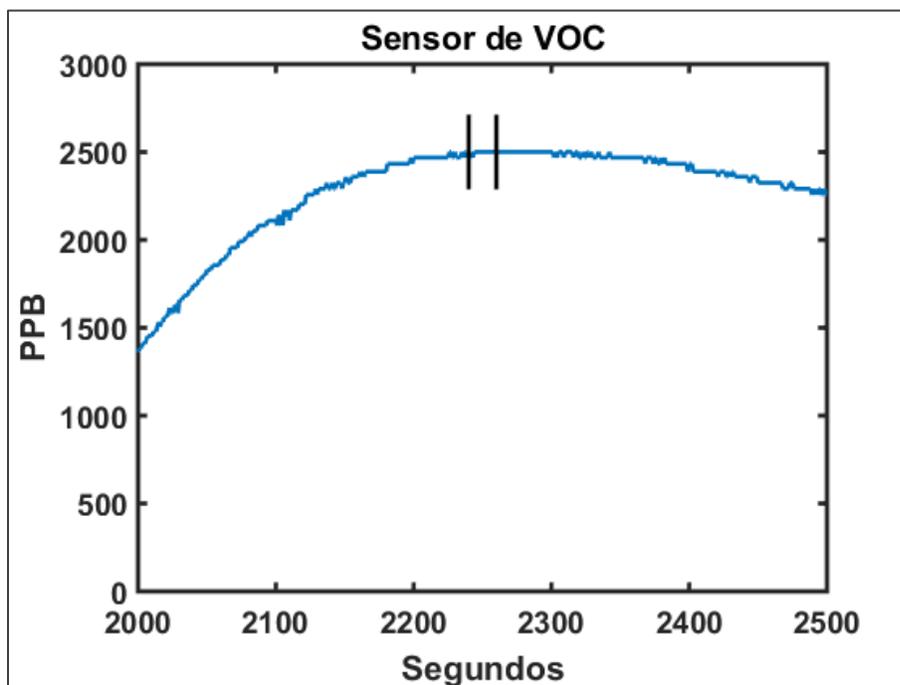


Figura 40.

Ventana con los valores máximos obtenidos durante la prueba.



Los valores obtenidos fueron escalados respecto al valor mínimo de cada prueba, con el objetivo de analizar solamente los cambios de concentración del químico a lo largo del tiempo. A manera de ejemplo, se presentan las gráficas de concentración de VOC y de CO₂ con la caja completamente vacía, con la caja solo con la maceta llena de tierra sin planta y con la planta como biodepurador. En la Figura 41 se presentan las gráficas de las pruebas realizadas con la mezcla de los gases, mientras que en la Figura 42 se muestran las gráficas de consumo de acetona respecto a la Lengua de Tigre y a la Cuna de Moisés.

Figura 41.

Comparativa de concentraciones de la mezcla de gases medidas con la caja vacía, la caja con maceta sin planta y con planta.

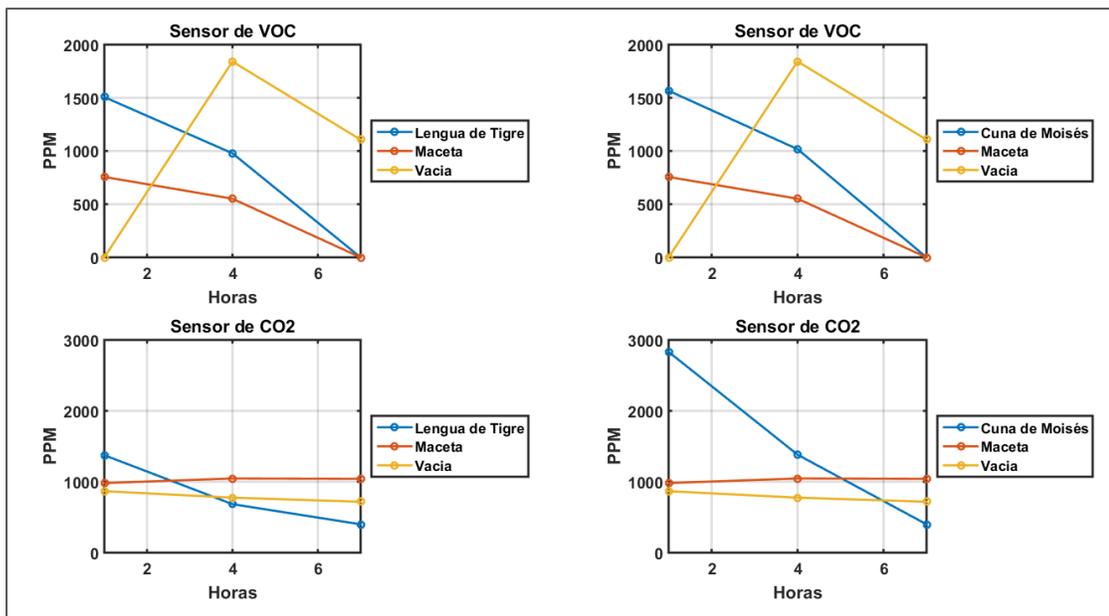
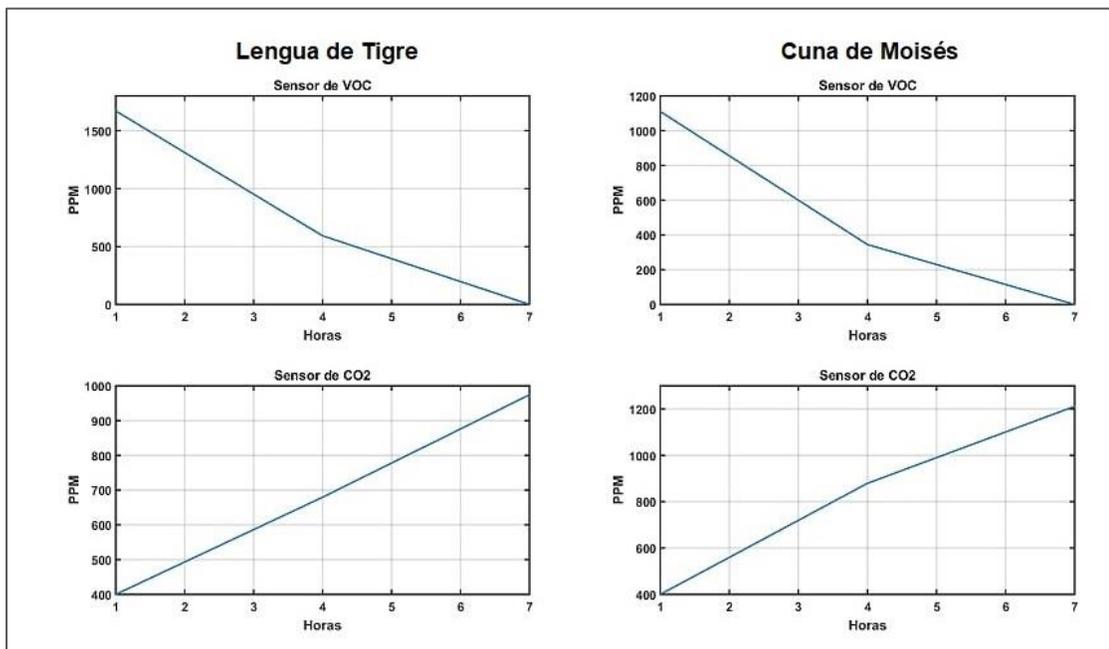


Figura 42.

Comparativa de las concentraciones de acetona medidas en una prueba.



En relación con el sensor de óxido metálico MQ-3, se observó que su respuesta alcanzaba su valor máximo de voltaje en todas las medidas realizadas ya que posee una alta sensibilidad, pero su rango de medida es reducido en relación con las concentraciones aplicadas. Los rangos de detección de los sensores MQ son muy pequeños en relación con el rango del sensor de calidad del aire CCS811 utilizado en el estudio, por lo que fue difícil determinar las concentraciones de los químicos adecuadas para las pruebas. Por tanto, considerando que los demás sensores utilizados para la determinación de concentración de los gases presentan mejores respuestas en las pruebas realizadas, se descartaron a los sensores MQ del sistema de sensado.

En la Tabla 18 se muestra los valores de concentración obtenidos en las pruebas realizadas con etanol para la Lengua de Tigre y la Cuna de Moisés. Como se mencionó, se realizó una prueba durante el día y una durante la noche para cada planta. En cada prueba se tomaron tres medidas en intervalos de tres horas. Se observa que la Lengua de Tigre sintetiza de mejor manera el etanol durante el día. Por el contrario, en el caso de las pruebas realizadas en la noche se ve una mejor respuesta de la Cuna de Moisés.

Tabla 18.

Valores de concentración medidos al exponer las plantas con etanol.

Químico	Planta	Sensor	Horario			Consumo
			1 hora	4 horas	7 horas	
	Lengua de Tigre		Día			
		O ₂	18.7 %	18.712 %	18.682 %	0.018 %
Etanol	Área de las hojas (444 cm ²)	TVOC	1765 ppb	696 ppb	60.2 ppb	1704.8 ppb
		CO ₂	400 ppm	795.2 ppm	1054.8 ppm	-654.8 ppm

Químico	Planta	Sensor	Horario			Consumo	
			1 hora	4 horas	7 horas		
Etanol	Lengua de Tigre Área de las hojas (444 cm ²)	Noche	O ₂	18.74 %	18.665 %	18.647 %	0.093 %
			TVOC	2202.5 ppb	49.3 ppb	0 ppb	2202.5 ppb
			CO ₂	400 ppm	837.5 ppm	838.9 ppm	-438.9 ppm
		Día	O ₂	18.685 %	18.682 %	18.657 %	0.028%
			TVOC	4354 ppb	3805 ppb	2787 ppb	1567 ppb
			CO ₂	400 ppm	498.8 ppm	687.15 ppm	-287.15 ppm
	Cuna de Moisés Área de las hojas (230 cm ²)	Noche	O ₂	18.692 %	18.670 %	18.617 %	0.075 %
			TVOC	3369 ppb	833.8 ppb	0 ppb	3369 ppb
			CO ₂	400 ppm	667.1 ppm	1010.6 ppm	-610.6 ppm

El resultado de las pruebas realizadas con dióxido de carbono se muestra en la Tabla 19. Se puede observar que la Cuna de Moisés presenta mejor respuesta durante las pruebas hechas en el día y la noche. Los valores obtenidos tienen una diferencia significativa respecto a los niveles de concentración sintetizados por la Lengua de Tigre.

Tabla 19.

Valores de concentración medidos al exponer las plantas con CO₂.

Químico	Planta	Sensor	Horario			Consumo		
			1 hora	4 horas	7 horas			
Día								
Dióxido de carbono	Lengua de Tigre	O ₂	18.387 %	18.485 %	18.572 %	-0.185 %		
		TVOC	26.20 ppb	56.30 ppb	42.20 ppb	-16 ppb		
		CO ₂	10529 ppm	4542 ppm	400 ppm	10129 ppm		
	Área de las hojas (444 cm ²)	Noche						
		O ₂	18.478 %	18.53 %	18.55 %	-0.072 %		
		TVOC	20.85 ppb	34.6 ppb	32.05 ppb	-11.2 ppb		
		CO ₂	16754 ppm	8967 ppm	400 ppm	16354 ppm		
		Día						
		Cuna de Moisés	O ₂	18.280 %	18.345 %	18.390 %	-0.11 %	
TVOC	19.1 ppb		7.8 ppb	9.25 ppb	9.85 ppb			
CO ₂	14422 ppm		6274 ppm	400 ppm	14022 ppm			
Área de las hojas (230 cm ²)	Noche							
	O ₂	18.577 %	18.575 %	18.562 %	0.015			
	TVOC	63.6 ppb	29.8 ppb	25.9 ppb	37.7 ppb			
	CO ₂	48731 ppm	22958 ppm	400 ppm	48331 ppm			

En las pruebas realizadas con la acetona se puede observar que los niveles de VOC en el ambiente son sintetizados de mejor forma por la Lengua de Tigre durante el día. Mientras que en la noche se muestra una mejor respuesta por parte de la Cuna de Moisés a la exposición de la acetona (ver Tabla 20).

Tabla 20.

Valores de concentración medidos al exponer las plantas con acetona.

Químico	Planta	Sensor	Horario			Consumo
			1 hora	4 horas	7 horas	
Día						
	Lengua de Tigre	O ₂	18.630 %	18.615 %	18.592 %	0.038 %
		TVOC	2667 ppb	1589.3 ppb	996.6 ppb	1670.4 ppb
		CO ₂	908 ppm	1187.5 ppm	1482.1 ppm	-574.1 ppm
	Área de las hojas (444 cm ²)		Noche			
		O ₂	18.675 %	18.632 %	18.625 %	0.05 %
		TVOC	1561.1 ppb	1468 ppb	1310 ppb	251.1 ppb
		CO ₂	1034.3 ppm	1210.3 ppm	1324.6 ppm	-290.3 ppm
Acetona			Día			
	Cuna de Moisés	O ₂	18.615 %	18.592 %	18.547 %	0.068 %
		TVOC	2476.2 ppb	1710.5 ppb	1365.8 ppb	1110.4 ppb
	Área de las hojas (230 cm ²)	CO ₂	817 ppm	1296.2 ppm	1628.3 ppm	-811.9 ppm
			Noche			
		O ₂	18.610 %	18.657 %	18.597 %	0.013 %
		TVOC	2667 ppb	1589.3 ppb	996.6 ppb	1670.4 ppb
		CO ₂	908 ppm	1187.5 ppm	1482.1 ppm	-574.1 ppm

Los resultados obtenidos en las pruebas realizadas con la mezcla de los gases se presentan en la Tabla 21. Se puede ver que los valores de concentración sintetizados de la mezcla durante el día son mejores en la Cuna de Moisés. Sin embargo, en las pruebas realizadas en la noche, la Lengua de Tigre tiene mejores resultados.

Tabla 21.

Valores de concentración medidos al exponer las plantas con la mezcla de los gases.

Químico	Planta	Sensor	Horario			Consumo
			1 hora	4 horas	7 horas	
Día						
Mezcla de gases (Etanol, acetona, tolueno, CO₂)	Lengua de Tigre	O ₂	18.435 %	18.525 %	18.537 %	-0.102 %
		TVOC	1506.6 ppb	978.3 ppb	0 ppb	1506.6 ppb
		CO ₂	1374.6 ppm	684.3 ppm	400 ppm	97.6 ppm
	Área de las hojas (444 cm ²)	Noche				
		O ₂	18.476 %	18.475 %	18.442 %	0.034%
		TVOC	996.2 ppb	713.3 ppb	0 ppb	996.2 ppb
	Área de las hojas (230 cm ²)	CO ₂	713.9 ppm	468.2 ppm	400 ppm	313 ppm
		Día				
		Cuna de Moisés	O ₂	18.537 %	18.575 %	18.580 %
	TVOC		1566.2 ppb	1017.2 ppb	0 ppb	1566.2 ppb
	CO ₂		2832.1 ppm	1382.1 ppm	400 ppm	2432.1 ppm
	Área de las hojas (230 cm ²)	Noche				
O ₂		18.635 %	18.630 %	18.627 %	0.008 %	
TVOC		0 ppb	86.4 ppb	34.2 ppb	-34.2 ppb	
Área de las hojas (230 cm ²)	CO ₂	1583.7 ppm	909.2 ppm	400 ppm	1183.7 ppm	

Finalmente, en la Tabla 22 se presentan los valores promedio obtenidos en las respuestas de los sensores de humedad relativa, temperatura ambiental, intensidad UV y presión barométrica. Estos valores fueron registrados como información complementaria para el análisis de los procesos de biodepuración de las plantas, pues

es importante monitorear las condiciones ambientales al interior y al exterior de la caja en las que se realizan las pruebas.

Tabla 22.

Valores promedio de los sensores ambientales durante las pruebas.

Magnitud	Acetona	Acetona	Etanol	Etanol	CO ₂	CO ₂	Mezcla	Mezcla
	día	noche	día	noche	día	noche	día	noche
Humedad								
relativa interior	95.808	80.099	93.738	96.485	96.953	96.986	93.625	92.896
Humedad								
relativa exterior	62.438	64.497	48.144	59.874	53.654	60.818	59.636	63.998
Presión								
barométrica	22.248	22.269	22.212	22.269	22.176	22.268	22.240	22.292
Temperatura								
ambiente	17.193	15.484	18.565	16.803	18.046	17.548	17.396	16.354
Índice de radiación UV								
	0.0263	0.0174	0.0386	0.0164	0.0293	0.0163	0.0275	0.0167

4.5. Sistema de biodepuración aplicado en ambientes interiores

En base a la bibliografía revisada, se sabe que la contaminación en ambientes interiores es una fuente de enfermedades en las personas que habitan estos inmuebles. Por esto, no es suficiente únicamente con monitorear la calidad del aire del ambiente interior, sino que es necesario tener un sistema que realice la limpieza y purificación del aire interior.

Los sistemas de biodepuración pueden aportar en el proceso de limpieza del aire en ambientes interiores en los que la contaminación puede provocar efectos negativos en la salud de las personas. Por esto, en los últimos años se han desarrollado y tomado interés nuevos sistemas de biodepuración con el fin de mejorar la calidad del aire y las condiciones de vida de las personas (Pedraza Ortiz, 2013; Pilon-Smits & Freeman, 2006).

4.5.1. Diseño e implementación del sistema de biodepuración

Se diseña un sistema de biodepuración natural con el objetivo de reducir los niveles de concentración de los contaminantes volátiles que se encuentran presentes en ambientes interiores. Este sistema está conformado por una planta que es la encargada de realizar el proceso de limpieza del aire, la cual se encuentra dentro de una caja de vidrio. El diseño del sistema de biodepuración integra el sistema de sensado químico, el sistema neumático y el sistema de adquisición de datos.

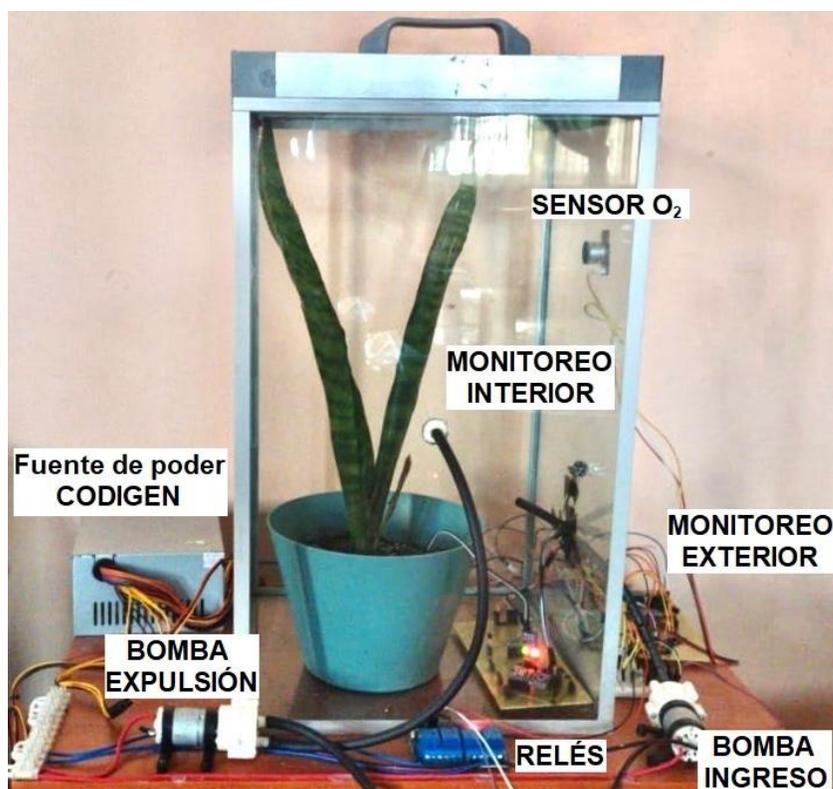
El sistema de sensado permite monitorear continuamente las condiciones de calidad del aire al interior y exterior del sistema de biodepuración. Para esto, se utilizan dos matrices de sensores idénticas ubicadas dentro y fuera de la caja de vidrio. Estas matrices se conforman por los sensores CCS811 para el monitoreo de la calidad del aire, el sensor SCD30 para la determinación del CO₂ y el sensor DS18B20 utilizado para monitorear la temperatura ambiental. Además, en el interior de la caja de vidrio se encuentra el sensor FC-28 para la medición de la humedad de la tierra, el sensor Si1145 utilizado para detectar los índices de luz UV que irradian en la planta, y el sensor ME2-O2-Φ20 para la medición del porcentaje de oxígeno dentro de la caja. Como se mencionó, se descartó del sistema de sensado a los sensores MQ ya que sus rangos de medición de concentración son muy bajos.

El sistema neumático es el encargado de realizar el intercambio del aire entre el interior y el exterior del sistema. Para esto se utilizan una bomba de ingreso de aire y otra

bomba para la expulsión del aire de la caja. Estas bombas se conectan a la caja de vidrio mediante mangueras ubicadas en caras diferentes de la caja. Las bombas son controladas por medio de relés y se encuentran fijadas en una base en el exterior del sistema. En la Figura 43, se observa el sistema de biodepuración implementado junto al sistema de sensado y monitoreo ambiental del interior y exterior a la caja.

Figura 43.

Sistema de Biodepuración.



En el proceso de calibración de los sensores químicos se ubicaron las matrices de sensores dentro de cajas herméticamente cerradas para mantener la concentración de los químicos y evitar la exposición prolongada de los sensores MQ a los químicos para no contaminar sus electrodos de medición. Una vez simplificado el sistema de sensado, se descartaron a los sensores MQ y se eliminaron las cajas de sensado dejando

expuestos los sensores directamente al ambiente. Con el objetivo de monitorear continuamente la calidad del aire en el exterior e interior del sistema, el sistema de adquisición y control de datos trabaja con un periodo de muestreo de 2 segundos.

El sistema de control está basado en un control por diferencias, en el que se compara continuamente el estado del aire exterior con el interior. Para el diseño del controlador se consideraron los valores de concentración obtenidos por los sensores de calidad de aire y CO₂. El controlador compara constantemente los valores de concentración de CO₂ y de VOC entre el interior y exterior de la caja, realizando un intercambio de aire cuando se cumplan las condiciones. El intercambio de aire entre el interior y el exterior del sistema se produce cuando la concentración de CO₂ en el exterior de la caja es superior a las 1000 ppm y en el interior su concentración es menor a 850 ppm. Por su parte el sistema realizará el intercambio de aire cuando la concentración de contaminantes supera las 1000 ppb de VOC en el exterior y en el interior la concentración sea menor a 100 ppb. Si cumple al menos una de las condiciones el sistema se activará permitiendo el intercambio del aire. El intercambio de aire se realiza durante una hora en la que la bomba de ingreso y la bomba de expulsión se encienden de manera simultánea, tiempo necesario para llenar el volumen de la caja de vidrio. Para la selección de los valores se tomó en consideración los parámetros establecidos en el Capítulo 2, Tabla 4 en donde se indican los límites de concentración recomendados para ambientes de interior,

4.5.2. Pruebas y resultados

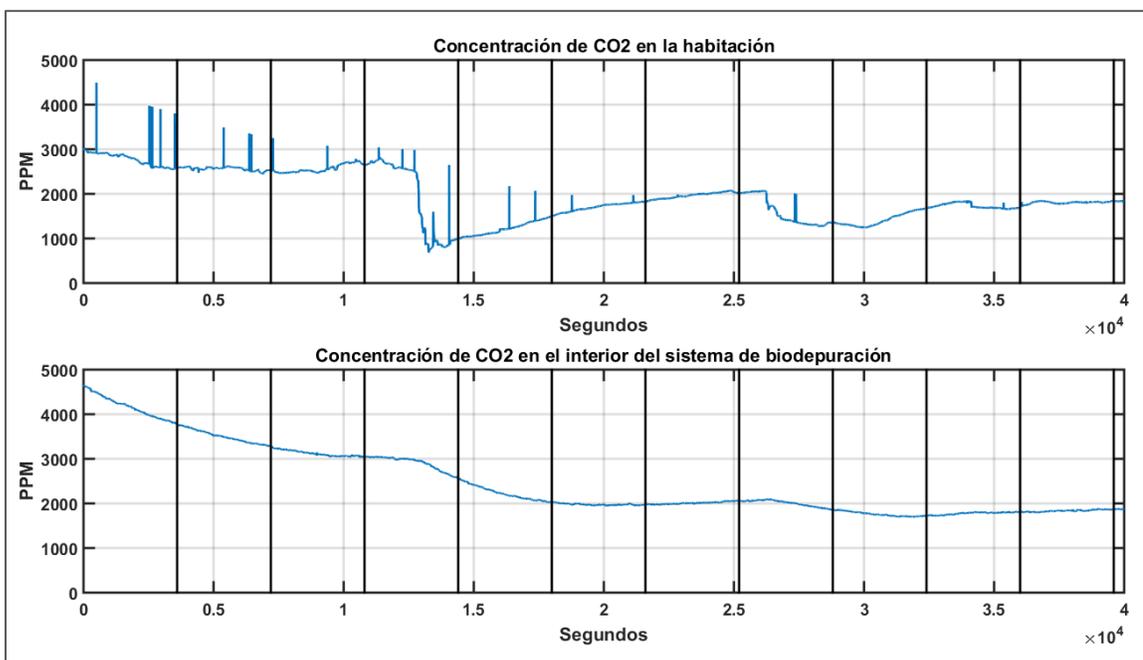
Una vez implementado el sistema de biodepuración, se realizaron dos pruebas del sistema en ambientes reales. A pesar de que en el análisis de la fisiología de las plantas no existió una gran diferencia en la eficiencia del consumo de los diferentes gases por parte de cada una de las plantas, se decidió trabajar con la Lengua de Tigre debido

a que presentó una mejor adaptación al ambiente en comparación con la Cuna de Moisés. Las pruebas se realizaron en una casa con dos ambientes de alto uso por las personas como el dormitorio y la sala - comedor. Como se mencionó, se tomó un tiempo de 3 días para la adaptación de la planta a los ambientes de prueba. Para las pruebas se realizaron las actividades cotidianas en la casa con el fin de observar el comportamiento real del sistema.

La primera prueba se realizó en un dormitorio unipersonal de 15 m², misma que posee una ventana sin apertura y una puerta como sistema de ventilación. En la Figura 44 a, se observa la variación de los valores de concentración de CO₂ en la habitación durante un periodo de 10 horas. En el inicio de la prueba el nivel de CO₂ alcanza los 3000 ppm, siendo este valor superior al nivel de concentración recomendado para ambientes interiores descrito en la Tabla 4. Se observa una caída pronunciada del valor de CO₂ la cual se debe a que en ese momento hubo la apertura de la puerta del dormitorio. En la Figura 44 b, se observan los niveles de concentración de CO₂ al interior del sistema de biodepuración. En el momento de realizar el sellado de la caja, la concentración de CO₂ alcanza las 4500 ppm y a pesar de que a lo largo del tiempo se observa la disminución de la concentración de CO₂, estos valores no alcanzan a los niveles necesarios para realizar el intercambio del aire interior con el aire de la habitación.

Figura 44.

a) Concentración de CO_2 en el dormitorio al exterior de la caja, b) Concentración de CO_2 en el dormitorio al interior del sistema de biodepuración.

a)**b)**

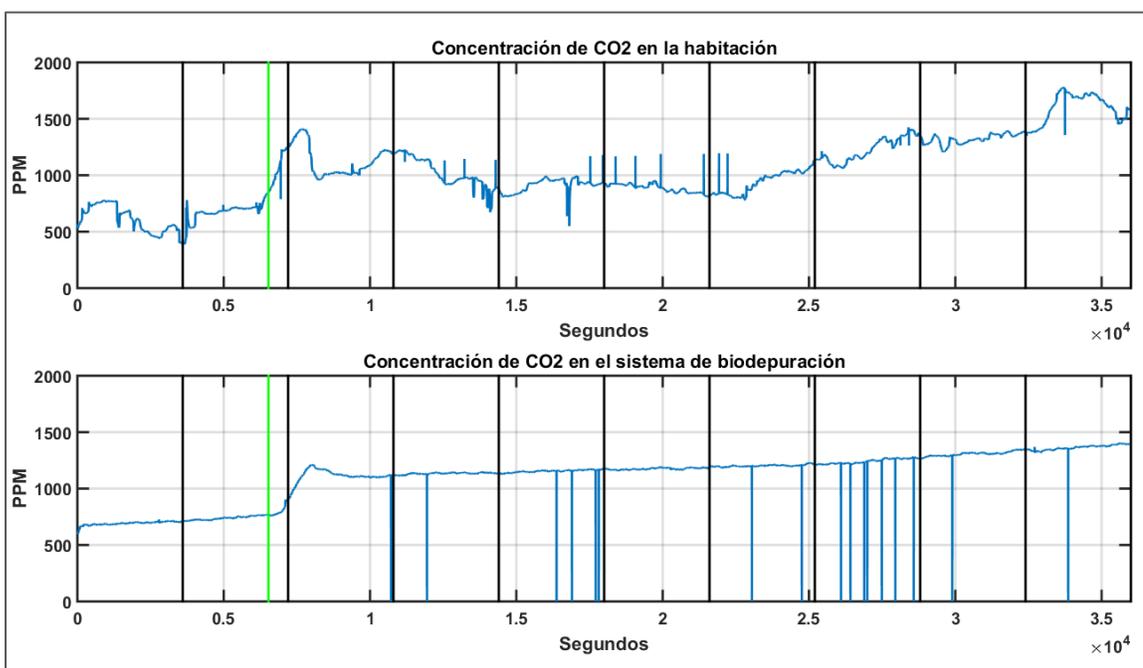
La segunda prueba se la realizó en la sala - comedor de la casa de 30 m², la cual cuenta con dos ventanas y dos puertas para la ventilación del aire interior. En la Figura 45, se observa la variación de los valores de concentración de CO_2 en un periodo de 10 horas. Debido a que la habitación cuenta con varias puertas y ventanas, el valor de concentración inicial es de 600 ppm aproximadamente como se observa en la Figura 45 a. Este nivel de concentración aumenta en relación a la cantidad de personas presentes en la habitación. La Figura 45 b, muestra los niveles de concentración de CO_2 en el interior del sistema de biodepuración. A los 100 minutos de inicio de la prueba se cumplió la condición para el intercambio del aire entre la sala y el sistema de biodepuración descrita

en la sección 4.5.1. En la gráfica se observa marcado con una línea verde el momento en que el sistema de biodepuración inicia el proceso de intercambio de aire.

Figura 45.

a) *Concentración de CO₂ en la sala - comedor al exterior de la caja, b) Concentración de CO₂ en la sala - comedor al interior del sistema de biodepuración.*

a)



b)

Considerando que la planta seleccionada tiene un área efectiva de sus hojas aproximado a 444 cm² y tiene un consumo aproximado de 10129 ppm de CO₂ en un periodo de 7 horas, es decir se estima que la planta consume un aproximado de 1447 ppm de CO₂ en una hora. Adicional, conociendo que el dormitorio tiene un volumen de 33 m³ y un valor máximo de concentración de 3000 ppm de CO₂, y que la sala tiene 66

m³ de volumen y 1800 ppm de concentración máxima de CO₂, se observa que la planta es muy pequeña en relación al volumen de las habitaciones y de acuerdo con los valores de concentraciones de CO₂ es insuficiente el área efectiva de hoja para los procesos de biodepuración, siendo necesario incrementar el número de plantas.

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

En el presente trabajo de investigación se desarrolló un sistema de biodepuración para ambientes interiores. Previo a esto se realizó el análisis bibliográfico de los principales contaminantes que afectan la calidad del aire en los ambientes interiores, de los cuales se seleccionaron para este estudio al CO, CO₂, etanol, acetona y tolueno. En base a estos químicos se diseñó e implementó un sistema de sensado químico. Para ello, se ubicó a los sensores seleccionados en una matriz que se encontraba dentro de una caja de sensado herméticamente cerrada. Debido a que los sensores seleccionados no eran especializados, se realizó la calibración de estos en función de cada químico para obtener sus curvas de comportamiento. De acuerdo con las curvas de calibración se escogió a los sensores con mejor rendimiento para ser utilizados en el sistema de sensado químico.

Conociendo que las plantas son el principal sistema de biodepuración natural, se realizó un análisis bibliográfico sobre las principales plantas utilizadas en los procesos de biodepuración en ambientes interiores, de las cuales, para este estudio se seleccionó a las plantas ornamentales Lirio de la paz (*Spathiphyllum 'Mauna Loa'*) y Lengua de tigre (*Sansevieria trifasciata 'Laurentii'*). En base al sistema de sensado químico se analizó el consumo de contaminantes por parte de las plantas a partir de sus procesos fisiológicos. Para ello, se integró el sistema de sensado químico en una caja de vidrio en la que se colocó a la planta. Se realizaron varias pruebas durante el día y la noche para observar el comportamiento de las plantas ante la exposición a cada químico.

Con los resultados obtenidos se diseñó e implementó el sistema de biodepuración. Se desarrolló un sistema de control basado en un control por diferencias en base a los

niveles límites recomendados de concentración de contaminantes ambientales para interiores y se comprobó el funcionamiento del sistema ubicándolo en ambientes reales como un dormitorio y una la sala-comedor, monitoreando el nivel de contaminación del aire en las habitaciones.

5.1. Sistema de sensado químico

Se realizó el análisis bibliográfico de los principales contaminantes que afectan la calidad del aire en ambientes interiores, para establecer las bases de selección de los sensores químicos. Se determinó que no es únicamente un químico el que afecta la calidad del aire en ambientes interiores, sino que es una mezcla de contaminantes los cuales pueden provocar efectos negativos en la salud humana.

En base al estudio bibliográfico y a la selección de los químicos de estudio, se realizó una selección de sensores químicos de óxido metálico y ópticos, mismos que fueron seleccionados de acuerdo a su desempeño y costo. Se diseñó e implementó dos matrices de sensores idénticas para analizar el comportamiento de los sensores frente a los diferentes químicos. Finalmente se construyó un sistema de sensado químico en el que se encuentran las matrices de sensores ubicadas dentro de dos cajas herméticamente cerradas, un sistema neumático que permite el ingreso y expulsión del químico desde las cajas de sensado, y un sistema de control y adquisición de datos.

El uso de cajas herméticamente cerradas para la determinación de las curvas de calibración de los sensores se debe a que en el ambiente puede existir diferentes contaminantes a los que se está analizando, y esto puede producir errores o perturbaciones en la medición. Por esto es importante que, para la construcción y sellado de los sistemas de sensado químico se utilice materiales que no sean una fuente de emisión de otro tipo de contaminantes ambientales. Por lo que se recomienda evitar el

uso de pegamentos instantáneos como silicona y reemplazarlos por tornillos o elementos de ajuste.

Debido a que los sensores de óxido metálico poseen una resistencia de calentamiento, se prevé que la temperatura dentro de las cajas de sensado aumente llegando a niveles fuera de los rangos de trabajo del sensor. Por lo que se realizaron diferentes pruebas descritas en la sección 3.4.1 en la Figura 17 y Figura 18, en donde se determinó que no era necesario un sistema de enfriamiento ya que la temperatura promedio obtenida en las pruebas era de 31.6 °C dentro de la caja de sensado 1 y 30.9 °C de la caja de sensado 2, encontrándose dentro del rango de temperatura de trabajo de los sensores. A pesar de esto se recomienda tener un constante monitoreo de la temperatura de las cajas o cámaras de sensado, debido a que las pruebas de calibración de los sensores deben mantenerse en esa temperatura garantizando el funcionamiento adecuado de los sensores.

Debido a que los químicos utilizados en el proceso de calibración de los sensores se encontraban en estado líquido y sólido, se realizó el cálculo teórico de los valores de concentración en ppm de acuerdo con el peso medido en mg de cada químico. Estos químicos fueron pesados y depositados en una bombona de vidrio como se indica en la sección 3.4.1. como fuente de emisión de gas. A pesar de los protocolos usados y del cuidado al preparar los químicos en algunos casos se detectaron errores de concentración de los gases, por lo que se recomienda trabajar con tanques o bombonas con valores de concentración de químicos establecidos para estandarizar los procesos y evitar pérdidas de concentración por la manipulación del químico durante las pruebas.

Para cada uno de los químicos seleccionados se realizaron varios experimentos con diferentes valores de concentración con el fin de obtener la curva característica de respuesta de cada sensor. Debido a que el sistema de sensado estuvo conformado por

dos cajas de sensores, se obtuvo dos curvas de calibración para cada sensor, cabe mencionar que las curvas de los mismos sensores en cajas diferentes son muy parecidas. A partir de los valores de respuesta obtenidos por cada sensor se realizó un ajuste de curvas en base a un modelo de regresión lineal en Matlab. El análisis de las curvas obtenidas se realizó tomando en cuenta dos valores estadísticos que son el R^2 y el p-valor como se muestran en la sección 3.4.2. Se utilizó este modelo de regresión lineal ya que los valores obtenidos de R^2 son mayores a 0.89 determinando que el ajuste de las curvas era correcto. A pesar de que las hojas técnicas de los sensores sugieren curvas logarítmicas características de sensibilidad para los diferentes químicos, la correcta selección de la resistencia de carga en el módulo de instrumentación del sensor permitió estimar las curvas de calibración con una función lineal.

Una vez realizadas las pruebas y analizados los valores estadísticos de ajuste se seleccionó un sensor para el registro de cada químico. Por esto, para la detección del CO se escogió al sensor CCS811 con un valor de R^2 de 0.905 y un p-valor de $3.06e-13$, el cual presenta mejor rendimiento en relación con los sensores MQ. Para el etanol se escogió al sensor MQ-3 cuyo valor de R^2 es de 0.95 con un p-valor de $7.96e-12$ que corrobora las recomendaciones establecidas por el fabricante. Ya que de los sensores seleccionados no se cuenta con un sensor especializado en la detección de acetona, se seleccionó al sensor MQ-9 con un valor de R^2 de 0.971 y un p-valor de $8.64e-10$. En el caso del tolueno se escogió al sensor MQ-135 cuyo R^2 es de 0.891 con p-valor $1.26e-07$. En el caso del CO_2 se estimó la curva de calibración del sensor óptico SCD30 con un valor de R^2 de 0.954 y un p-valor de $2.01e-28$. En base a esto se construyó un sistema de sensado que permite registrar a todos los químicos seleccionados en el estudio con una alta exactitud.

En particular para el CO₂ se seleccionó un sensor óptico debido a su desempeño frente a los de óxido metálico. En base a los resultados obtenidos se comprobó su adecuado funcionamiento, ya que al compararlo con el resto de sensores, se observó un valor de R² mucho más próximo a uno que el resto de sensores, lo que representa un mejor ajuste en la estimación de sus curvas de calibración. Además, la respuesta de este sensor es más estable y menos susceptible a los cambios de temperatura y humedad con relación a los sensores de óxido metálico.

Se debe mencionar que los sensores de óxido metálico tales como los sensores MQ y el sensor de calidad del aire CCS811 no reaccionaron al interactuar con el CO₂ generado por el hielo seco, debido a que es CO₂ orgánico, por lo que los valores obtenidos de concentración de TVOC por parte del sensor CCS811 al ser expuesto a hielo seco fueron muy bajos. Se recomienda para trabajos futuros realizar el análisis de los sensores de óxido metálico al interactuar con CO₂ generado por la respiración humana.

A partir de los resultados obtenidos en el sistema de sensado químico y de las curvas de calibración de los sensores, se observó que existe una gran diferencia entre los rangos y sensibilidades de medida entre los sensores MQ y el sensor de calidad de aire CCS811. En particular, la respuesta obtenida de los sensores MQ saturaba ante la mínima exposición a los químicos, lo que no sucedió con la respuesta del sensor CCS811. Debido a la diferencia de rangos de medición de concentración de químicos, y considerando que el sensor CCS811 tiene un mayor rango de detección, se descartó a los sensores MQ del sistema de sensado químico. La única excepción fue el sensor MQ-3 el cual se lo utilizó por sus recomendaciones para la detección de alcohol.

Debido a que los sensores de óxido metálico no son específicos para un solo químico, esto representa que, para la medición de varios químicos de manera simultánea el sistema de sensado requiera una mayor cantidad de sensores aumentando el consumo

de corriente y generando un aumento de temperatura en las cajas de sensado. Se recomienda para trabajos futuros el uso de sensores implementados en sistemas microelectromecánicos que permiten integrar a varios sensores en un solo chip compacto optimizando espacio y consumo de potencia.

5.2. Análisis de la fisiología de las plantas

En base a la bibliografía revisada y a los resultados del sistema de sensado químico, se diseñó e implementó un sistema que permite el análisis de la fisiología de la planta ante la exposición a diferentes químicos. Se obtuvo un sistema automatizado y monitoreado en el que la planta se encuentra aislada en una caja de vidrio transparente y hermética que permite la interacción del gas seleccionado con la planta sin la perturbación de químicos externos o corrientes de aire.

Los químicos utilizados para el estudio de la fisiología de las plantas fueron el etanol, CO₂, acetona y tolueno. Se realizaron pruebas durante el día y la noche con diferentes valores de concentración de los químicos en donde se observó el comportamiento y reacción de las plantas ante la exposición de los contaminantes. Inicialmente se realizaron pruebas de sensado cada 30 min sin observar cambios considerables en las concentraciones debido a los procesos propios de la planta, sin embargo, se observó una reducción en los niveles de concentración de los contaminantes debido a la continua inhalación de aire de la baja de la planta para el muestreo. En base a esta primera prueba realizada con el sistema se observó que los procesos fisiológicos de las plantas son muy lentos, por lo que se aumentó el tiempo de registro de los procesos de la planta con periodos de muestres de 8 horas. Finalmente, se estableció el protocolo de medición con un periodo de prueba de 7 horas con intervalos de 3 horas para el registro de los valores de concentración de contaminantes en el interior de la caja.

El análisis de la fisiología de las plantas se realizó tomando en cuenta los valores de incremento y consumo de la concentración de TVOC y de CO₂, los cuales se detallan en la sección 4.4.2. En la prueba realizada con etanol durante el día se observó que la Lengua de Tigre sintetizó 1704.8 ppb de TVOC, mientras que la Cuna de Moisés tuvo un consumo de 1567 ppb. Además, en relación al CO₂ la Lengua de Tigre generó 654.8 ppm y la Cuna de Moisés 287.15 ppm. Durante la noche, la Lengua de Tigre sintetizó 1567 ppb de TVOC mientras que la Cuna de Moisés consumió 3369 ppb. La Lengua de Tigre generó 438.9 ppm de CO₂ mientras que la Cuna de Moisés generó 610.6 ppm. Se observó que debido al proceso de depuración las plantas generan pequeñas cantidades de CO₂, durante el día la Lengua de Tigre tiene una mayor generación de CO₂ a diferencia de la noche en donde la Cuna de Moisés generó más CO₂. La importancia de esta prueba radica en el análisis del consumo de etanol observando que en el día la Lengua de Tigre sintetizó de mejor manera el químico mientras que en la noche la planta con mayor consumo de etanol fue la Cuna de Moisés. Adicional a esto, se debe considerar que la Lengua de Tigre (444 cm²) tiene aproximadamente el doble de área de hoja que la Cuna de Moisés (230 cm²), con lo que se observó aún más la eficiencia de la Cuna de Moisés al sintetizar el etanol.

En la prueba realizada con el CO₂, en el día la Lengua de Tigre generó 16 ppb de TVOC mientras que la Cuna de Moisés sintetizó 9.86 ppb de TVOC. En cuanto a la concentración de CO₂, se observó que la Lengua de Tigre consumió 10129 ppm y la Cuna de Moisés sintetizó 14022 ppm. Por la noche la Lengua de Tigre generó 11.2 ppb de TVOC mientras que la Cuna de Moisés consumió 37.7 ppb de TVOC. Además, la Lengua de Tigre sintetizó 16354 ppm de CO₂ y la Cuna de Moisés 48331 ppm de CO₂. Al analizar el consumo de CO₂ por parte de las plantas, se observó que durante las pruebas

realizadas en el día y la noche la planta con mejor rendimiento fue la Cuna de Moisés a pesar de su menor área efectiva.

En las pruebas realizadas con acetona durante el día se observó que la Lengua de Tigre sintetizó 1670.4 ppb de TVOC mientras que la Cuna de Moisés tuvo un consumo de 1110.4 ppb de TVOC. La Lengua de Tigre generó 574.1 ppm de CO₂ mientras que la Cuna de Moisés generó 811.9 ppm de CO₂. En las pruebas realizadas en la noche se observó que la Lengua de Tigre consumió 251.1 ppb de TVOC mientras que la Cuna de Moisés sintetizó 1670.4 ppb de TVOC. En relación con el CO₂, la Lengua de Tigre generó 290.3 ppm de CO₂ y la Cuna de Moisés 574.1 ppm de CO₂. En general, la Lengua de Tigre sintetizó de mejor manera la acetona durante el día mientras que por la noche la Cuna de Moisés. Sin embargo, se observó que, durante las pruebas realizadas en el día y la noche la Cuna de Moisés generó mayores niveles de concentración de CO₂.

Finalmente, se utilizó una mezcla de gases compuesta por etanol, CO₂, acetona y tolueno observando que en el día la Lengua de Tigre sintetizó 1506.6 ppb de TVOC y la Cuna de Moisés 1566.2 ppb de TVOC. En el caso del CO₂, se observó que en el día la Lengua de Tigre sintetizó 97.6 ppm de CO₂ mientras que la Cuna de Moisés consumió 2432.1 ppm de CO₂. En las pruebas realizadas en la noche la Lengua de Tigre consumió 996.2 ppb de TVOC, mientras que la Cuna de Moisés generó 34.2 ppb de TVOC. En cuanto a la concentración de CO₂, la Lengua de Tigre sintetizó 313 ppm mientras que la Cuna de Moisés consumió 1183.7 ppm. En las pruebas realizadas durante el día no existe una diferencia significativa en el consumo de TVOC entre las dos plantas, a diferencia de la noche en la que la Lengua de Tigre tiene un notable rendimiento al sintetizar los químicos.

De acuerdo a los resultados obtenidos no existe marcada diferencia en el proceso de biodepuración entre las dos plantas seleccionadas, sin embargo, se observa que en

general la Cuna de Moisés tuvo mejor rendimiento al sintetizar los diferentes químicos a pesar de tener menor área efectiva aproximada de sus hojas en comparación con la Lengua de Tigre. En contraparte, se observó que la Lengua de Tigre es menos sensible a los cambios de ambiente, manteniendo sus características lo que no sucedió con la Cuna de Moisés. En consideración a lo mencionado, se decidió utilizar a la Lengua de Suegra para el Sistema de Biodepuración.

5.3. Sistema de biodepuración

A partir de la integración del sistema de sensado químico junto con el análisis de la fisiología de las plantas, se diseñó e implementó el sistema de biodepuración para ambientes interiores. Se obtuvo un sistema robusto capaz de monitorear la calidad del aire de una habitación, medir las condiciones ambientales dentro de un ambiente cerrado en donde se encuentra la planta y controlar el intercambio de aire entre la habitación con el sistema de biodepuración en función de la comparación de los niveles de contaminantes, permitiendo así la limpieza del aire.

De todos los sensores químicos, para el sistema de biodepuración se seleccionó el sensor de óxido metálico CCS811 para la calidad del aire debido a su buen rendimiento durante las pruebas de calibración de los sensores y en el análisis de la fisiología de las plantas, por lo que de los sensores de óxido metálico se utilizó únicamente a este sensor en el sistema de biodepuración eliminando a los sensores MQ. Al igual que el sensor de calidad del aire, se utilizó el sensor óptico SCD30 para la detección de concentraciones de CO₂ por su eficiencia y exactitud durante las pruebas realizadas. Si bien a partir de este sistema de sensado no es posible realizar una detección individual de cada uno de los químicos, se obtuvo un sistema capaz de medir el total de contaminantes orgánicos volátiles y determinar la concentración de CO₂ permitiendo generar un sistema de control más sencillo y eficiente.

Durante las pruebas se monitoreo también la temperatura, humedad, intensidad lumínica y presión barométrica del sistema para comprobar que las condiciones ambientales de las pruebas sean estables y no se presenten condiciones extremas que puedan cambiar el comportamiento de la planta. Se recomienda que en trabajos futuros se diseñen sistemas en los que se monitoreen y se controlen las condiciones ambientales que inciden en la planta analizando la correlación que existe entre estas variables ambientales y la eficiencia de la planta como sistema de biodepuración.

Para el diseño del controlador se tomó como variable principal del sistema al nivel de concentración de CO₂, ya que, de acuerdo a la revisión bibliográfica este contaminante se encuentra presente en gran cantidad en los ambientes interiores debido a que es generado por la respiración humana y actividades cotidianas. El sistema de control se realizó a partir de un control por diferencias en el que se comparan las condiciones ambientales de la habitación con las condiciones de calidad del aire recomendadas con se muestra en la sección 4.5.1. De acuerdo al análisis fisiológico de las plantas se observó que sus procesos fisiológicos son lentos, por lo que para el sistema de biodepuración no es necesario un sistema de control robusto, siendo suficiente la aplicación de un controlador ON/OFF. Por esto, para el diseño y construcción de sistemas de biodepuración es más importante el uso de sistemas de ventilación más eficientes que el desarrollo un sistema de control muy elaborado.

Una vez implementado el sistema de biodepuración se lo ubicó en dos ambientes de uso cotidiano para analizar el proceso de limpieza del aire por parte de las plantas. En la prueba realizada en el dormitorio se observó que la calidad del aire dentro de esta habitación alcanzaba los 3000 ppm de CO₂, sobrepasando los límites de concentración recomendados. A partir de la Figura 44, se observó que el proceso de biodepuración de la planta no es eficiente, ya que no logró sintetizar el contaminante para alcanzar los

niveles de concentración requeridos para realizar el intercambio de aire. Esto también se observó en la prueba realizada en la sala (ver Figura 45), ya que, a pesar de que el sistema si realizó el intercambio del aire, el valor final de concentración de CO₂ dentro del sistema de biodepuración supera las 1000 ppm. En base a esto, se observa que el proceso de limpieza del aire no ha sido eficiente ya que la planta no logró sintetizar la concentración de CO₂ en valores menores a 1000 ppm dentro del sistema de biodepuración. De acuerdo con estos resultados y tomando en cuenta que el área efectiva aproximada de la planta es de 444 cm² y que las habitaciones sobrepasan los 33 m³ de dimensión, se observó que la planta es muy pequeña para realizar la limpieza del aire de la habitación en relación con sistemas de ventilación comunes.

Los sistemas de biodepuración basados en plantas, son sistemas que consumen menor cantidad de energía en relación con sistemas de ventilación eléctricos, mecánicos o mixtos. Además, uno de los conceptos utilizados dentro de la arquitectura moderna es la integración de plantas en ambientes interiores como, por ejemplo, el diseño de paredes o galerías verdes en las que se utilizan plantas ornamentales, así como el diseño de jardines en ambientes interiores han sido utilizados especialmente en hospitales, edificios y hogares. Por esto, el desarrollo de sistemas de biodepuración basados en plantas, además de colaborar con el proceso de limpieza del aire, permite a los habitantes tener interacción con otros seres vivos lo cual mejora la calidad de vida, reduce el estrés y aumenta la productividad.

Para trabajos futuros se puede recomendar el diseño de sistemas de biodepuración mixtos que consten de sistemas de ventilación y plantas. Además de analizar el comportamiento de los sistemas con el aumento del número de plantas en función del área de la habitación en la que se encuentre el sistema de biodepuración.

Referencias bibliográficas

- Adafruit. (2009). *Air Quality Sensors*. <https://www.adafruit.com/category/897>
- Adafruit. (2014a). *Flora UV Index Sensor - Si1145 Light Sensor*.
<https://www.adafruit.com/product/1981>
- Adafruit. (2014b). *HTU21D-F Temperature & Humidity Sensor Breakout Board*.
<https://www.adafruit.com/product/1899>
- Adafruit. (2014c). *MPL3115A2 - I2C Barometric Pressure/Altitude/Temperature*.
<https://www.adafruit.com/product/1893>
- Adafruit. (2017). *CCS811 Air Quality Sensor Breakout*.
<https://www.adafruit.com/product/3566>
- ams AG. (2012). *Sensor Solutions*. <https://ams.com/ams-start>
- Berenguer Subils, M. J., Guardino Solá, X., Hernández Calleja, A., Martí Solé, M. C.,
 Nogareda Cuixart, C., & Solé Gómez, M. D. (1992). El Síndrome del Edicio
 Enfermo. Metodología de evaluación. In *Montajes e instalaciones* (Instituto, pp. 49–
 54).
- Bidwell, R. (1993). *Fisiología vegetal*. [http://www.sidalc.net/cgi-
 bin/wxis.exe/?IsisScript=DIGITA.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=000703](http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=DIGITA.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=000703)
- Bionaire. (2020). *Purificador de aire de torre con filtro tipo HEPA BAP1700*.
<http://www.bionaire.com.es/Product.aspx?cid=122&pid=7570>
- Blueair. (2020). *Blueair Classic 203 Slim Air Purifier*. [https://www.blueair.com/us/air-
 purifiers/blueair-classic-203-slim](https://www.blueair.com/us/air-purifiers/blueair-classic-203-slim)

- Castañeda, L. (2018). Sensores de gases basados en semiconductores. *Scielo.Org.Mx*, 33, 1–16. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-97532018000300004
- Castell, N., Dauge, F. R., Schneider, P., Vogt, M., Lerner, U., Fishbain, B., Broday, D., & Bartonova, A. (2017). Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates? *Environment International*, 99, 293–302. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.12.007>
- Chang, Y., Qu, H., Duan, X., Mu, L., & Reed, M. A. (2016). VOC detection using multimode E-nose composed of bulk acoustic wave resonator and silicon nanowire field effect transistor array. *Proceedings of IEEE Sensors*, 1–3. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2016.7808606>
- Chin, A. (2009). *Mathieu Lehanneur: Andrea air purifier now available*. Designboom Architecture & Design Magazine. <https://www.designboom.com/design/mathieu-lehanneur-andrea-air-purifier-now-available/>
- Cincinelli, A., & Martellini, T. (2017). Indoor air quality and health. *Int J Environ Res Public Health*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/ijerph14111286>
- Cortés, M., Otero, T., Méndez, M., Suárez, M., & Vera, E. (2006). Desarrollo de sensores electroquímicos. *Revista de La Sociedad Colombiana de Física*, 38(4), 1355–1358. <https://pdfs.semanticscholar.org/917e/d95c84421e5eb446d52ef5bf9d033971a3f1.pdf>
- Daza Pérez, M. Á., Martínez Benavides, D. X., & Caro Hernández, P. A. (2015). Contaminación microbiológica del aire al interior y el síndrome del edificio enfermo. *Biociencias*, 10(2), 37–50. <https://doi.org/10.18041/2390-0512/bioc..2.2641>

- De Paz Menéndez, A. (2015). *Desarrollo de un sistema de sensores para la detección de sustancias peligrosas*. 154. <https://repositorio.uam.es/handle/10486/668306>
- De Visser, P. (2017). *Air purification by house plants- A literature survey*. September, 1–19. www.wur.nl/plant-research
- Delgado Castro, A., & Rojas Bolaños, O. (2015). Construcción de un sistema de bajo costo para el uso y evaluación de sensores semiconductores para gases. *Educacion Quimica*, 26(4), 299–306. <https://doi.org/10.1016/j.eq.2015.07.001>
- Deng, L., & Deng, Q. (2018). The basic roles of indoor plants in human health and comfort. In *Environmental Science and Pollution Research* (Vol. 25, Issue 36, pp. 36087–36101). <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3554-1>
- Escalona, L., Manganiello, L., López -Fonseca, M., & Vega, C. (2012). Los sensores químicos y su utilidad en el control de gases contaminantes. *Revista INGENIERÍA UC*, 19(1), 74–88. <https://www.redalyc.org/pdf/707/70732261010.pdf>
- Espinosa, A., Mejía, J., & Rodríguez, M. de los Á. (2014). *Manual de producción de plantas de nochebuena y ornato*. 24. <https://www.coursehero.com/file/39435308/Manual-de-produccion-de-plantas-de-nochebuena-y-ornatopdf/>
- Fierro González, M. D. (2004). *Dimensionamiento de un sistema de depuración de aire para eliminar la materia particulada producida en un aserradero* [Universidad de Cádiz]. <https://rodin.uca.es/xmlui/bitstream/handle/10498/6591/33267455.pdf>
- Freescale Xtrinsic. (2011). *MPL3115A2*. <http://www.freescale.com/>
- García Moreno, S. (2019). *Calidad del aire interior: métodos analíticos de evaluación*. <http://e-spacio.uned.es/fez/view/bibliuned:master-Ciencias-CyTQ-Sgarcia>

- Green City Solutions. (2018). *The world's first bio-tech filter to quantifiably improve air quality*. <https://greencitysolutions.de/en/products/>
- Hanks, J. C., & Louglin, S. O. (2011). *Volatile Organic Compounds*. Nova Science Publishers.
- Hanwei Electronics CO. LTD. (2009). *Technical Data MQ-135 Gas Sensor* (Vol. 1, pp. 1–3). https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/MQ-135_Hanwei.pdf
- Hanwei Electronics CO. LTD. (2013a). *Technical Data MQ-3 Gas Sensor* (Vol. 1). <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/MQ-3.pdf>
- Hanwei Electronics CO. LTD. (2013b). *Technical Data MQ-4 Gas Sensor* (pp. 1–2). <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Biometric/MQ-4.pdf>
- Hanwei Electronics CO. LTD. (2015). *Technical Data MQ-8 Gas Sensor* (pp. 1–2). <https://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Sensors/Biometric/MQ-8.pdf>
- Hester, R. E., & Harrison, R. M. (1995). Volatile organic compounds in the atmosphere. *Royal Society of Chemistry*, 89. [https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=uN3xtF6vmAcC&oi=fnd&pg=PR11&dq=Barbour,+A.+K.,+Gittins,+M.+J.,+Harrison,+R.+M.,+Burdett,+N.+A.,+Hester,+R.+E.,+Cairns+Jr,+J.,+.+.+.+Fish,+H.+\(1995\).+Volatile+Organic+Compounds+in+the+Atmosphere.+Cambridge,+Unite](https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=uN3xtF6vmAcC&oi=fnd&pg=PR11&dq=Barbour,+A.+K.,+Gittins,+M.+J.,+Harrison,+R.+M.,+Burdett,+N.+A.,+Hester,+R.+E.,+Cairns+Jr,+J.,+.+.+.+Fish,+H.+(1995).+Volatile+Organic+Compounds+in+the+Atmosphere.+Cambridge,+Unite)
- Ibrahim, A. (2016). A System for Monitoring and Managing Indoor Air Quality and Environmental Conditions. *Boise State University Theses and Dissertations*. <https://scholarworks.boisestate.edu/td/1156>
- Ibrahim, A. A., Zhi, S., Wei, Y., Cao, Z., Hou, C., Marques, G., Pitarma, R., Imam, M. Y., Jannat, N., Bibi, F., Khan, G. S., Salgado, M. C. R., OMS, Mendoza-García, R.,

- Pérez-Vázquez, A., García-Albarado, J. C., García-Pérez, E., López-Collado, J., Schieweck, A., ... Caro-Hernández, P. (2018). Volatile Organic Compounds in the Atmosphere. *Plant Physiology, Development and Metabolism*, 13(4), 1–4.
<https://doi.org/10.23919/SEEDA-CECNSM.2017.8088233>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2014). *Índice Verde Urbano 2012*. 1, 1–9. <https://anda.inec.gob.ec/anda/index.php/catalog/360>
- Juárez Díaz, L. A. (2016). *Design, Synthesis and Evaluation of chemosensors for NOx detection* [Universitat de Valencia]. <http://roderic.uv.es/handle/10550/54404>
- Kirkby, E. A., & Römheld, V. (2007). Micronutrientes na fisiologia de plantas- Funções, Absorção e Mobilidade. *Informações Agronômicas*, 118(2), 1–24.
- Koppmann, R. (2007). Volatile Organic Compounds in the Atmosphere. In *Volatile Organic Compounds in the Atmosphere*. Royal Society of Chemistry.
<https://doi.org/10.1002/9780470988657>
- Korc, M. (1999). Monitoreo de la Calidad del Aire en América Latina. *Programa de Control de Contaminación Del Aire*, 15–32.
https://scholar.google.com/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Korc%2C+M.%2C+%26+Sáenz%2C+R.+%281999%29.+Monitoreo+de+la+calidad+del+aire+en+América+Latina.+Pan+American+Health+Organization+%28PAHO%29%2C+1-22.&btnG=
- Kowalska, M., Ośródk, L., Klejnowski, K., Zejda, J. E., Krajny, E., & Wojtylak, M. (2009). Air quality index and its significance in environmental health risk communication. *Archives of Environmental Protection*, 35(1), 13–21.
<https://www.researchgate.net/publication/289707985>
- Love The Garden. (2017). NASA guide to air-filtering houseplants. In *Love The Garden*.

<https://www.lovethegarden.com/uk-en/article/nasa-guide-air-filtering-houseplants>

- Lozano, J., Suárez, J. I., Meléndez, F., Rodríguez, S., Arroyo, P., Herrero, J. L., & Carmona, P. (2019). Personal electronic systems for citizen measurements of air quality. *2019 5th {Experiment} {International} {Conference} (Exp.at'19)*, 315–319. <https://doi.org/10.1109/EXPAT.2019.8876471>
- Martínez, A., Luna, G., Calvo, J. M., Valdés-Cruz, A., Magdaleno-Madrigal, V., Fernández-Mas, R., Martínez, D., & Fernández-Guardiola, A. (2002). Análisis espectral (3D) electroencefalográfico de los efectos de la inhalación de compuestos orgánicos volátiles industriales sobre el sueño y la atención en el humano. *Salud Mental*, *25*(4), 56–67. <https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumenl.cgi?IDARTICULO=17478>
- Mathieu Lehanneur. (2011). *Andrea*. <http://www.mathieulehanneur.fr/project/andrea-90>
- Matus C., P., & Lucero Ch., R. (2002). Norma primaria de calidad del aire. In *Revista Chilena de Enfermedades Respiratorias* (Vol. 18, Issue 2, pp. 112–122). <https://doi.org/10.4067/s0717-73482002000200006>
- Meng, G.-Z., Ji, K.-S., Rajmohan, K. S., Chandrasekaran, R., Varjani, S., Kalra, G., A. Lal, M., Bhatla, S. C., Sisodia, R., Bhatla, S. C., Shakya, R., A. Lal, M., Bhatla, S. C., A. Lal, M., Kathpalia, R., Bhatla, S. C., A. Lal, M., Bhatla, S. C., Sisodia, R., ... Bounds, K. (2018). Efecto del cambio climático sobre la fisiología de las plantas cultivadas: una revisión. In L. K. Wang, V. Ivanov, & J.-H. Tay (Eds.), *Plant Physiology, Development and Metabolism* (Vol. 60, Issue 4, pp. 670–672). Springer. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2006\)004\[0203:ECUPBA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2006)004[0203:ECUPBA]2.0.CO;2)
- Michalos, A. C. (2014). Encyclopedia of Quality of Life and Well-Being Research. In *Encyclopedia of Quality of Life and Well-Being Research*.

<https://doi.org/10.1007/978-94-007-0753-5>

Mondragón Cortez, P. (2017). Espectroscopia de infrarrojo para todos ...y 51 espectros de alimentos consumidos en México. In *D.R. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C.*

https://ciatej.mx/files/divulgacion/divulgacion_5a43b7c09fdc1.pdf

Morales, I. M., Acevedo, V. B., & Nieto, A. G. (2010). Calidad del Aire Interior en Edificios de uso Público. *Dirección General de Ordenación e Inspección. Conserjería de Sanidad de La Comunidad de Madrid.*, 1–98.

<https://doi.org/M-48.739-2010>

NASA. (2007). *Plants Clean Air and Water for Indoor Environments.*

https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2007/ps_3.html

Nedlaw Group. (2018). *Nedlaw Living Wall Biofilters.* <http://nedlawlivingwalls.com/>

Nieto, A. (2014). *Purificación del aire con plantas de ornato.*

<https://www.mundohvacr.com.mx/2014/03/purificacion-del-aire-con-plantas-de-ornato/>

OMS. (2018). *Contaminación del aire de interiores y salud.* <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>

Ortiz, A. (2016). Dónde colocar estas plantas para que el aire de tu casa sea más limpio. In *La Vanguardia.*

<https://www.lavanguardia.com/vivo/ciudad/20160411/401031953586/plantas-casa-aire-limpio.html>

Ortiz Terán, F., & Haro Haro, B. (2015). Síndrome del edificio enfermo en los bloques académicos de una institución de educación superior. *Enfoque UTE*, 6(2), 15–24.

<https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v6n2.57>

Ortuño Tomás, A. M., Díaz Expósito, L., & Del Río Conesa, J. (2015). Evolución de la Fisiología Vegetal en los últimos 100 años. *Eubacteria*, 34, 74–82.

https://scholar.google.com/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Ortuño+Tomás+%2C+A.+M.%2C+Díaz+Expósito%2C+L.%2C+%26+Del+Río+Conesa%2C+J.+A.+%282015%29.+Evolución+de+la+Fisiología+Vegetal+en+los+últimos+100+años+.+Revi+sta+Eubacteria%2C+74-82.&btnG=

Oyarzún, M. (2010). Contaminación aérea y sus efectos en la salud. In *Revista Chilena de Enfermedades Respiratorias* (Vol. 26, Issue 1, pp. 16–25).

https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0717-73482010000100004&script=sci_arttext&tlng=en

Park, I., Yang, D., & Kang, K. (2015). *Microfabricated and Nanoengineered Chemical Sensors for Air Quality Monitoring System* (pp. 141–170).

https://doi.org/10.1007/978-94-017-9981-2_6

Parra García, V. (2008). Sensores químicos basados en materiales moleculares: De la molécula al material, del material al dispositivo. In *dialnet.unirioja.es* (Vol. 104, Issue 1). www.rseq.org

Pedraza Ortiz, L. J. (2013). La Biodepuración del Aire con Plantas Purificantes y Ornamentales, como Alternativa Ambiental en el Siglo XXI. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.

<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Penza, M., Suriano, D., Villani, M. G., Spinelle, L., & Gerboles, M. (2014). Towards air quality indices in smart cities by calibrated low-cost sensors applied to networks. *2014 IEEE SENSORS*, 2012–2017. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2014.6985429>

- Philips. (2019). *Purificador de aire AC4072/11*. https://www.philips.es/c-p/AC4072_11/purificador-de-aire
- Piedrahita, R., Xiang, Y., Masson, N., Ortega, J., Collier, A., Jiang, Y., Li, K., Dick, R., Lv, Q., Hannigan, M., & Shang, L. (2014). The next generation of low-cost personal air quality sensors for quantitative exposure monitoring. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 7(3), 2425–2457. <https://doi.org/10.5194/amtd-7-2425-2014>
- Pilon-Smits, E. A. H., & Freeman, J. L. (2006). Environmental cleanup using plants: Biotechnological advances and ecological considerations. In *Frontiers in Ecology and the Environment* (Vol. 4, Issue 4, pp. 203–210). [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2006\)004\[0203:ECUPBA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2006)004[0203:ECUPBA]2.0.CO;2)
- Piñol, E., Mussons, X., Rosell, E., Guardino, X., & Gadea, E. (2013). Calidad del aire interior: compuestos orgánicos volátiles, olores y confort. *Instituto Nacional de Seguridad e Higiene En El Trabajo*, 1–6. <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/NTP/NTP/Ficheros/961a972/972w.pdf>
- PJRC. (2008). *Teensy USB Development Board*. <https://www.pjrc.com/teensy/>
- Querol, X. (2008). Calidad del aire, partículas en suspensión y metales. *Rev. Esp. Salud Pública*, 82, 447–454. <https://doi.org/10.1590/S1135-57272008000500001>
- Quintana Roo. (2016). *Estas plantas eliminan los gases tóxicos de tu casa*. <https://sipse.com/novedades/gases-toxicos-purificar-aire-plantas-casas-hogar-vivienda-221142.html>
- RAMBAL Automatización y Robótica. (2017). *Bomba de Diafragma R385*.

<https://rambal.com/bomba-valvula-solenoide/694-bomba-de-diafragma-6-12v-dc-r385.html>

Rosas Villanueva, W. (2018). Eficiencia de la planta Lengua de Suegra (*Sansevieria trifasciata*) para la fitoremediación de los gases interiores (CO, SO₂, NO₂) presentes en la I.E.P Isaac Newton, SJL-2018. *Universidad César Vallejo*.

Salgado, M. C. R. (2002). Manejo de áreas verdes en {Concepción}: mejor calidad de vida urbana. *1*, 41–47. <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RU/article/view/767>

Sánchez Montero, J. M., & Alcántara León, A. R. (2007). Compuestos orgánicos volátiles en el medio ambiente. *Monografías de La Real Academia Nacional*.
<https://www.academia.edu/download/50135434/vocs.pdf>

Sandoval, J. (2017). *Manual de Fisiología Vegetal*.

https://www.google.com/search?q=TECNOLOGICO+NACIONAL+DE+MEXICO+SUBDIRECCIÓN+ACADÉMICA+DEPARTAMENTO+DE+INGENIERÍAS+Academia+de+Biología+MANUAL+DE+FISIOLOGIA+VEGETAL+MANUAL+DE+FISIOLOGIA+VEGETAL+Elaborado+por%3A+Dr.+JUAN+JOSÉ+SANDOVAL+GÍO&rlz=1C1CHBD_esEC83

Santamaría Alonso, I. (2010). *Desarrollo y estudio de sensores electroquímicos* [Universidad Pública de Navarra]. <https://academica-e.unavarra.es/handle/2454/4444>

Schettler, T. (2006). Efectos de los edificios sobre la salud: ¿Qué es lo que sabemos? *Reunión Del Instituto de Medicina (IOM)*, 7. https://noharm-global.org/sites/default/files/documents-files/1399/Efectos_de_los_Edificios.pdf

Schieweck, A., Uhde, E., Salthammer, T., Salthammer, L. C., Morawska, L., Mazaheri,

M., & Kumar, P. (2018). Smart homes and the control of indoor air quality.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, 94, 705–718.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.057>

Schneider Clinic. (n.d.). *25 House Plants That Detox Your Home Naturally*. 2017.

Retrieved August 11, 2020, from <https://www.schneiderclinic.com/25-house-plants-that-detox-the-air-in-your-home-naturally/>

Secretaría del Ambiente. (2018). Informe Calidad del Aire 2017. In *Documento Índice Quiteño de Calidad del Aire (IQCA)* (Vol. 4, Issue 2, p. 55).

<http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/index.php/documentos-indice-quiteno-de-calidad-del-aire#informe-calidad-del-aire-2017>

Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire, Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente 402 (2011).

<http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/ecu112183.pdf>

Sensirion Staff. (2019). *CO2 and RH/T Sensor Module*. Technical Sheet CO2 Sensors.

<https://www.sensirion.com/en/environmental-sensors/carbon-dioxide-sensors/carbon-dioxide-sensors-co2/>

Silicon Labs. (2013). *Si1145/46/47 Proximity / UV / Ambient Light Sensor IC with I2C Interface*.

Stradiotto, N. R., Yamanaka, H., & Zanoni, M. V. B. (2003). Electrochemical sensors: A powerful tool in analytical chemistry. In *Journal of the Brazilian Chemical Society* (Vol. 14, Issue 2, pp. 159–173). <https://doi.org/10.1590/S0103-50532003000200003>

Stutte, G. W., & Kennedy, J. F. (2002). *Phytoremediation of Indoor Air: NASA , Bill*

Wolverton , and the Development of an Industry. 1–8.

<https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20120003454>

Takenaka, K. (2016). *Ecology Garden*. Takenaka Garden Afforestation.

<http://www.takenakateien.co.jp/english/ecologygarden.html>

TE Connectivity. (2017). *HTU21D(F) RH/T Senosr IC Digital Relative Humidity sensor with Temperature output.*

Texas Instruments. (2018). *LMx93-N, LM2903-N Low-Power, Low-Offset Voltage, Dual Comparators.* www.ti.com

The Nunhead Gardener. (2018). *Sansevieria Trifasciata (Mother in-laws Tongue).* House Plants. <https://thenunheadgardener.com/indoor-house-plants/snake-plant>

Trotec. (2020). *Purificador de aire AirgoClean 205 S.* <https://es.trotec.com/productos-y-servicios/maquinas-homecomfort/purificadores-de-aire/purificadores-de-aire-confort-airgoclean/purificador-de-aire-airgoclean-205-s/>

UrbanArbolismo. (2009). *Como utilizar plantas para absorber contaminantes del aire.* - *Urbanarbolismo.* <https://www.urbanarbolismo.es/blog/como-utilizar-plantas-para-absorber-contaminantes-del-aire/>

Villacrés Estrada, T. R. (2020). *Análisis comparativo de sensores químicos de óxido metálico y sensores ópticos para detección de compuestos volátiles orgánicos producto de la descomposición de frutas.* Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control. <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/21764>

Wijesoorya, N., Wijesoorya, N., & Berigny, C. de. (2018). Breathing Spaces: Educating Indoor Plant Carbon Absorption through Interaction. *Journal of Arts and*

Humanities, 7(11), 01–10. <https://doi.org/10.18533/journal.v7i10.1510>

Winsen. (2016). *ME2-O2-Φ20 Oxygen Sensor*. <https://www.winsen-sensor.com/sensors/o2-sensor/me2-o2.html>

Wolverton, B. C. (1996). *How to grow fresh air* (pp. 1–139).
<http://www.wolvertonenvironmental.com/freshair.html>

Wolverton, Bc, & Wolverton, J. D. (1996). Interior Plants: Their Influence on Airborne Microbes inside Energy-efficient Buildings. In *Journal of the Mississippi Academy of Sciences* (Vol. 41, Issue 2, pp. 99–105).
<http://www.wolvertonenvironmental.com/MsAcad-96.pdf>

Wolverton, Bill, Jhonson, A., & Bounds, K. (1989). Interior landscape plants for indoor air pollution abatement. *National Aeronautics and Space Administration, NASA*, 1, 1–5. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>

Wolverton Environmental Services. (2018a). *Indoor Air*.
<http://www.wolvertonenvironmental.com/IAQ.html>

Wolverton Environmental Services. (2018b). *Plant Air Purifier*.
<http://www.wolvertonenvironmental.com/plantairpurifier.html>

World Health Organization [WHO]. (2010). *Indoor air pollution and household energy*.
World Health Organization. <https://www.who.int/heli/risks/indoorair/indoorair/en/>