

Handbook T-VIII

CIERMMI Mujeres en la Ciencia

Ciencias ambientales, uso de recursos

MARROQUÍN-DE JESÚS, Ángel

OLIVARES-RAMIREZ, Juan Manuel

CRUZ-CARPIO, Luis Eduardo

BAUTISTA-JIMÉNEZ, Angélica

Coordinadores

ECORFAN®

Coordinadores

MARROQUÍN-DE JESÚS, Ángel. PhD
OLIVARES-RAMIREZ, Juan Manuel. PhD
CRUZ-CARPIO, Luis Eduardo. BsC
BAUTISTA-JIMÉNEZ, Angélica. BsC

Editor en Jefe

VARGAS-DELGADO, Oscar. PhD

Directora Ejecutiva

RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD

Director Editorial

PERALTA-CASTRO, Enrique. MsC

Diseñador Web

ESCAMILLA-BOUCHAN, Imelda. PhD

Diagramador Web

LUNA-SOTO, Vladimir. PhD

Asistente Editorial

SERRUDO-GONZÁLEZ, Javier. BsC

Traductor

DÍAZ-OCAMPO, Javier. BsC

Filóloga

RAMOS-ARANCIBIA, Alejandra. BsC

ISBN: 978-607-8695-32-4

Sello Editorial ECORFAN: 607-8695

Número de Control HCS: 2020-05

Clasificación HCS (2020): 051120-0305

©ECORFAN-México, S.C.

Ninguna parte de este escrito amparado por la Ley Federal de Derechos de Autor, podrá ser reproducida, transmitida o utilizada en cualquier forma o medio, ya sea gráfico, electrónico o mecánico, incluyendo, pero sin limitarse a lo siguiente: Citas en artículos y comentarios bibliográficos de compilación de datos periodísticos radiofónicos o electrónicos. Para los efectos de los artículos 13, 162,163 fracción I, 164 fracción I, 168, 169,209 fracción III y demás relativos de la Ley Federal de Derechos de Autor. Violaciones: Ser obligado al procesamiento bajo ley de copyright mexicana. El uso de nombres descriptivos generales, de nombres registrados, de marcas registradas, en esta publicación no implican, uniformemente en ausencia de una declaración específica, que tales nombres son exentos del protector relevante en leyes y regulaciones de México y por lo tanto libre para el uso general de la comunidad científica internacional. HCS es parte de los medios de ECORFAN (www.ecorfan.org)

Handbooks

Definición de Handbooks

Objetivos Científicos

Apoyar a la Comunidad Científica Internacional en su producción escrita de Ciencia, Tecnología e Innovación en las Áreas de investigación CONACYT y PRODEP.

ECORFAN-Mexico S.C es una Empresa Científica y Tecnológica en aporte a la formación del Recurso Humano enfocado a la continuidad en el análisis crítico de Investigación Internacional y está adscrita al RENIECYT de CONACYT con número 1702902, su compromiso es difundir las investigaciones y aportaciones de la Comunidad Científica Internacional, de instituciones académicas, organismos y entidades de los sectores público y privado y contribuir a la vinculación de los investigadores que realizan actividades científicas, desarrollos tecnológicos y de formación de recursos humanos especializados con los gobiernos, empresas y organizaciones sociales.

Alentar la interlocución de la Comunidad Científica Internacional con otros centros de estudio de México y del exterior y promover una amplia incorporación de académicos, especialistas e investigadores a la publicación Seriada en Nichos de Ciencia de Universidades Autónomas - Universidades Públicas Estatales - IES Federales - Universidades Politécnicas - Universidades Tecnológicas - Institutos Tecnológicos Federales - Escuelas Normales - Institutos Tecnológicos Descentralizados - Universidades Interculturales - Consejos de CyT - Centros de Investigación CONACYT.

Alcances, Cobertura y Audiencia

Handbooks es un Producto editado por ECORFAN-Mexico S.C en su Holding con repositorio en México, es una publicación científica arbitrada e indizada. Admite una amplia gama de contenidos que son evaluados por pares académicos por el método de Doble-Ciego, en torno a temas relacionados con la teoría y práctica de las Área de investigación CONACYT y PRODEP respectivamente con enfoques y perspectivas diversos, que contribuyan a la difusión del desarrollo de la Ciencia la Tecnología e Innovación que permitan las argumentaciones relacionadas con la toma de decisiones e incidir en la formulación de las políticas internacionales en el Campo de las Ciencias. El horizonte editorial de ECORFAN-Mexico® se extiende más allá de la academia e integra otros segmentos de investigación y análisis ajenos a ese ámbito, siempre y cuando cumplan con los requisitos de rigor argumentativo y científico, además de abordar temas de interés general y actual de la Sociedad Científica Internacional.

Consejo Editorial

JIMÉNEZ - MOLEÓN, María Del Carmen. PhD
Universidad de Granada

LOPEZ - ZAMORA, Leticia. PhD
Universidad Politécnica de Valencia

MARTÍNEZ - QUIROZ, Marisela. PhD
Centro de Graduados e Investigación en Química

OROPEZA - GUZMÁN, Mercedes Teresita. PhD
Institut National Polytechnique de Toulouse

PINA – LUIS, Georgina Esther. PhD
Universidad de La Habana

GARCÍA - DE SOTERO, Dora Enith. PhD
Universidad de Sao Paulo

PEREA-LUGO, Adriana. PhD
Universidad Autónoma de Barcelona

SANDOVAL-SALAS Fabiola. PhD
Institut National Polytechnique de Toulouse

STILIANOVA - STOYTCHEVA, Margarita. PhD
Universidad de Tecnología Química y Metalurgia de Sofia

CARVAJAL - MILLAN, Elizabeth. PhD
École Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier

Comité Arbitral

CALVA - BENÍTEZ, Laura Georgina
Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca

RIOS - DONATO, Nely. PhD
Universidad de Guanajuato

CASTAÑÓN - OLIVARES, Laura Rosio. PhD
Universidad Nacional Autónoma de México

CASTRO - CECEÑA, Ana Bertha. PhD
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada

DUARTE - ESCALANTE, Esperanza. PhD
Universidad Nacional Autónoma de México

FRÍAS - DE LEÓN, María Guadalupe. PhD
Universidad Nacional Autónoma de México

GAMBOA-HERNÁNDEZ, Adriana. PhD
Instituto Tecnológico de Saltillo

HERNANDEZ - HERNANDEZ, Francisca. PhD
Universidad Nacional Autónoma de México

HURTADO - AYALA, Lilia Angélica. PhD
Universidad Autónoma de Baja California

LÓPEZ - URETA, Luz Cecilia. PhD
Universidad de Guadalajara

Cesión de Derechos

El envío de una Obra Científica a ECORFAN Handbooks emana el compromiso del autor de no someterlo de manera simultánea a la consideración de otras publicaciones científicas para ello deberá complementar el Formato de Originalidad para su Obra Científica.

Los autores firman el Formato de Autorización para que su Obra Científica se difunda por los medios que ECORFAN-México, S.C. en su Holding México considere pertinentes para divulgación y difusión de su Obra Científica cediendo sus Derechos de Obra Científica.

Declaración de Autoría

Indicar el Nombre de 1 Autor y 3 Coautores como máximo en la participación de la Obra Científica y señalar en extenso la Afiliación Institucional indicando la Dependencia.

Identificar el Nombre de 1 Autor y 3 Coautores como máximo con el Número de CVU Becario-PNPC o SNI-CONACYT- Indicando el Nivel de Investigador y su Perfil de Google Scholar para verificar su nivel de Citación e índice H.

Identificar el Nombre de 1 Autor y 3 Coautores como máximo en los Perfiles de Ciencia y Tecnología ampliamente aceptados por la Comunidad Científica Internacional ORCID - Researcher ID Thomson - arXiv Author ID - PubMed Author ID - Open ID respectivamente

Indicar el contacto para correspondencia al Autor (Correo y Teléfono) e indicar al Investigador que contribuye como primer Autor de la Obra Científica.

Detección de Plagio

Todas las Obras Científicas serán testeadas por el software de plagio PLAGSCAN si se detecta un nivel de plagio Positivo no se mandará a arbitraje y se rescindirán de la recepción de la Obra Científica notificando a los Autores responsables, reivindicando que el plagio académico está tipificado como delito en el Código Penal.

Proceso de Arbitraje

Todas las Obras Científicas se evaluarán por pares académicos por el método de Doble Ciego, el arbitraje Aprobatorio es un requisito para que el Consejo Editorial tome una decisión final que será inapelable en todos los casos. MARVID® es una Marca de derivada de ECORFAN® especializada en proveer a los expertos evaluadores todos ellos con grado de Doctorado y distinción de Investigadores Internacionales en los respectivos Consejos de Ciencia y Tecnología el homólogo de CONACYT para los capítulos de America-Europa-Asia-Africa y Oceanía. La identificación de la autoría deberá aparecer únicamente en una primera página eliminable, con el objeto de asegurar que el proceso de Arbitraje sea anónimo y cubra las siguientes etapas: Identificación del ECORFAN Handbooks con su tasa de ocupamiento autoral - Identificación del Autores y Coautores- Detección de Plagio PLAGSCAN - Revisión de Formatos de Autorización y Originalidad-Asignación al Consejo Editorial- Asignación del par de Árbitros Expertos- Notificación de Dictamen-Declaratoria de Observaciones al Autor-Cotejo de la Obra Científica Modificado para Edición-Publicación.

ECORFAN CIERMMI Mujeres en la Ciencia

Volumen VIII

El Handbook ofrecerá los volúmenes de contribuciones seleccionadas de investigadores que contribuyan a la actividad de difusión científica del Colegio de Ingenieros en Energías Renovables de Querétaro A.C. en sus áreas de investigación en Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Educación, Potencia y Energía, Ciencias de la Computación, Mecatrónica, Aplicaciones Industriales y Comunicaciones, Gestión de la Tecnología en la Industria y en la Educación, Nuevas Tecnologías, Informática, Desarrollo de aplicaciones, Seguridad Informática, Tecnologías de la Información y Comunicación, Mantenimiento Industrial, Subestaciones Eléctricas, Motores Eléctricos, Termografía Infrarroja, Ahorro de Energía, Análisis de Vibraciones, Automatización, Cocinas Solares, Biomasa, Biocombustibles, Sistemas Fotovoltaicos, Celdas de Combustible, Energía Solar, Educación, Generación de Energía, Eléctrica, Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica, Gestión de Sistemas de Energía Eléctrica, Sistemas de Información, Energías Renovables, Aplicaciones Computacionales, Instrumentación aplicada a la industria, Telecomunicaciones y protocolos de seguridad. Además de tener una evaluación total, en las manos de los directores del Colegio de Ingenieros en Energías Renovables de Querétaro A.C. Se colabora con calidad y puntualidad en sus capítulos, cada contribución individual fue arbitrada a estándares internacionales (RESEARCH GATE, MENDELEY, GOOGLE SCHOLAR y REDIB), el Handbook propone así a la comunidad académica, los informes recientes sobre los nuevos progresos en las áreas más interesantes y prometedoras de investigación en Ciencias de la Educación.

Para futuros volúmenes:

<http://www.ecorfan.org/handbooks/>

**Marroquín-De Jesús, Ángel • Olivarez-Ramirez, Juan Manuel • Cruz-Carpio, Luis
Eduardo • Bautista-Jiménez, Angélica**

Coordinadores

CIERMMI Mujeres en la Ciencia T-VIII Ciencias ambientales, uso de recursos

Handbooks

Colegio de Ingenieros en Energías Renovables de Querétaro A.C.

Noviembre 2020

DOI: 10.35429/H.2020.8.1.153

Prólogo

La ciencia es incluyente por definición, no hay sexos, no hay razas, no hay creencias, es un mundo objetivo y ético. Un mundo competitivo y colaborativo en que todos nos ayudamos a ser mejores.

La generación de conocimiento es lo que ha marcado la pauta del desarrollo de la humanidad, la generosidad de compartir lo que se aprende permitirá que las futuras generaciones tengan mejores condiciones de vida. Y no hay mayor sinónimo de vida que la palabra “mujer”.

Este compendio es el reflejo de mucho empeño, muchos desvelos y muchos esfuerzos; esfuerzos materializados en artículos científicos desarrollados por profesoras-investigadoras de probado nivel, que laboran en distintas instituciones de nuestro país. Profesionales que han demostrado cabalmente su capacidad y compromiso.

En este 2020 tan convulsionado, el mundo hizo una pausa y hay que ver la parte positiva: regresamos a ser conscientes de la naturaleza. Así que para las que colaboramos en la ciencia ambiental, nos da nuevas fuerzas y argumentos para seguir desarrollando proyectos en pro del cuidado del medio ambiente, buscando constantemente alternativas más amigables con nuestro entorno. Ciencia, Desarrollo y Sustentabilidad no son temas que tengan que ser antagónicos.

Es inevitable que nuestra perspectiva humana se haya modificado, así que depende de nosotros que ese viraje de rumbo sea para hacernos crecer y compartir como sociedad. Hoy en día hablamos con mayor conocimiento de temas como captación de agua pluvial, secado solar, desalinización de agua por medios alternativos, gestión adecuada del uso del agua, cocción de alimentos por medios solares, agricultura sustentable, tecnologías bajas en carbono, conservación de la biodiversidad, en general cuidado del medioambiente. Es nuestro gran reto que estas tecnologías lleguen a los hogares de todos, que sean cuestiones de uso común. Hay que hacer que la educación ambiental permee por cualquier medio, sea por economía, por facilidad de uso o incluso por moda.

Desde hace varios años he tenido la oportunidad de colaborar con el CIERMMI y lo he visto crecer gracias a su autenticidad y compromiso, así que agradezco profundamente la participación en este Handbook, que no es otra cosa que el reflejo de su esencia científica. Los invito a todos a leerlo, discutirlo y retroalimentarlo, que se convierta en un ejercicio enriquecedor para el crecimiento de todos.

Mi profundo respeto, mi alma y mi ciencia para todas las colaboradoras, felicitaciones.

*CASTILLO-TÉLLEZ, Margarita. PhD
Universidad Autónoma de Campeche*

Introducción

El Colegio de Ingenieros en Energías Renovables de Querétaro A.C. (CIER-QUERÉTARO), y sus capítulos de Energía Renovable, Mantenimiento industrial, Mecatrónica e Informática, patrocinadores técnicos del Congreso Interdisciplinario de Energías Renovables, Mantenimiento, Mecatrónica e Informática, CIERMMI 2019 tiene como objetivo general establecer un espacio de discusión y reflexión en temas relacionados con las áreas de: energías renovables, mantenimiento industrial, mecatrónica e informática con la participación de estudiantes, profesores, investigadores y conferencistas nacionales e internacionales, promoviendo la conformación y consolidación de redes de investigación. Contribuyendo a brindar un espacio de divulgación y debate de las ponencias de estudiantes, egresados, académicos e investigadores, representantes de las distintas instituciones de educación superior y centros de investigación de nuestro país. Promoviendo la conformación de redes de investigación entre diferentes instituciones. Ofreciendo un espacio para los estudiantes de licenciatura, maestría, doctorado y de posdoctorado, en el cual puedan dar a conocer el avance de las investigaciones que llevan a cabo como tesis o trabajos de grado. Brindando un espacio en el cual los grupos de estudios e integrantes de cuerpos académicos, vinculados al programa curricular de las carreras de energías renovables, mantenimiento industrial, mecatrónica e informática, den a conocer los trabajos de investigación desarrollados al interior de su institución y en colaboración con otras instituciones educativas nacionales o internacionales. Estableciendo un espacio de capacitación para los (las) asistentes, mediante el desarrollo de ponencias y conferencias específicas.

Este volumen Mujeres en la Ciencia TV-2020 contiene 10 Capítulos arbitrados que se ocupan de estos asuntos en elegidos de entre las contribuciones, reunimos algunos investigadores y estudiantes de posgrado, a partir de 32 estados de México. Agradecemos a los revisores por su retroalimentación que contribuyeron en gran medida en el mejoramiento de los artículos, para la publicación en estos procedimientos revisando los manuscritos que fueron sometidos.

Como primer capítulo, Ojeda, Sánchez y Hernández, presentan PM₁ en el aire exterior: fuentes, contenido de especies iónicas y propiedades alcalinas en el Área Metropolitana de Guadalajara, Jalisco-México, como segundo capítulo, Baray y Manjarrez, hablarán sobre la Caracterización de la biomasa lignocelulósica para la producción de biocombustibles.

Como tercer capítulo Rodríguez, Callejas y Alcérreca presentan la dinámica de fluidos computacional y aplicación de flujo multifásico para el análisis de gradientes termohalinos en energías marinas renovables, como cuarto capítulo Vázquez, Díaz, Lezama y Pimentel, proponen una obtención y caracterización de hidrolizados proteicos de quinoa y amaranto por digestión in vitro, como quinto capítulo Villagran, Patiño, Hernández y Siordia, realizan pruebas de factibilidad y desempeño de un control híbrido neurodifuso para una unidad turbogás, como sexto capítulo Lozano, Lorenzillo, Galicia y Barrera, desarrollaron una biosíntesis de Nano Partículas Metálicas, como séptimo capítulo Mejias, Palomares, Paniagua y Gomez, hablan del perfil lipídico en una cepa de la microalga *Dunaliella tertiolecta* y su potencial para producción de biodiesel, como octavo número, Gonzalez, Martinez y Guzman, presentan el comportamiento del consumidor ante la oferta de productos ecológicos en bebidas embotelladas en el sur de Tamaulipas, como noveno capítulo, Bernal, González y Cuevas, presentan la codigestión anaerobia como alternativa para el tratamiento de aguas residuales lácteas y la generación de biogás y biosólidos y como último capítulo, González, Anducho, Catagena y Mercado, se enfocan agricultura sostenible: herramienta para la soberanía alimentaria

MARROQUÍN-DE JESÚS, Ángel
OLIVARES-RAMIREZ, Juan Manuel
CRUZ-CARPIO, Luis Eduardo
BAUTISTA-JIMÉNEZ, Angélica

Coordinadores

Contenido	Página
1 PM₁ en el aire exterior: fuentes, contenido de especies iónicas y propiedades alcalinas en el Área Metropolitana de Guadalajara, Jalisco-México OJEDA-CASTILLO, Valeria, SÁNCHEZ-TORRES, Perla Berenice y HERNÁNDEZ-MENA, Leonel	1-23
2 Caracterización de la biomasa lignocelulósica para la producción de biocombustibles BARAY-GUERRERO, María del Rosario y MANJARREZ-DOMINGUEZ, Carlos Baudel	24-34
3 Dinámica de fluidos computacional y aplicación de flujo multifásico para el análisis de gradientes termohalinos en energías marinas renovables RODRÍGUEZ-OCAMPO, Paola E., CALLEJAS-JIMÉNEZ, Mariana E. y ALCÉRRECA-HUERTA, Juan Carlos	35-47
4 Obtención y caracterización de hidrolizados proteicos de quinoa y amaranto por digestión <i>in vitro</i> VÁZQUEZ-LUNA, Alma, DÍAZ-VÁZQUEZ, Alma Elena, LEZAMA-PARADA, Luz Mariana y PIMENTEL-CORTÉS, Vanessa	48-58
5 Pruebas de factibilidad y desempeño de un control híbrido neurodifuso para una unidad turbogás VILLAGRAN-VILLEGAS, Luz Yazmin, PATIÑO-ORTIZ, Miguel, HERNÁNDEZ-GÓMEZ, Luis Héctor y SIORDIA-VÁSQUEZ, Xóchitl	59-68
6 Biosíntesis de Nano Partículas Metálicas LOZANO-CAMARGO, Maria Luisa, LORENZILLA-GARCÍA, Jatziri, GALICIA-LUIS, Laura y BARRERA-CALVA, Enrique	69-85
7 Perfil lipídico en una cepa de la microalga <i>Dunaliella tertiolecta</i> y su potencial para producción de biodiesel MEJIAS-BRIZUELA, Nildia, PALOMARES-RUIZ, Irma, PANIAGUA-SOLAR, Laura y GOMEZ-CORDOBA, Fidel	86-103
8 El comportamiento del consumidor ante la oferta de productos ecológicos en bebidas embotelladas en el sur de Tamaulipas GONZALEZ-DURAN, Nora Hilda, MARTINEZ-GARCIA , María Elena y GUZMAN-GARCIA, Juan Carlos	104-114
9 Codigestión anaerobia como alternativa para el tratamiento de aguas residuales lácteas y la generación de biogás y biosólidos BERNAL-MARTINEZ, Arodí, GONZÁLEZ-LÓPEZ, Gloria Inés y CUEVAS-RODRIGUEZ, Germán	115-141
10 Agricultura sostenible: herramienta para la soberanía alimentaria GONZÁLEZ-LEÓN, Yared , ANDUCHO-REYES, Miguel Angel, CARTAGENA-LUNA, Adriana y MERCADO-FLORES, Yuridia	142-153

Capítulo 1 PM₁ en el aire exterior: fuentes, contenido de especies iónicas y propiedades alcalinas en el Área Metropolitana de Guadalajara, Jalisco-México

Chapter 1 PM₁ in outdoor air: sources, ion species content and alkaline properties in the Guadalajara Metropolitan Area, Jalisco-Mexico

OJEDA-CASTILLO, Valeria†^{1,2}, SÁNCHEZ-TORRES, Perla Berenice¹, HERNÁNDEZ-MENA, Leonel*¹

¹Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C., Unidad de Tecnología Ambiental

²Universidad Tecnológica de Jalisco, División de Química Aplicada

ID 1^{er} Autor: Valeria, Ojeda-Castillo / **ORC ID:** 0000-0002-1397-0589, **CVU CONACYT ID:** 417629

ID 1^{er} Coautor: Perla Berenice, Sánchez-Torres / **ORC ID:** 0000-0003-3646-2111, **CVU CONACYT ID:** 666703

ID 2^{do} Coautor: Leonel, Hernández-Mena / **ORC ID:** 0000-0001-9120-5527, **CVU CONACYT ID:** 42463.

DOI: 10.35429/H.2020.8.1.23

V. Ojeda, P. Sánchez y L. Hernández

*lhernandez@ciatej.mx

A. Marroquín, J. Olivares, L. Cruz y A. Bautista. (Coord) Ciencias ambientales, uso de recursos. Handbooks-©ECORFAN-México, Querétaro, 2020.

Resumen

Las partículas finas (<1 micrómetro o PM_{10}) pueden tener efectos adversos sobre la salud humana debido a su tamaño y composición. Se colectaron muestras de PM_{10} en dos sitios (Centro y Tlaquepaque) del AMG durante la temporada de secas cálidas, se analizaron para determinar concentraciones de aniones y cationes mediante cromatografía de iones. Los niveles de PM_{10} , \sum Aniones, $HCOO^-$, Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , $C_2O_4^{2-}$, \sum Cationes, Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , y Mg^{2+} sugieren concentraciones homogéneas en los dos sitios. Las especies más abundantes en cada sitio son SO_4^{2-} , NH_4^+ , NO_3^- , Na^+ , y K^+ . Las fuentes secundarias de SO_4^{2-} , NH_4^+ , y NO_3^- sugieren que los gases precursores (SO_2 , NO_x , y NH_3) contribuyen significativamente a las concentraciones de iones en PM_{10} . El oxalato muestra una fuerte correlación con K^+ , a partir de la quema de biomasa, y los principales iones secundarios ($\sum SO_4^{2-}$, NH_4^+ , NO_3^-), por procesos de formación secundarios. La correlación negativa entre Na^+ y Ca^{2+} indica una fuente antropogénica. El balance de iones, la alta cantidad del total de cationes en el área de estudio, la comparación entre NH_4^+ observado y calculado, y la relación de amonio total/sulfato total (pendiente >5.99) son evidencia de condiciones ricas en amoníaco (ambiente alcalino). Los resultados de este estudio son las primeras caracterizaciones químicas de PM_{10} , incluido su contenido de aniones y cationes, de la segunda área urbana más grande de México.

Partículas finas, PM_{10} , Iones, Alcalino, Fuentes

1 Introduction

The particulate matter (PM) of outdoor air varies in size, shape, and chemical composition (Wenger et al., 2009). Whitby (1978) stated that fine particles are those <1 micron (also called PM_{10}) and may either be primary particles (such as diesel soot) or secondary particles formed by precursor gases. The secondary particles are formed through the nucleation of gas-phase compounds with low or non-volatility, from biogenic or anthropogenic sources, followed by the growth of a small particle. Nucleation and the subsequent growth processes influence the total number of particles and the size distribution, as well as the chemical and optical properties of the atmospheric aerosol. Coarse, fine, and ultrafine particles are generated by different processes. This suggests that each size has a particular composition of chemical species, allowing inferences about their emission sources and formation processes (Harrison et al., 2004; Whitby, 1978).

The properties of airborne particles—such as size distribution and chemical composition—are essential for assessing their adverse impacts on human health and their effects on visibility in urban areas. Therefore, some researchers propose using PM_{10} as the pollution standard for air quality because it may provide more information about the sources of pollution than $PM_{2.5}$ and the association between fine particles and lung cancer and other cardiopulmonary diseases.

Numerous studies have determined ionic species in PM. However, the mass size distribution of water soluble inorganic and organic species is not well understood. Information about species such as sulfate, nitrate, ammonium, and other species in aerosol remains a significant knowledge gap (Tsai, Lin, Yao, & Chiang, 2012). Additionally, few studies have included new information about the distribution and secondary formation of ionic species. For example, sulfate and some organic compounds have a strong presence in fine particles (Pateraki et al., 2014) because of their formation through homogeneous nucleation. Tsai, Sopajaree, Chotruksa, Wu, & Kuo (2013) suggest that high amounts of sulfate could be associated with photochemical formation, related to anthropogenic activity and photochemical reactions. Other works (Yan et al., 2015) stated that physical and chemical characteristics of PM_{10} are particularly significant for understanding fog formation and particle scavenging processes, particularly for secondary transformation. The fine particles' chemical composition includes inorganic species (e.g., ammonium, nitrate, and polar organic compounds) originating from the coagulation of ultrafine particles. However, organic species are a substantial fraction of the total mass of fine particles in the troposphere, ranging from 20% to 90% (Finlayson-Pitts & Pitts, 2000; Squizzato et al., 2016).

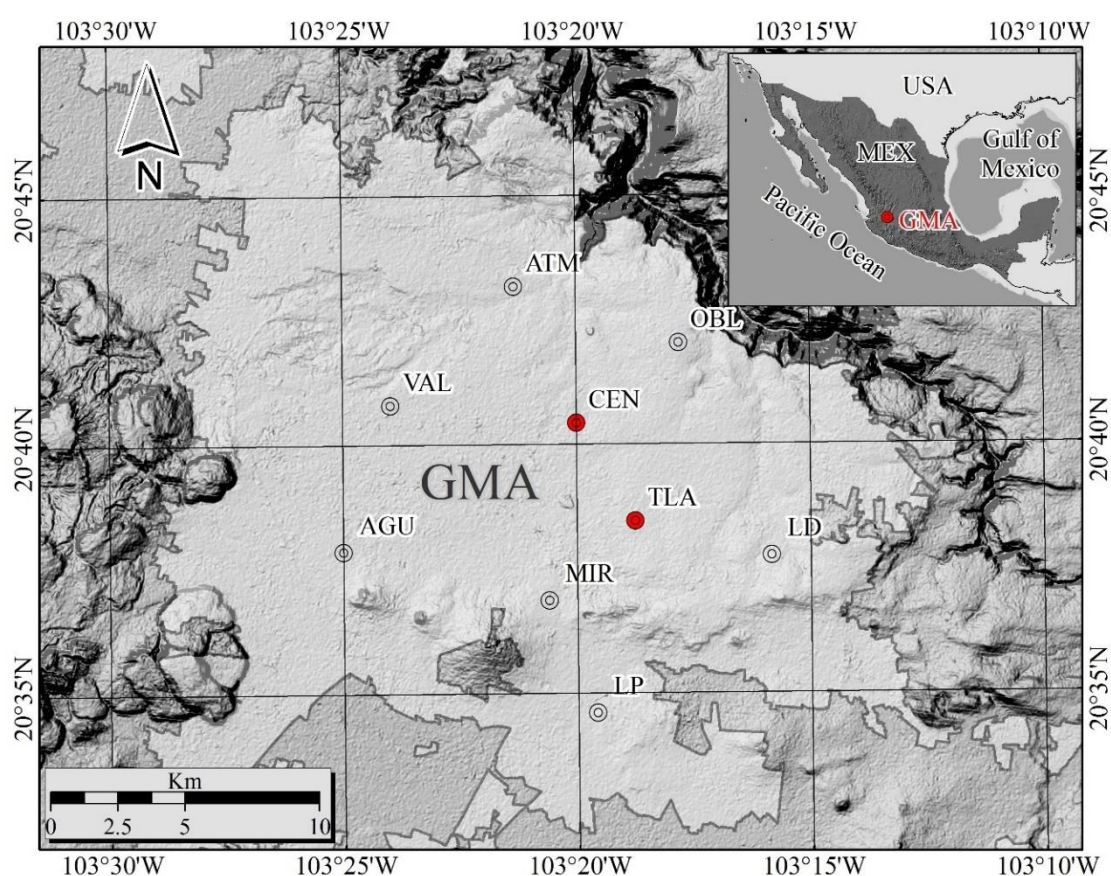
Understanding the concentrations, chemical compositions, and sources of fine atmospheric particles are essential for evaluating air quality, especially in cities with higher population density and elevated exposure to air pollutants. This work aims to determine the chemical composition of inorganic and organic ion species associated with PM₁ in the Guadalajara Metropolitan Area (GMA) in Jalisco, Mexico. This study is the first to determine the importance of sulfate, nitrate, and ammonium as chemical components of fine particles that can then be used to explore the origins of these components during days with high solar radiation.

2 Methodology

2.1 Sampling sites

Particle collection was conducted during the warm-dry season (April-June 2015) at two sampling sites. The first sampling site was the city center (CEN), located in the downtown area of the GMA (20° 40' 25" N; 103° 19' 59" W), which is characterized by significant vehicular and commercial activity. The second sampling site was Tlaquepaque (TLA), located in the southeastern direction from the CEN (20° 38' 27" N; 103° 18' 45" W), which is characterized by residential areas with major avenues and effects from industrial zones to the southwest (Figure 1.1).

Figure 1.1 Location of the PM₁ sampling sites at the CEN and TLA in the Guadalajara Metropolitan Area during the warm-dry period



Source: (Ojeda-Castillo et al., 2019)

2.2 Particles collection and gravimetric analysis

Sets of 14 and 13 samples of PM₁ were collected in the CEN and TLA, respectively, starting at 00:00 h for 24 h with three-day intervals between samplings. Partisol Samplers (Model 2300, R & P) with multi-channels were used at both sites so that simultaneous samples could be collected. The samplers were programmed to a flow of 16.7 L/min. One channel was used for the gravimetric analysis utilizing a polytetrafluoroethylene (PTFE)-coated cartridge inlet with a PM₁ impactor (ChemComb 3500), equipped with a PTFE filter (46.2 mm diameter, Whatman) for PM₁ collection. The particulate mass was determined gravimetrically by pre- and postconditioning the sample for 24 h at a relative humidity of 38% ($\pm 4\%$) and mean temperature of 21 °C (± 0.4 °C) in an analytical microbalance (Sartorius SE2- F, with sensitivity 0.0001 mg). Another channel with the same types of inlet and flow cartridges but using nylon filters (diameter 47 mm, Magna) was used to collect particulate matter to determine the organic and inorganic ions. Filters were conditioned as described previously. Laboratory filter blanks and field filter blanks were also included on the sampling days. All sampling filters were transported and stored at 4 °C until sample treatment. The results of the gravimetric analysis were expressed as $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

2.3 Aqueous extraction with ultrasonic bath

The nylon filters were extracted in an ultrasonic bath (Branson 5510) for one h and 23 °C, placing them in PP tubes (polypropylene) with ten mL of deionized water. The extracts, once obtained, were filtered through nylon membranes of 0.45 micrometers diameter pore to reduce the presence of particles. Subsequently, the extracts were transferred to injection tubes for analysis by Ion Chromatography.

2.4 Anions and cations in aqueous extracts from PM₁

The determination of the anions and cations present in the aqueous extracts from the PM₁ was performed by ion chromatography. Chemical and electronics suppression for anions was used, and only electronic suppression for cations (Advanced Compact IC 861, Metrohm), coupled with a conductivity detector and autosampler (Advanced Sample Processor 838, Metrohm). For anions, a Metrosep A Supp5_150 (Metrohm) column was used with sodium carbonate-sodium bicarbonate (3.2:1 mM) as the mobile phase at a flow rate of 0.7 mL/min (9.6 MPa, 35 °C, and 20 min). A Metrosep C2_150 (Metrohm) column was used for cation analysis; tartaric acid-dipicolinic acid solution (4.1:0.8 mM) was used as the mobile phase at a flow rate of 0.9 mL/min (10.3 MPa, 35 °C, and 20 min). The anion and cation standards considered in this study were CH₃COO⁻ (acetate), HCOO⁻ (formate), Cl⁻, NO₂⁻, Br⁻, NO₃⁻, PO₄⁻, SO₄²⁻, C₂O₄²⁻ (oxalate), Li⁺, Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Ca²⁺, and Mg²⁺; all at a higher purity (99%-100%) or ACS grade (High-Purity Standards). The identification of these species in the PM₁ extracts was performed by matching individual standards retention times without exceeding a variation of $\pm 5\%$ (min). Anion and cation quantifications were done by injecting multi-standard and multilevel calibration solutions (0.15 to 10 $\mu\text{g}/\text{mL}$) by triplicate. The calibration results were analyzed using weighted linear regression, and the results showed that there was a significant correlation between the concentration ($\mu\text{g}/\text{mL}$) and the increase in conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}\cdot\text{s}$) for every analyte ($r > 0.992$ with $p < 0.00001$ in all cases). For quality control, the total mass of the analytes (μg) was corrected for recoveries, extraction volume, laboratory filter blanks, and field filter blanks as proposed elsewhere (Hernández, Gallardo, Díaz & Villegas, 2017). The limits of detection (LoD) and limits of quantitation (LoQ) for every analyte were estimated from the linear regression. The LoD for anions ranged between 0.10 and 0.44 ppm (CH₃COO⁻ and NO₃⁻, respectively), whereas the LoQ ranged between 0.21 and 3.13 ppm (CH₃COO⁻ and Cl⁻, respectively). The LoD for cations was between 0.07 and 0.47 ppm, and the LoQ was between 0.14 and 0.94 ppm (for both Li⁺ and K⁺, respectively). All PM₁ extracts were injected in duplicate. The results of anions and cations were expressed as $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

2.5 Meteorological parameters

During the sampling campaigns, meteorological parameters such as temperature (average, maximum and minimum; in Celsius degrees), relative humidity (RH; %), wind direction (WD), wind speed (WS, correspond to the mode; in m/s), maximum wind speed (MWS, correspond to mode; in m/s), atmospheric pressure (AP, mmHg), solar radiation (SR; W/m²), 24 h maximum solar radiation (MaxSR; W/m²), UV radiation, and maximum UV radiation (MaxUV; W/m²) were registered (Vantage Pro2 Plus, Davis) every 10 minutes at the two sampling sites. The time series of these variables enabled the daily descriptive statistics to be calculated. For wind direction and wind speed, the most frequent data were reported for the period.

2.6 Statistics analysis

The *Shapiro-Wilk* normality test was used for the data sets of the study variables, which demonstrated the absence of normality. Because of this, nonparametric statistics were used to analyze the results. For the *intersite* analysis, PM₁, anions, cations data, and meteorological variables were contrasted using the *Mann-Whitney* test. Comparisons of ion species in one place (i.e., *intrasite*) were made using the *Kruskal-Wallis* test. The correlation analysis with *Spearman's rho* was applied to the data sampling site or the whole of both sites as a single set of results because of the absence of significant differences in most of the variables studied (the latter case will be referred to as *study area*). Linear regression analysis by least squares was used to demonstrate the existence of chemical processes, such as the neutralization between anions and cations present in the particles, and to estimate the levels of the coefficient of determination (r^2) between some of the variables. All these tests were performed using *Statistica* software v6.

3. Results and Discussion

3.1 Variations of the particle matter

Descriptive statistics of the PM₁ concentrations during the total sampling period at both sites are shown in Table 1.1, and the daily variation is shown in Graphic 1.1a. Although there were some increases in particles between days 42,141 and 42,158 in the CEN, there were no *intersite* differences ($p > 0.18$) (Graphic 1.1b), probably because of a higher variation of PM₁ in the CEN.

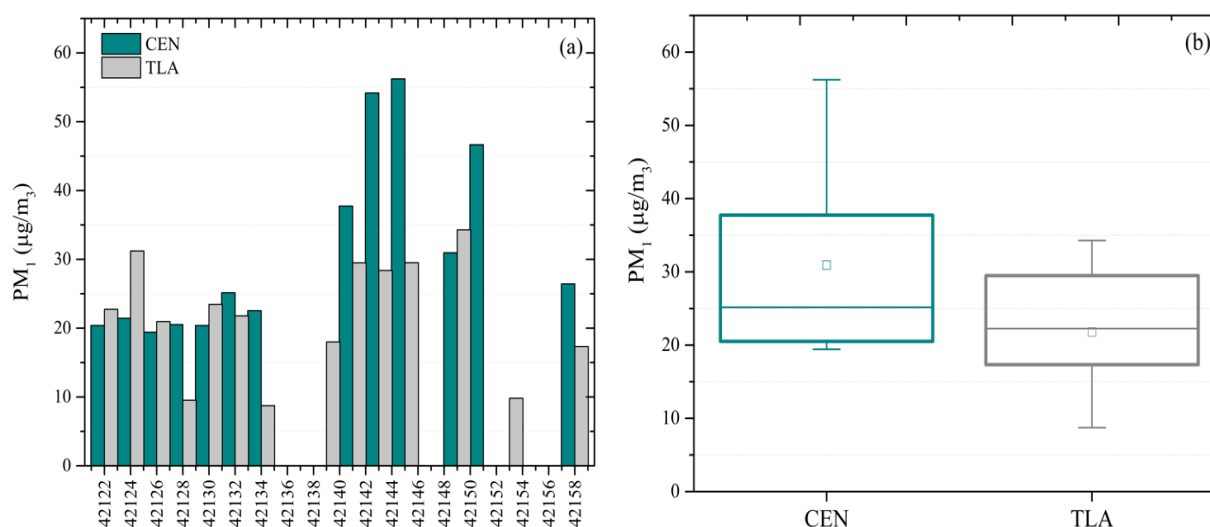
Table 1.1 Descriptive statistics of PM₁ and anions-cations concentrations at the Guadalajara Metropolitan Area during the warm-dry period.

CEN ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)						
	n	Mean	S.D.	Median	Maximum	Minimum
PM ₁	13	30.92	13.39	25.15	56.24	19.42
HCOO ⁻	13	0.12	0.02	0.11	0.16	0.09
Cl ⁻	1	0.19	--	0.19	--	--
NO ₃ ⁻	13	0.49	0.24	0.42	0.89	0.18
SO ₄ ²⁻	13	1.17	0.61	1.33	1.91	0.23
C ₂ O ₄ ²⁻	13	0.14	0.04	0.14	0.19	0.08
Σ Ani	13	1.92	0.83	2.01	2.90	0.58
Σ Ani/PM ₁ *	13	6.44	2.55	5.88	10.65	2.84
Na ⁺	13	0.62	0.10	0.58	0.82	0.50
NH ₄ ⁺	13	1.18	0.71	1.27	2.03	0.04
K ⁺	13	0.60	0.36	0.50	1.63	0.22
Ca ²⁺	13	0.31	0.15	0.29	0.77	0.20
Mg ²⁺	4	0.05	0.04	0.04	0.10	0.02
Σ Cat	13	2.72	1.10	2.70	5.07	1.29
Σ Cat/PM ₁ *	13	9.08	2.55	9.02	13.91	6.27
$(\Sigma$ Ani+ Σ Cat)/PM ₁ *	13	15.52	4.99	13.42	24.56	9.18
TLA ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)						
	n	Mean	S.D.	Median	Maximum	Minimum
PM ₁	14	21.80	8.37	22.26	34.28	8.73
HCOO ⁻	14	0.11	0.03	0.10	0.18	0.08
Cl ⁻	5	0.21	0.04	0.21	0.27	0.17
NO ₃ ⁻	14	0.41	0.17	0.39	0.73	0.20
SO ₄ ²⁻	14	1.06	0.56	1.11	2.04	0.21
C ₂ O ₄ ²⁻	14	0.13	0.04	0.13	0.22	0.08
Σ Ani	14	1.71	0.73	1.69	2.89	0.57
Σ Ani/PM ₁ *	14	8.78	4.93	7.70	21.74	2.61
Na ⁺	14	0.76	0.29	0.62	1.30	0.45
NH ₄ ⁺	14	1.12	0.65	1.12	2.14	0.09
K ⁺	14	0.52	0.21	0.48	0.94	0.25
Ca ²⁺	14	0.30	0.13	0.26	0.56	0.10
Mg ²⁺	5	0.07	0.01	0.07	0.09	0.05
Σ Cat	14	2.73	1.14	2.62	5.00	1.02
Σ Cat/PM ₁ *	14	13.98	7.02	10.84	27.80	5.75
$(\Sigma$ Ani+ Σ Cat)/PM ₁ *	14	22.76	11.79	18.10	49.54	8.36

*Ratio; Σ Ani: sum anions; Σ Cat: sum cations; S.D.: standard deviation.

Source: Own elaboration.

Graphic 1.1 (a) Concentration of PM₁ sample collected over 24 h in the CEN and TLA; **(b)** Particle concentration between sites ($p>0.05$). Box and Whisker plot represents minimum, 1st quartile, median, 3rd quartile, and maximum values of PM₁ concentration



Additionally, the particles at both sites showed a weak correlation ($r=0.44$, $p>0.05$), which suggests that they may be influenced by the different types of local sources that determine the daily variation of PM_{10} in the air. These results suggest homogeneous concentrations of particles in ambient air from the CEN to TLA (i.e., the downtown area to the southeast of the city). The close of the sites or the atmospheric stability conditions of the warm-dry period could partially explain these results. Wang, Zhuang, Sun, & An (2006) reported that the intensity of the emission sources could mainly control the fine particles' variation, even more so than the meteorological conditions. Likewise, Titos, Lyamani, Pandolfi, Alastuey, & Alados-Arboledas (2014) suggested that the concentration of particulate matter in a specific location depends on a great number of factors, such as local and regional sources of particles, as well as meteorological and geographical conditions. Minguillón, Querol, Baltensperger, & Prévôt (2012) proposed that low coefficients between the levels of PM_{10} at two distant sites during the summer could also be attributed to a small number of data points and low particle concentrations in the air, which make them more susceptible to being influenced by local emissions.

The PM_{10} median of the standard concentration in ambient air at the CEN and TLA were 25.15 and 22.26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. Table 1.2 shows the PM_{10} levels reported for other cities in the world, which are highly variable depending on the type of population (urban or rural) and the sampling season. Higher particle concentrations occur in winter periods in some cities, suggesting that this behavior can be partially explained by the stability of atmospheric conditions (Agudelo-Castañeda & Teixeira, 2014). Data from Mexico City and other regions of the world provide a reference level of PM_{10} for the GMA, but with the appropriate precautions by different situations, such as climatic conditions, season sampling, emissions intensity, number and type of sources, and particle measurement techniques.

Table 1.2 Concentration of PM_{10} reported for different studies and cities

Country	City	Season	PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Switzerland (Minguillón et al., 2012)	Zurich (Urban)	Winter	17
		Summer	7
	Payerne (Rural)	Winter	12
		Summer	6
China (Huang et al., 2013; Zhang et al., 2015)	Yangtze River Delta	Winter (2013)	63
		Winter (2010)	42
Spain (Titos et al., 2014)	Granada (Urban)	Annual (2006- 2010)	17
Austria (Gomišček et al., 2004)	Vienna (Urban)	Winter	15.5
		Summer	14.2
	Linz (Urban)	Winter	17.6
		Summer	11.9
	Graz (Urban)	Winter	20.9
		Summer	14.1
Brazil (Agudelo-Castañeda & Teixeira, 2014)	AUPHEP-2 (Rural)	Winter	12.1
		Summer	12.8
	Porto Alegre (Canoas-Urban)	Winter	11.6
		Summer	8.6
	Porto Alegre (Sapucaia do Sul- Urban)	Winter	17.5
		Summer	13.5
Mexico (Guerrero, Alvarez, Retama, López, Castro & Salcedo, 2017)	Mexico City (urban)	Winter	27.8

Source: Own elaboration

3.2 Anions and cations from PM₁ aqueous extracts

Table 1.1 shows the descriptive statistics of the ion concentrations in the PM₁ aqueous extracts for the CEN and TLA. The *intersite* comparison for each ion (except Cl⁻) indicates that the concentrations are non-different ($p > 0.5$, all cases), suggesting uniformity in the content of the chemical species identified in PM₁ from the two sites at the GMA. The result is consistent with fine particle homogeneity in ambient air from the CEN and TLA. The *intersite* comparisons indicated that the sum of the anions and sum of the cations (Σ Anions and Σ Cations, respectively) are equal ($p = 0.66$ and $p = 0.96$, respectively). Additionally, ions from both sites showed a strong correlation ($0.95 > r > 0.85$, all cases with $p < 0.05$, except for Na⁺, Cl⁻, Ca²⁺, and Mg²⁺), suggesting that similar local sources formed them. The *intrasite* comparison for the CEN and TLA suggests that Σ Anions and Σ Cations are equal ($p > 0.05$, both cases). However, when both variables are compared for the *study area*, the result is different and more reliable with high cation concentrations ($p < 0.003$). The higher cation concentrations in the PM₁ aqueous extracts suggest a probable effect on the pH of the particles.

Concerning to the individual ions, SO₄²⁻ and NH₄⁺ showed the highest concentrations at both locations, with their medians oscillating between 1.1 and 1.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Other abundant ions at the two sites were Na⁺, K⁺, and NO₃⁻. At both locations, no significant *intrasite* difference was determined among these five species ($p > 0.5$ in all cases), which makes them equally important in contributing to PM₁ under these sampling and analysis conditions. To complement these results, species such as HCOO⁻ (formate) and C₂O₄²⁻ (oxalate) showed medians less than 0.14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ at both sites without *intrasite* differences ($p > 0.05$ in both cases). Magnesium showed a median of $< 0.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$ at both sites, whereas the Ca²⁺ concentration was 0.29 and 0.26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in the CEN and TLA, respectively. Although the five most abundant species (SO₄²⁻, NH₄⁺, Na⁺, K⁺, and NO₃⁻) showed significant differences from the least abundant species (HCOO⁻, C₂O₄²⁻, Ca²⁺, and Mg²⁺), no significant difference was found at least in one comparison. These results allow the most abundant ions to be defined with the PM₁ in ambient air at the GMA.

The above results (expressed in percentages) provide a better understanding of the contribution of the total ion sum (Σ TI) and principal secondary ion sum (Σ PSI: SO₄²⁻, NO₃⁻ and NH₄⁺) determined in this study, as well as the contribution made by the Σ Anions and Σ Cations, to PM₁ concentrations. The Σ TI at the CEN and TLA was 14.5% and 19.1%, respectively, whereas the Σ PSI contributed 12.9% and 8.6% to the fine particles at the CEN and TLA, respectively. The Σ PSI in this study was less than 20% reported by other authors (Squizzato et al., 2016; Titos et al., 2014) during the summer in Venice, Italy. In this report, the Σ Anions and Σ Cations in the CEN contributed 42.9% and 57.1% to Σ TI, respectively, whereas, in TLA, they contributed 38.1% and 61.9%, respectively. The Σ PSI at the CEN provided 60.1% of Σ TI and 57.3% in TLA. Therefore, the contribution made by Σ PSI becomes more important to Σ TI, and its contribution is low concerning PM₁. These results agree with those previously reported by Minguillón et al. (2012), which suggested that secondary inorganic compounds (e.g., sulfates, nitrates, and ammonium) are mainly present in fine particles. Perrone et al. (2013) found that the dominant PM₁ species were SO₄²⁻, NO₃⁻, and NH₄⁺ in the suburban area of Salento, Italy. Titos et al. (2014) suggested that secondary inorganic aerosols (SO₄²⁻, NO₃⁻ and NH₄⁺) were the main components of PM₁. In particular, sulfate levels are slightly higher in spring and summer (Querol et al., 1999) than in other seasons, which is probably related to intense solar radiation. In this study, sampling was conducted during a period in which temperatures and solar radiation levels are the highest (April-May) (Díaz-Torres et al., 2017), which explains the high levels of sulfate (one of the main species contributing to the secondary inorganic aerosols) associated with PM₁ in the CEN and TLA. Therefore, the most abundant ions associated with PM₁ in the GMA's ambient air correspond positively with results observed in other cities. These suggest that species such as SO₄²⁻, NO₃⁻, and NH₄⁺ are secondary components of fine particles produced by the transformation of their precursors (e.g., SO₂, NO₂, and NH₃) (Wang et al., 2006; Zhang et al., 2015).

The chemical characterization of PM₁ suggests that species such as Na⁺ and K⁺ and their sources are also important in the formation of fine particles in the study area. The origin of Na⁺ and K⁺ could be related to different anthropogenic activities around the sampling sites. The K⁺ is reported as a product of biomass burning at low concentrations, although their concentrations could increase during episodes of higher contamination (Engling et al., 2011; Tsai et al., 2013). The presence of Na⁺ in urban areas may be related to specific industrial activities, as in the case of the glass industry (Minguillón et al., 2012).

The source of Na^+ in TLA may probably be related in part to the intense artisanal activity and glass manufacturing in the area, as well as the proximity of an industrial area located to the southwest (Figure 1.1).

Less abundant organic ions such as HCOO^- (formate) and $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ (oxalate)—from the group of monocarboxylates and dicarboxylates, respectively—were determined in aqueous extracts from PM_{10} , whereas CH_3COO^- (acetate) was below the LoD. Formate may result from direct biogenic and anthropogenic emissions (Glasius et al., 2000). However, an important part of this compound could be derived from secondary transformations (Tsai et al., 2013). Oxalate has been reported to be the most abundant in the group of dicarboxylate compound, because oxalic acid is the final product of the photochemical decomposition (secondary reactions) of other dicarboxylic acids in the atmosphere from biogenic and anthropogenic precursors (Hsieh, Chen, Wan, Tsai, & Tsai, 2008; Hsieh, Kuo, Chen, & Tsai, 2009; Lim, Carlton, & Turpin, 2005; Tsai, Hsieh, Weng, Ma, & Kuo, 2008; Tsai et al., 2013). Oxalate may be present in the emissions from burning biomass (Legrand et al., 2007) and even primary emissions from transport vehicles (Kawamuras & Kaplan, 1987). Laongsri & Harrison (2013) suggested that dicarboxylate concentrations are higher in fine particles, especially in aerosol samples from urban sites.

Both Ca^{2+} and Mg^{2+} (present in five and four samples at TLA and the CEN, respectively), have a mineral origin into coarse particles. Some direct sources that cause their presence are the resuspension of dust on unpaved avenues and streets and/or anthropogenic activities involving crushing geological materials (Aldabe et al., 2011; Tsai et al., 2013). The low concentration of Ca^{2+} and Mg^{2+} , as well as their low frequency in the fine particles of the CEN and TLA, and the greater abundance of sulfate, ammonium, and nitrate suggest that PM_{10} are mainly of secondary origin.

Finally, Cl^- was found during only a few days at TLA, and its sources were intermittent or probably associated with other particle sizes. Related studies with different particle sizes of Cl^- (Huang et al., 2016; Wang, Zhuang, Chen, An, & Zheng, 2007) suggested that Cl^- could be derived from local industry emissions, biomass (coal) or waste burning. Other authors (Harrison & Yin, 2000) indicated that Cl^- in atmospheric particles result in neutralization between ammonia and HCl vapors. The latter of which comes from sources such as incinerators and power stations.

Table A1 shows an *intrasite* matrix of the *Spearman's rho* with the study variables. Correlation patterns are shown in the sampling sites. At the CEN, HCOO^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$, Na^+ , NH_4^+ , K^+ , ΣAnions , and $\Sigma\text{Cations}$ had r values between 0.65 and 0.82 with PM_{10} ($p < 0.05$ in all the cases). In TLA, the same variables ranged from 0.28 to 0.49 with PM_{10} , all $p > 0.05$. The values of r were significant when they were estimated for the *study area* (0.45 to 0.63, all $p < 0.05$), highlighting the importance of sample size to define the relationship between the variables of interest. The r values of ΣPSI and ΣTI with PM_{10} at the CEN were also significant when determined from the *study area* (all $p < 0.05$). These latest results suggest that part of PM_{10} at the CEN probably comes from biomass burning, vehicle emissions, biogenic emissions, or atmospheric secondary reactions. In TLA, the absence of significant relationships between PM_{10} and some specific ions suggests that the organic component could better explain the variation of fine particles ($\Sigma\text{oxalate} + \text{formate}$ have $r = 0.55$ with $p < 0.05$ and at the CEN an $r = 0.79$ with $p < 0.05$). Other studies (Zhang et al., 2015) proposed the contribution of organic components ranging between 47% and 62% of the PM_{10} (Pateraki et al., 2014).

In the case of the correlation between Ca^{2+} and PM_{10} , r was negative or very low ($p > 0.05$) for both sites (with Cl^- and Mg^{2+} not being determined because of a lack of data), which suggests that PM_{10} have scarce influence from emission sources that origin calcium and magnesium (e.g., geological or mechanical). Overall, Ca^{2+} showed low or negative coefficients with other ion species at both sites and in the *study area* (all $p > 0.05$), which indicates that fine particles are mainly composed of secondary ions, and suggest that coarse particles have mineral components, especially Ca^{2+} and Mg^{2+} (Titos et al., 2014). These results provide guidelines for linear regression analysis using least squares to establish the coefficient of determination (r^2) to understand better how PM_{10} variation depends on the presence of ions in the *study area* (Table 1.3). Anions explain a low variation of PM_{10} ($r^2 = 0.30$, $p < 0.002$), whereas the $\Sigma\text{Cations}$ was $r^2 = 0.39$ ($p < 0.0007$). Additionally, the ΣPSI of $r^2 = 0.26$ ($p < 0.006$) and ΣTI of $r^2 = 0.31$ ($p < 0.002$) explain the variation of PM_{10} . With respect to individual ions and their relationship with PM_{10} , NO_3^- resulted in $r^2 = 0.27$ ($p < 0.006$), SO_4^{2-} in $r^2 = 0.29$ ($p < 0.003$), NH_4^+ in $r^2 = 0.23$ ($p < 0.01$), Na^+ in $r^2 = 0.22$ ($p < 0.02$), and K^+ in $r^2 = 0.49$ ($p < 0.00004$).

The above results give specific evidence of the effect of some of the most abundant species of ions (NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ , Na^+ and K^+) on the variation of PM_{10} . These results suggest that the origins of these species are the likely sources of the concentration of fine particles in the *study area*. However, r^2 values are moderate to low, which allows the possibility that some other chemical species could better explain the variation of PM_{10} . For example, $\Sigma\text{oxalate+formate}$ had $r^2=0.40$ ($p<0.0004$) in the *study area*.

Table 1.3 Regression analysis parameters of PM_{10} and anions and cations in the *study area*

Study Area	Equation	r^2	p-value
ΣAnions	$y = 1.92 + 8.43x$	0.30	<0.002
$\Sigma\text{Cations}$	$y = 9.14 + 6.19x$	0.39	<0.0007
ΣPSI	$y = 14.22 + 4.41x$	0.26	<0.006
ΣTI	$y = 9.26 + 3.70x$	0.31	<0.002
NO_3^-	$y = 14.36 + 21.22x$	0.27	<0.006
SO_4^{2-}	$y = 13.75 + 11.18x$	0.29	<0.003
NH_4^+	$y = 16.39 + 8.50x$	0.23	<0.01
Na^+	$y = -0.99 + 44.16x$	0.22	<0.02
K^+	$y = 10.09 + 28.84x$	0.49	<0.00004
$\Sigma\text{oxalate+formate}$	$y = -3.9 + 119.90x$	0.40	<0.0004

ΣAni : sum anions; ΣCat : sum cations; ΣPSI : sum principal secondary ions; ΣTI : sum Total Ions.
Higher values in bold

Source: Own elaboration

3.3 Anions and Cations sources

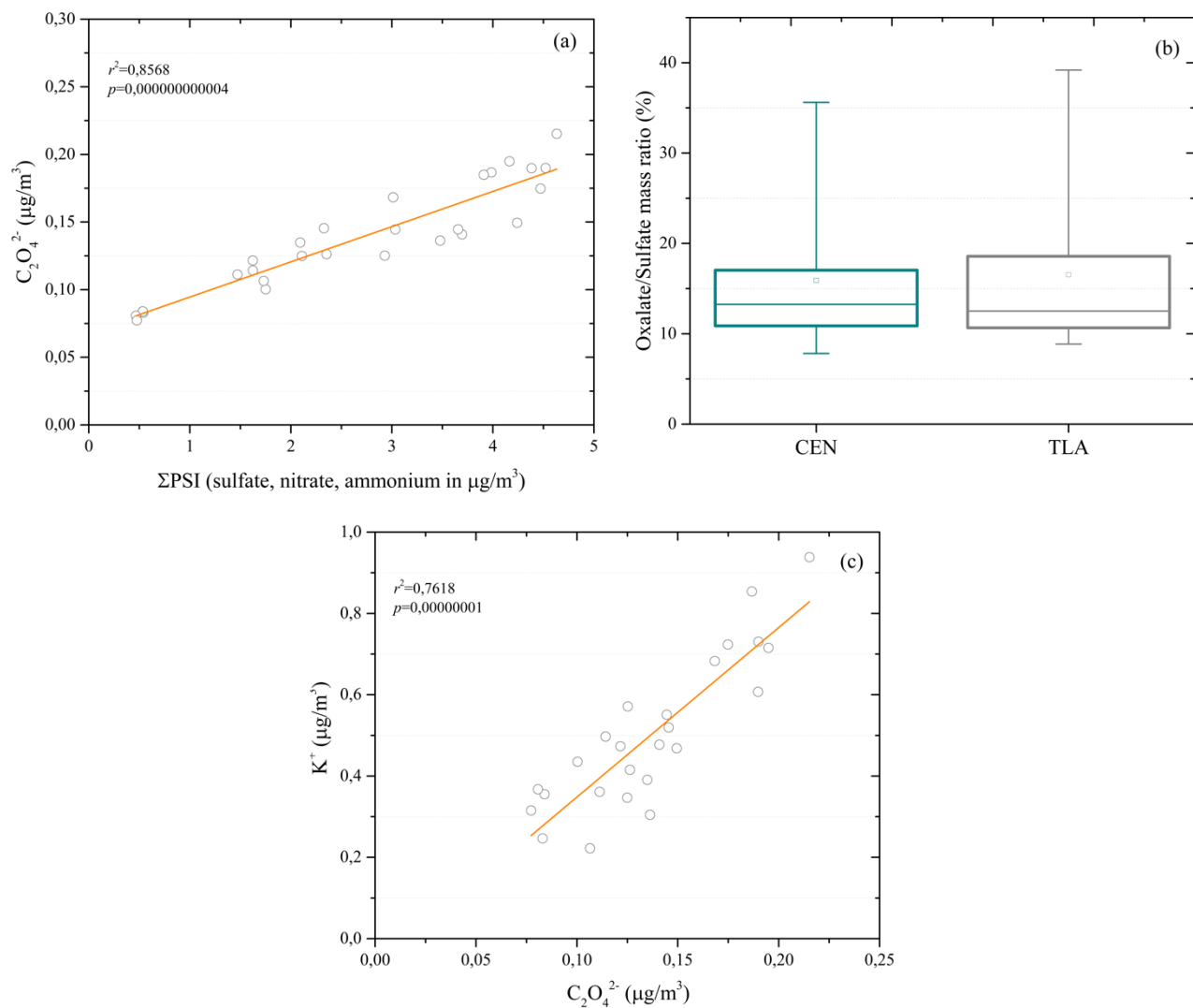
Anions and cations have similar correlation guidelines at the individual sites (and in the *study area*), which highlights the relationship between the five main ions (NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ , Na^+ and K^+). The data (Table A1) suggest that there are common sources, via either direct emission or secondary atmospheric chemical processes, for the origins of these ions in PM_{10} . Based on these observations, some simple estimates can be made to increase the evidence of potential emission sources. For example, moderate r values were observed between the presence of SO_4^{2-} and NO_3^- at both sites. The $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ ratio (in mass) could be used to assess the relative importance of stationary and mobile sources, assuming that NO_2 comes from vehicle emissions and contributes to the formation of NO_3^- and that SO_2 comes from coal combustion and is usually converted to SO_4^{2-} in urban atmospheres (Yan et al., 2015). A high $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ ratio will occur when motor vehicle emissions exceed coal-burning emissions (Du et al., 2011). In the CEN and TLA, the medians of $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ ratio were <0.5 with maximum values at both sites between 0.76 and 0.93, respectively. These values preliminarily suggest that mobile sources and their emissions are not high at these sites. However, these data should be viewed with caution because the NO_3^- and SO_4^{2-} levels were not different ($p>0.05$) and provided a similar contribution to the PM_{10} concentration at both sites. A study by Zhang et al. (2015) reported a ratio of 0.96 on low pollution days and 1.64 on high pollution days. A likely explanation for the lower $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ ratio in the GMA is the low thermal stability of NH_4NO_3 during periods of high temperature, which promotes its dissociation from fine particles or favors the formation of gaseous HNO_3 (Aldabe et al., 2011; Guo et al., 2010; Laongsri & Harrison, 2013). A more precise estimate of $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ ratio from vehicle emissions in the GMA could probably be obtained if the contribution of NO_x in the formation of NH_4^+ was considered. The NO_x are transformed into HNO_3 (nitric acid) by oxidation and the subsequent reaction with NH_3 (ammonia) to form ammonium nitrate (median of the $\text{NO}_3^-+\text{NH}_4^+/\text{SO}_4^{2-}$ ratio = 1.39 with a maximum of 2.12 in the *study area*) (Finlayson-Pitts & Pitts, 2000). This estimation does not include the contributions of soil and some agricultural activities to NH_4^+ and does not rely on the assumption that this contribution is low in urban areas. Moreover, NH_4^+ particulates in the fine fraction are mainly formed secondarily, whereas, in the coarse fraction, they are mostly derived from suspended soil that contains fertilizer (Wang et al., 2013). The latest vehicle fleet data have been reported to be 1.84 million vehicles in the GMA (INEGI, 2010). We assume that the vehicle emissions have a more significant impact on the atmosphere, which is an inconsistent condition with the low $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ ratios in the study sites.

Other important relationships were observed in the CEN, where SO_4^{2-} had values $r=0.87$ and $r=0.80$ with ammonium and oxalate, respectively. In TLA, these correlations showed higher values ($r=0.96$ and $r=0.90$, same order). The relationship between NH_4^+ and SO_4^{2-} could be explained because both have a secondary origin from precursors of direct combustion emissions (NO_x and SO_2). Based on this relationship, Zhang et al. (2015) reported $r=0.93$ between SO_4^{2-} and NH_4^+ near Hangzhou, Shanghai, and Nanjing in China, particularly on high pollution days. The relationship between sulfate and oxalate suggests that the organic species have a probable origin in secondary reactions (Yang et al., 2014). For oxalate, this is supported by the r values ($p<0.05$) with NO_3^- and NH_4^+ . The high correlation between oxalate and sulfate is evidence of a similar process to the formation of dicarboxylate (Feng et al., 2012; Yang et al., 2014). Based on this correlation, Langner & Rodhe (1991) found that 80% of sulfate is formed in the global atmosphere from chemical processes occurring in the clouds. This last result provides guidelines for analyzing the linear regression between oxalate and ΣPSI , with $r^2=0.91$ in the CEN and $r^2=0.79$ at TLA, respectively. Graphic 1.2a shows the results of the same analysis for the *study area*, with $r^2=0.86$ ($p<0.05$). This result is evidence of a probable secondary origin of oxalate. Based on this, Laongsri & Harrison (2013) found high r between oxalate and sulfate at $\text{PM}_{2.5}$ and suggested that this may be because of secondary atmospheric processes. Additionally, these authors found that both ions are distributed similarly in fine particles of different sizes.

Furthermore, Tsai et al. (2013) note that $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ and SO_4^{2-} in aerosols are final products of organic and inorganic species, and that the $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}/\text{SO}_4^{2-}$ ratio (in mass) provides information for determining the formation of dicarboxylate from inorganic salts. A high $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}/\text{SO}_4^{2-}$ ratio suggests an increase in the photochemical formation of oxalate. At the CEN, the median was 13.3%, and in TLA it was 12.5%, which are relatively low values (Graphic 1.2b) considering the mass of sulfate (in both sites days 42,128 and 42,130 were between 32% and 39%), although they are higher than the results reported by Hsieh et al. (2008) for $\text{PM}_{2.5}$ particles. These results suggest that only part of the oxalate (<13.3%) present in the PM_1 originate from secondary reactions in the atmosphere.

On the other hand, there is a strong r between the concentrations of $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ and K^+ (Table A1), with K^+ being a specific marker of biomass burning. Regression analysis indicates that the oxalate explained 75% and 79% of the variation of K^+ (water-soluble) in the CEN and TLA (with $r^2=0.76$ in the *study area*, Graphic 1.2c). The results of these analyses suggest that a portion of oxalate can be attributed to direct emissions from biomass burning or even related to vehicular traffic emissions (Tsai et al., 2013). Although K^+ could have a geological origin (Tsai, Wu, Hsu, & Yang, 2010), the two sites showed a negative and low r ($p>0.05$) with Ca^{2+} , which is an indicator of this source (Tsai & Chen, 2006). This reaffirms their origin from direct emissions of burning biomass and probably the same source for a part of the oxalate in PM_1 . Other authors have proposed potassium and oxalic acid as some of the main markers of biomass burning (Hsieh et al., 2008; Lee et al., 2011; Tsai et al., 2013).

Graphic 1.2 (a) Scatter plot and linear regression line between oxalate and Σ PSI concentration (sulfate, nitrate, and ammonium) in the *study area*; **(b)** The $C_2O_4^{2-}/SO_4^{2-}$ ratio (in mass) between sites ($p>0.05$). Box and Whisker plot represent minimum, 1st quartile, median, 3rd quartile, and maximum Oxalate/Sulfate mass ratio values; **(c)** Scatter plot and linear regression line between oxalate and K^+ (of biomass burning origin) in the *study area*



The Na^+ ion showed a negative r and low correlation with the Ca^{2+} in the CEN and TLA, suggesting that it does not have a geological origin. In contrast, sodium correlated with K^+ at the two sites ($r=0.72$ and $r=0.89$, both with $p<0.05$), as well as also with formate, nitrate (except TLA), sulfate, oxalate, and ammonium. All these are species that have proven secondary origins (nitrate, ammonium, sulfate), secondary source or direct emissions (format and oxalate), or sources for direct emission (K^+). These results suggest that Na^+ shares a common origin with any of these species or is an integrating compound with them. As indicated, Na^+ is likely related to the glass manufacturing industry, mainly in TLA.

Although it was not one of the most abundant, formate ion showed a medium to high correlation with oxalate at both sites and higher in the *study area* ($r=0.83$, $p<0.05$), which is similar to other organic ions. In the *study area*, formate also showed higher coefficients with Σ PSI and potassium, and lower coefficients with Na^+ . These results are consistent with other studies that indicated that this species has a source from direct biogenic emissions and anthropogenic emissions (Glasius et al., 2000). However, it is possible that a significant part of this compound could have been derived from secondary transformations (Tsai et al., 2013).

Based on the positive r ($p<0.05$) between species with greater contribution to PM_{10} , it is probable that it could contribute to the formation of some chemical compounds. Sodium nitrate (NaNO_3), ammonium nitrate (NH_4NO_3), and potassium nitrate (KNO_3) would probably be present in the CEN; ammonium nitrate would be present in the TLA; and sodium sulfate (Na_2SO_4), ammonium sulfate [$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$] and potassium sulfate (K_2SO_4) would be present at both sites.

3.4 Neutralization process in PM₁

The atmospheric chemical process of neutralization between anion and cation species was assessed using ion balance. The results of the least-squares linear regression analysis applied to $\sum\text{Anions}$ (HCOO^- , $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$, NO_3^- , and SO_4^{2-}) and $\sum\text{Cations}$ (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , and Mg^{2+}) at $\mu\text{Eq}/\text{m}^3$ (micro equivalent per cubic meter) (Koçak et al., 2007; Pateraki et al., 2014).

The slope in the CEN (2.24) and TLA (3.47) suggests that particles have a deficit in the amount of anion. The anion deficit avoids neutralization of species with basic or alkaline properties (e.g., NH_4^+ , Ca^{2+} , K^+ , and Na^+) in PM₁ (Jacobson et al., 2000; Pateraki et al., 2014). As shown in Graph 1.3a, the slope of the study area (2.88) indicates that the anion deficit of PM₁ scarcely neutralizes the cations and that this condition contributes to the alkaline character of the particles.

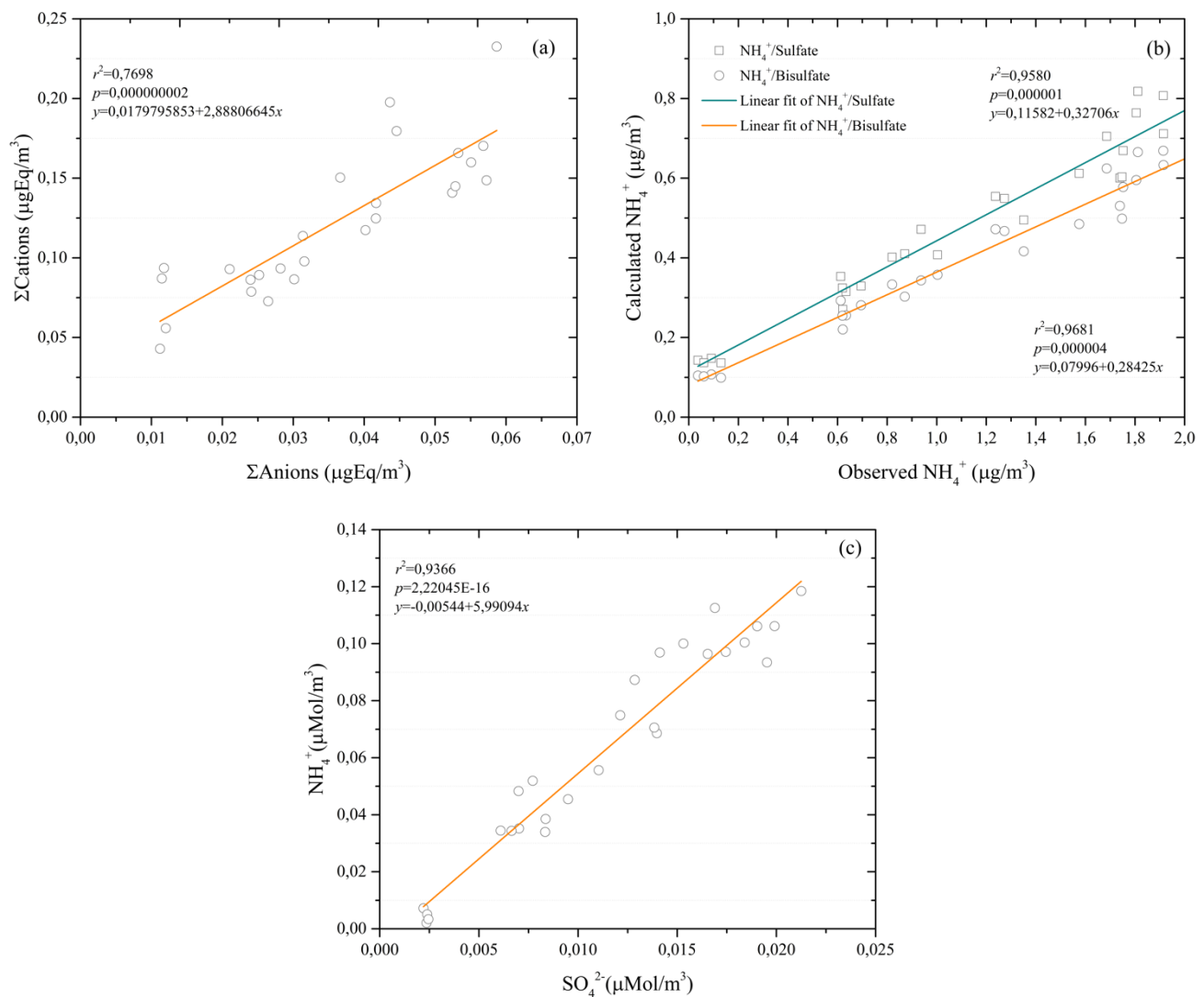
However, the results from ion balance could show slight variations with the number of chemical species included (some in the gas phase) (Moya et al., 2003). The results in this study show the alkalinity of the PM₁ particles from the ion balance and the presence of water-soluble species. The alkalinity of the particles agrees with the higher $\sum\text{Cations}$ levels in *the study area* with respect to $\sum\text{Anions}$ ($p < 0.05$). Other works (Cheng et al., 2011; Squizzato et al., 2016) proposed and used a comparison between the observed and calculated NH_4^+ concentrations to assess the formation of secondary ions. The amounts of NH_4^+ can be calculated using stoichiometric ratios of the more abundant compounds (ammonium sulfate [$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$], ammonium bisulfate [NH_4HSO_4] and ammonium nitrate [NH_4NO_3]). This calculation assumes that NO_3^- is present as NH_4NO_3 and SO_4^{2-} is in the form of $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ or NH_4HSO_4 . The results of the observed and calculated NH_4^+ at the *study area* show that slope=0.33 when $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ is assumed and that slope=0.28 when NH_4HSO_4 is assumed (Graphic 1.3b). These slope values suggest that ammonium with higher availability neutralized fully to aerosols.

The latest results have a strong relationship with the total ammonium/total sulfate (TA/TS) molar ratio. The estimated TA/TS molar ratio has some suppositions and characteristics, as reported previously (Seinfeld & Pandis, 2006). For example, for $\text{TA/TS} < 2$, the environmental conditions are defined as ammonium poor (acidic environment). When $\text{TA/TS} > 2$, the environmental conditions are defined as ammonium rich (no-acidic or alkaline environment). In the *study area*, a TA/TS was found to be 5.99 (CEN=6.01 and TLA=6.04). The ratio values were equivalent to the slope of the linear regressions between SO_4^{2-} and NH_4^+ in $\mu\text{Mol}/\text{m}^3$ (micromole per cubic meter). The molar ratio values suggest that fine particles have a high ammonium concentration, which is a condition that contributes to alkaline properties (Graphic 1.3c). The results of this study indicate higher NH_4^+ concentration, from which only a small portion is neutralized by sulfate in the PM₁. Other reports (Chung et al., 2001) have found that ammonium ion acts as the dominant cation in the fine particle fraction. The results for California indicate ultrafine particles are primarily alkaline (rather than acidic) in nature. It is possible that fine particles $< 1 \mu\text{m}$ in the GMA *study area* could be agglomerated from a large number of ultrafine particles with alkaline properties. There is currently limited knowledge of the potential adverse effects on human health by the inhalation of alkaline ultrafine particles (Chung et al., 2001).

3.5 Meteorological parameters and their relationship with the ionic species

Table 1.4 shows the descriptive statistics about meteorological parameters and their daily variation during the sampling period. Medians of the daily, maximum, and minimum temperatures and RH did not have *intersite* differences ($p > 0.05$, all cases). The wind speed (WS) and maximum wind speed (MWS) in general were $< 3.1 \text{ m/s}$ without significant differences ($p > 0.05$, in both cases). The WS direction and MWS direction in the CEN originate from west and west-northwest, respectively. For TLA, both the WS and MWS directions come from the west. Atmospheric pressure, UV radiation, and MaxUV radiation had higher levels at the CEN ($p < 0.00001$, $p < 0.005$, and $p < 0.00031$, respectively). The SR and MaxSR did not show the *intersite* differences ($p > 0.05$, in both cases).

Graphic 1.3 (a) Scatter plot and linear regression line between ΣCat and ΣAni in the *study area*; (b) Comparison between calculated and observed ammonium in fine particles in the *study area* (NH_4)₂SO₄: calculated $\text{NH}_4^+ = 0.38 \cdot [\text{SO}_4^{2-}] + 0.29 \cdot [\text{NO}_3^-]$ and NH_4HSO_4 : calculated $\text{NH}_4^+ = 0.192 \cdot [\text{SO}_4^{2-}] + 0.29 \cdot [\text{NO}_3^-]$; (c) Scatter plot and linear regression line between SO_4^{2-} and NH_4^+ in $\mu\text{Mol}/\text{m}^3$ in the *study area*



At the CEN and TLA, the *intrasite* and *intersite* patterns of correlation between meteorological parameters (Table A2) were observed. The results of the *intrasite* pattern correlation are $p < 0.05$ in some cases. The *intersites* pattern correlation is highlighted by the frame cell in a diagonal line, with numerous coefficients having $p < 0.05$ (except for WS and MWS). The results suggest that the sampling sites have similar physical environments—except for atmospheric pressure, UV radiation, and MaxUV radiation—and that there are weak correlations between wind speeds at both sites. The similarities and differences observed in the meteorological parameters and the pollutants related to PM_{10} could be explained by geographical locale, altitude, and cloud presence during the sampling days. They could also be related to the thermal inversion and conditions that occur over several days in the GMA from January to June, which are less favorable to pollutant dispersion. The orographic and natural barriers around the GMA could also obstruct the normal wind flow and intensify pollutant stagnation (SEMARNAP-SS-SG, 1997).

No significant correlations between the PM_{10} levels and the meteorological parameters were found for both sampling sites (except MaxSR and MaxUV at the CEN). Nevertheless, the temperature (average and minimum), MWS, and MaxSR for the *study area* showed r values with $p < 0.05$ (Table A3). Other studies suggested that a relationship between PM_{10} and temperature could exist because high temperature and solar radiation conditions combined with low relative humidity produce dry particles. However, no significant contributions to the particle mass in ambient air have been found from these conditions (Massey et al., 2012). It is not surprising that a significant correlation was observed for fine particles and MWS because of the well-known relationship among thermal inversion episodes, slow winds (in both sites < 3.1 m/s), and poor vertical dispersions of pollutants because of thermal stability within air layers (Guzmán-Torres et al., 2009). Additionally, the MaxSR and MaxUV radiation showed negative r values with the fine particles at the CEN (in TLA, the estimated r values were low negative and showed $p > 0.05$).

However, in the *study area*, only the MaxSR showed a negative coefficient with $p < 0.05$. The carbon content could likely explain this situation in fine particles. Carbon is a component with the capacity to absorb a significant amount of solar radiation. The heat storage capacity of the particles and the surrounding air layers (Gaffney & Marley, 2009; Herrmann & Hänel, 1997; Marley et al., 2001) could affect the behavior of low thermal stable compounds (e.g., NH_4NO_3), and therefore promote particle mass loss (Aldabe et al., 2011; Laongsri & Harrison, 2013). These results suggest the need to generate more data to establish robust relationships between PM_{10} and local meteorology, determine the hourly variation of ionic components associated with fine particles, and determine organic and elemental carbon.

Table 1.4 Descriptive statistics of the meteorological parameters at the Centro (CEN) and Tlaquepaque (TLA) sites during the warm-dry period

CEN						
	n	Mean	S.D.	Median	Maximum	Minimum
AT (°C)	15	24.30	1.46	24.92	25.81	21.03
MT (°C)	15	24.41	1.46	25.01	25.92	21.16
mT (°C)	15	24.18	1.46	24.82	25.70	20.90
RH (%)	15	46.33	9.35	47.45	69.55	34.40
WS (m/s)**	15	0.9	--	0.90	2.70	0.00
WD**	15	W (10)	--	--	--	--
MWS (m/s)**	15	2.2	--	3.10	6.30	0.90
WDMWS **	15	WNW (4)-N (4)	--	--	--	--
AP (mmHg)	15	842.08	1.20	842.35	844.06	839.33
SR (W/h)	15	255.47	27.36	263.08	288.04	204.19
MaxSR (W/h)	15	987.67	60.98	966.00	1111.00	897.00
UV	15	2.38	0.29	2.44	2.76	1.83
MaxUV	15	10.89	1.20	11.10	8.60	12.90
TLA						
	n	Mean	S.D.	Median	Maximum	Minimum
AT (°C)	14	24.61	1.306	25.01	25.94	20.79
MT (°C)	14	24.73	1.30	25.13	26.06	20.91
mT (°C)	14	24.49	1.31	24.89	25.82	20.66
RH (%)	14	45.33	10.46	45.22	70.76	33.99
WS (m/s)**	14	0.40	--	1.10	2.20	0.40
WD**	14	W (8)	--	--	--	--
MWS (m/s)**	14	3.10	--	3.10	4.90	0.90
WDMS**	14	W (8)	--	--	--	--
AP (mmHg)	14	835.57	1.21	835.76	837.55	832.82
SR (W/h)	14	262.50	26.70	263.83	308.78	217.66
MaxSR (W/h)	14	969.43	49.17	960.50	1049.00	871.00
UV	14	2.05	0.21	2.06	2.45	1.72
MaxUV	14	8.82	0.70	8.90	9.80	7.70

AT: average temperature (24 h); MT: maximum temperature; mT: minimum temperature; RH: relative humidity; WS: wind speed; WD: wind direction; MWS: maximum wind speed; WDMS: wind direction of maximum speed; AP: atmospheric pressure; SR: solar radiation; MaxSR: maximum solar radiation; UV: ultraviolet radiation; MaxUV: maximum ultraviolet radiation; S.D.: standard deviation. **Correspond to the mode in 24 h period.

Other studies have reported the relationship between particles and meteorological variables, which suggests that fine particles are most likely being controlled by local emissions rather than being influenced by meteorology (Pateraki et al., 2014; Wang et al., 2006). Titos et al. (2014) also suggested that for specific locations, particle concentrations would not only depend on the local and regional sources, but also geography.

The analysis of relationships between ionic species and meteorological parameters, RH was found to have a positive *r-value* ($p < 0.05$) at the CEN for NO_3^- , $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$, K^+ , and $\sum\text{Cations}$. Furthermore, RH was found to have a positive and significant *r* value for HCOO^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ , $\sum\text{Anions}$, $\sum\text{Cations}$, and $\sum\text{PSI}$ at TLA. When the correlation coefficients were estimated for the *study area*, all ionic species showed *r* values ranging from 0.51 to 0.64 with $p < 0.05$, except for Na^+ and Ca^{2+} . In the CEN, MaxSR and MaxUV showed moderate to high negative correlations (all with $p < 0.05$) for all ion species (except Ca^{2+} with both parameters and SO_4^{2-} with MaxUV). In TLA, the MaxUV variable showed a negative correlation (all $p < 0.05$) with all ion species (except formate, sodium, and calcium).

The number of correlation coefficients showing significant values for variables—such as MaxSR, UV radiation, and MaxUV—increased in number at the *study area* (all with negative r values). The WS and MWS show moderate and positive correlation coefficients in TLA for nitrate, oxalate, \sum Anions, and \sum PSI, all with $p < 0.05$ (the CEN showed r values with $p > 0.05$ in all cases). However, in the *study area*, only MWS showed r values ranging from 0.39 to 0.46 for NO_3^- , $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$, \sum Anions, and \sum PSI (all positive and $p < 0.05$).

For the relationships of NO_3^- and SO_4^{2-} with RH, Zhang et al. (2015) suggested that high levels of relative humidity contributed to a rapid increase of secondary inorganic species at episodes of severe pollution. Other authors (Turšič et al., 2004) have also proposed that oxidation of SO_2 to SO_4^{2-} in the particle's surface area occurs mainly when RH is high. Li, Zhu, Zhao, Zhang, & Chen (2010) stated that under conditions of high RH, the transformation ratio from NO_2 to NO_3^- with the interaction of preexisting particles was higher when compared with the process occurring at low RH values. The maximum RH at both sampling sites ranged from 50% to 70% during some days, and it is possible that their positive relationship with NO_3^- and SO_4^{2-} could be explained by such descriptions. Huang et al. (2016) suggested that the effects of high temperature and RH on fine particles would facilitate the secondary formation of ammonium sulfate and ammonium nitrate, and we also found a significant correlation between RH and NH_4^+ with $r = 0.56$, $p < 0.05$ in the *study area*.

Results for MWS suggest that the variation of secondary ionic species is probably related to the air mass transport between sites, mainly on days with high wind speed from the west and west-northwest. Wang et al. (2007) found a negative correlation between wind speed and HCOO^- , which suggests local sources as the main origin for HCOO^- , whereas a positive correlation between wind speed and CH_3COO^- indicates a process of transport from a distant location. In this study, positive r values were observed for MWS and all anions species (except calcium) in the *study area*.

In the *study area*, a negative correlation between nitrate with SR, MaxSR, UV radiation, and MaxUV (all with $p < 0.05$) was found. The nitrate in the particles, specifically the ammonium nitrate, has low thermal stability and its loss could occur if compounds such as carbon, related with an increase in temperature, are presents (Gaffney & Marley, 2009; Herrmann & Hänel, 1997; Marley et al., 2001). According to the results of this study, it is probable that SR and UV radiation could have the same effect on other ion species. Additionally, nitrate and temperature showed a negative correlation coefficient (not significant in both sites). The meteorological analysis and its relationship with the ionic composition of PM_{10} at the CEN and TLA showed the role of meteorological parameters in the ionic composition variation of PM_{10} in ambient air.

4 Conclusions

Fine particles (PM_{10}) at two study sites in the GMA suggest homogeneity in their ambient air concentrations. Meteorological parameters showed similar values between sites (except atmospheric pressure and UV radiation), and the temperature was identified as the variable with the most influence on the particle's concentration levels. Low or absent correlations with other meteorological parameters suggest that local emission sources better explain the variations in the particle's nature. Sulfate, nitrate, and ammonium were found to be the principal secondary ions (PSI), highlighting the crucial role of atmospheric transformation processes (and the sodium and potassium from direct emissions) on the formation of fine particles at the CEN and TLA.

In relation to oxalate, a significant correlation with K^+ —which is a marker of biomass burning—and PSI (sulfate, nitrate, and ammonium) was observed, suggesting two different origins. The PSI values also had equal levels at both sampling sites (like fine particles) under the sampling conditions tested. The ion balance between \sum Anions and \sum Cations indicated fine particles with alkaline properties in the CEN and TLA, from a higher amount of cations. This agrees with the relationship between the observed and calculated NH_4^+ and with the AT/ST ratio assessed (> 5.99), which suggests ammonium rich particles. Ion species showed positive correlation coefficients, mainly with RH and MWS, and negative correlations with MaxSR and UV radiation. Based on the high *intersite* similarity of the meteorological parameters and the moderate variability that explains the variation in ion species, we recommend that studies should be conducted during other seasons of the year and with more samples collected.

5 Appendix

Table A1. Spearman's correlation matrix of PM₁, anions, and cations at the Centro (CEN) and Tlaquepaque (TLA) sites

CEN													
	PM ₁	HCOO ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	C ₂ O ₄ ²⁻	∑Anions	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	∑Cations	∑PSI	∑TI
PM ₁	1.00												
HCOO ⁻	0.80	1.00											
NO ₃ ⁻	0.65	0.88	1.00										
SO ₄ ²⁻	0.75	0.81	0.56	1.00									
C ₂ O ₄ ²⁻	0.76	0.96	0.88	0.80	1.00								
∑Anions	0.75	0.96	0.86	0.85	0.96	1.00							
Na ⁺	0.81	0.72	0.70	0.76	0.71	0.79	1.00						
NH ₄ ⁺	0.65	0.86	0.81	0.87	0.91	0.93	0.79	1.00					
K ⁺	0.79	0.79	0.75	0.69	0.84	0.76	0.72	0.74	1.00				
Ca ²⁺	-0.27	-0.43	-0.44	-0.36	-0.51	-0.57	-0.38	-0.50	-0.15	1.00			
∑Cations	0.82	0.87	0.80	0.85	0.90	0.88	0.85	0.88	0.92	-0.23	1.00		
∑PSI	0.68	0.90	0.82	0.88	0.92	0.97	0.79	0.98	0.71	-0.55	0.87	1.00	
∑TI	0.82	0.88	0.82	0.84	0.91	0.90	0.88	0.89	0.91	-0.29	0.99	0.88	1.00
TLA													
	PM ₁	HCOO ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	C ₂ O ₄ ²⁻	∑Anions	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	∑Cations	∑PSI	∑TI
PM ₁	1.00												
HCOO ⁻	0.49	1.00											
NO ₃ ⁻	0.49	0.70	1.00										
SO ₄ ²⁻	0.28	0.79	0.68	1.00									
C ₂ O ₄ ²⁻	0.44	0.67	0.68	0.90	1.00								
∑Anions	0.33	0.78	0.76	0.98	0.90	1.00							
Na ⁺	0.38	0.73	0.39	0.79	0.75	0.76	1.00						
NH ₄ ⁺	0.28	0.79	0.77	0.96	0.88	0.99	0.76	1.00					
K ⁺	0.38	0.78	0.40	0.80	0.81	0.73	0.89	0.73	1.00				
Ca ²⁺	-0.16	0.11	0.06	0.12	0.07	0.16	0.09	0.17	0.15	1.00			
∑Cations	0.35	0.81	0.70	0.93	0.86	0.95	0.86	0.96	0.79	0.27	1.00		
∑PSI	0.30	0.78	0.76	0.98	0.89	1.00	0.75	0.99	0.71	0.12	0.95	1.00	
∑TI	0.35	0.82	0.75	0.96	0.88	0.98	0.81	0.99	0.78	0.20	0.97	0.98	1.00
Study Area													
	PM ₁	HCOO ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	C ₂ O ₄ ²⁻	∑Anions	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	∑Cations	∑PSI	∑TI
PM ₁	1.00												
HCOO ⁻	0.63	1.00											
NO ₃ ⁻	0.55	0.79	1.00										
SO ₄ ²⁻	0.55	0.83	0.67	1.00									
C ₂ O ₄ ²⁻	0.61	0.83	0.78	0.91	1.00								
∑Anions	0.58	0.87	0.82	0.96	0.95	1.00							
Na ⁺	0.45	0.68	0.46	0.72	0.68	0.70	1.00						
NH ₄ ⁺	0.51	0.83	0.79	0.94	0.92	0.97	0.74	1.00					
K ⁺	0.54	0.80	0.57	0.77	0.82	0.76	0.78	0.75	1.00				
Ca ²⁺	-0.20	-0.07	-0.15	-0.09	-0.15	-0.13	-0.13	-0.14	-0.00	1.00			
∑Cations	0.53	0.83	0.74	0.91	0.88	0.92	0.82	0.93	0.83	0.04	1.00		
∑PSI	0.55	0.85	0.81	0.96	0.94	0.99	0.70	0.99	0.75	-0.15	0.92	1.00	
∑TI	0.54	0.87	0.79	0.93	0.92	0.95	0.79	0.96	0.85	-0.01	0.98	0.95	1.00

∑Anions: sum anions; ∑Cations: sum cations; ∑PSI: sum principal secondary ions; ∑TI: sum total ions. Values with p<0.5 in bold

Table A2. Spearman's correlation matrix of *intrasite* and *intersite* meteorological parameters during the warm-dry period at the GMA

		CEN													TLA									
		AT	M T	mT	H R	W S	M WS	A P	S R	Max SR	U V	Max UV	A T	M T	m T	H R	W S	M WS	A P	S R	Max SR	U V	Max UV	
CEN	AT	1.00																						
	MT	1.00	1.00																					
	mT	1.00	1.00	1.00																				
	HR	-0.46	-0.46	-0.6	1.00																			
	WS	-0.14	-0.14	-0.4	0.00	1.00																		
	MWS	0.08	0.08	0.08	-0.09	0.82	1.00																	
	AP	-0.42	-0.42	-0.2	-0.04	0.12	0.08	1.00																
	SR	0.44	0.44	0.4	-0.73	-0.09	-0.1	0.38	1.00															
	MaxSR	-0.35	-0.35	-0.5	-0.08	0.02	0.3	-0.15	-0.04	1.00														
	UV	0.60	0.60	0.60	-0.81	0.09	0.03	0.08	0.87	0.11	1.00													
MaxUV	0.31	0.31	0.31	-0.63	-0.09	-0.28	-0.15	0.59	0.59	0.79	1.00													
TLA	AT	0.93											1.00											
	MT	0.93	0.93										1.00	1.00										
	mT	0.93	0.93	0.93									1.00	1.00	1.00									
	HR	-0.18	-0.18	-0.18	0.81								-0.30	-0.34	-0.30	1.00								
	WS	-0.14	-0.14	-0.14	0.42	0.21							0.04	0.06	0.04	0.16	1.00							
	MWS	-0.19	-0.19	-0.19	0.34	0.40	0.44						-0.02	-0.01	-0.02	0.14	0.91	1.00						
	AP	-0.46	-0.46	-0.46	0.01	0.30	0.20	0.93					-0.47	-0.46	-0.47	0.11	0.05	-0.07	1.00					
	SR	0.54	0.54	0.54	0.76	-0.26	-0.07	0.06	0.85				0.54	0.56	0.54	-0.62	-0.37	-0.48	0.12	1.00				
	MaxSR	-0.14	-0.14	-0.14	0.07	0.22	0.2	0.07	0.83				-0.12	-0.12	-0.12	0.38	0.42	0.38	0.22	0.06	1.00			
	UV	0.48	0.48	0.48	0.80	0.14	0.24	0.04	0.85	0.24	0.89		0.46	0.49	0.46	0.69	0.57	0.63	0.07	0.92	0.33	1.00		
MaxUV	-0.11	-0.11	-0.11	0.42	0.13	0.43	0.04	0.42	0.78	0.54	0.82	-0.14	-0.12	-0.14	0.60	0.65	0.63	0.06	0.32	0.81	0.58	1.00		

AT: average temperature (24 h); MT: maximum temperature; mT: minimum temperature; RH: relative humidity; WS: wind speed; MWS: maximum wind speed; AP: atmospheric pressure; SR: solar radiation; MaxSR: maximum solar radiation; UV: ultraviolet radiation; MaxUV: maximum ultraviolet radiation. Values with $p < 0.5$ in bold.

Table A3. Spearman's correlation matrix of the PM₁, anions, cations, and meteorological parameters by site and study area

		PM ₁	HCOO ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	C ₂ O ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	∑Ani	∑Cat	∑PSI
CEN	AT	0.51	0.19	-0.11	0.56	0.14	0.36	0.25	0.15	-0.03	0.21	0.27	0.27
	MT	0.51	0.19	-0.11	0.56	0.14	0.36	0.25	0.15	-0.03	0.21	0.27	0.27
	mT	0.51	0.19	-0.11	0.56	0.14	0.36	0.25	0.15	-0.03	0.21	0.27	0.27
	RH	0.23	0.53	0.59	0.34	0.57	0.25	0.47	0.59	-0.03	0.50	0.59	0.48
	WS	-0.10	0.01	0.02	0.09	0.07	-0.04	0.10	0.03	-0.15	0.06	0.07	0.10
	MWS	0.31	0.32	0.18	0.28	0.32	0.10	0.22	0.17	-0.23	0.29	0.24	0.27
	AP	0.05	-0.05	0.18	-0.29	-0.07	0.04	-0.17	0.17	-0.07	-0.10	-0.12	-0.21
	SR	-0.13	-0.38	-0.44	-0.16	-0.38	-0.17	-0.31	-0.22	-0.07	-0.33	-0.41	-0.33
	MaxSR	-0.91	-0.78	-0.63	-0.69	-0.81	-0.68	-0.63	-0.81	0.41	-0.73	-0.76	-0.64
	UV	-0.19	-0.58	-0.68	-0.20	-0.57	-0.25	-0.45	-0.41	0.08	-0.52	-0.49	-0.47
MaxUV	-0.63	-0.89	-0.94	-0.55	-0.88	-0.63	-0.74	-0.76	0.35	-0.84	-0.80	-0.76	
		PM ₁	HCOO ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	C ₂ O ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	∑Ani	∑Cat	∑PSI
TLA	AT	0.27	0.31	-0.15	0.40	0.31	0.47	0.25	0.40	0.01	0.32	0.36	0.31
	MT	0.23	0.25	-0.20	0.37	0.30	0.47	0.21	0.38	0.03	0.29	0.34	0.28
	mT	0.27	0.31	-0.15	0.40	0.31	0.47	0.25	0.40	0.01	0.32	0.36	0.31
	RH	0.12	0.65	0.68	0.66	0.48	0.34	0.66	0.46	0.28	0.65	0.60	0.63
	WS	0.52	0.30	0.67	0.45	0.71	0.36	0.55	0.33	0.16	0.57	0.50	0.57
	MWS	0.51	0.26	0.69	0.43	0.70	0.34	0.52	0.36	0.14	0.55	0.47	0.53
	AP	0.01	-0.30	0.05	-0.15	-0.04	-0.29	-0.08	-0.23	-0.29	-0.13	-0.21	-0.10
	SR	-0.16	-0.25	-0.64	-0.15	-0.18	0.10	-0.23	-0.05	-0.44	-0.24	-0.16	-0.19
	MaxSR	-0.15	-0.25	-0.39	-0.65	-0.72	-0.33	-0.59	-0.48	0.05	-0.61	-0.54	-0.62
	UV	-0.26	-0.45	-0.80	-0.36	-0.45	-0.10	-0.45	-0.28	-0.34	-0.44	-0.37	-0.41
MaxUV	-0.24	-0.52	-0.69	-0.86	-0.90	-0.49	-0.85	-0.62	-0.16	-0.86	-0.74	-0.87	
		PM ₁	HCOO ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	C ₂ O ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	∑Ani	∑Cat	∑PSI
Study Area	AT	0.39	0.22	-0.13	0.46	0.23	0.42	0.27	0.24	-0.01	0.28	0.33	0.29
	MT	0.38	0.20	-0.14	0.45	0.23	0.41	0.26	0.24	0.00	0.27	0.33	0.28
	mT	0.39	0.22	-0.13	0.46	0.23	0.42	0.27	0.24	-0.01	0.28	0.33	0.29
	RH	0.17	0.62	0.64	0.51	0.56	0.26	0.56	0.52	0.19	0.58	0.56	0.57
	WS	0.20	0.20	0.33	0.30	0.37	0.21	0.32	0.18	0.00	0.33	0.28	0.33
	MWS	0.39	0.29	0.40	0.39	0.46	0.25	0.36	0.25	-0.06	0.42	0.35	0.39
	AP	0.27	0.06	0.13	-0.02	0.07	-0.23	-0.04	0.02	-0.02	0.04	-0.13	0.00
	SR	-0.13	-0.34	-0.56	-0.19	-0.31	0.03	-0.28	-0.14	-0.32	-0.31	-0.28	-0.29
	MaxSR	-0.56	-0.50	-0.50	-0.68	-0.74	-0.49	-0.64	-0.65	0.21	-0.68	-0.66	-0.66
	UV	0.00	-0.35	-0.60	-0.22	-0.39	-0.26	-0.40	-0.29	-0.01	-0.37	-0.39	-0.38
MaxUV	0.05	-0.36	-0.48	-0.42	-0.51	-0.48	-0.52	-0.42	0.15	-0.50	-0.52	-0.50	

AT: average temperature (24 h); MT: maximum temperature; mT: minimum temperature; RH: relative humidity; WS: wind speed; WD: wind direction; MWS: maximum wind speed; AP: atmospheric pressure; SR: solar radiation; MaxSR: maximum solar radiation; UV: ultraviolet radiation; MaxUV: maximum ultraviolet radiation; ∑PSI: sum major secondary ions; ∑TI: sum total ions. Values with p<0.5 in bold.

6 References

- Agudelo-Castañeda, D. M., & Teixeira, E. C. (2014). Seasonal changes, identification and source apportionment of PAH in PM_{1.0}. *Atmospheric Environment*, 96(OCTOBER), 186–200. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.07.030>
- Aldabe, J., Elustondo, D., Santamaría, C., Lasheras, E., Pandolfi, M., Alastuey, A., Querol, X., & Santamaría, J. M. (2011). *Chemical characterisation and source apportionment of PM_{2.5} and PM₁₀ at rural, urban and traffic sites in Navarra (North of Spain)*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.07.003>
- Cheng, Y., Zou, S. C., Lee, S. C., Chow, J. C., Ho, K. F., Watson, J. G., Han, Y. M., Zhang, R. J., Zhang, F., Yau, P. S., Huang, Y., Bai, Y., & Wu, W. J. (2011). Characteristics and source apportionment of PM₁ emissions at a roadside station. *Journal of Hazardous Materials*, 195, 82–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.08.005>
- Chung, A., Herner, J. D., & Kleeman, M. J. (2001). Detection of alkaline ultrafine atmospheric particles at Bakersfield, California. *Environmental Science & Technology*, 35(11), 2184–2190.
- Díaz-Torres, J. J., Hernández-Mena, L., Murillo-Tovar, M. A., León-Becerril, E., López-López, A., Suárez-Plascencia, C., Aviña-Rodríguez, E., Barradas-Gimate, A., & Ojeda-Castillo, V. (2017). Assessment of the modulation effect of rainfall on solar radiation availability at the Earth's surface. *Meteorological Applications*, 24(2), 180–190. <https://doi.org/10.1002/met.1616>

- Du, H., Kong, L., Cheng, T., Chen, J., Du, J., Li, L., Xia, X., Leng, C., & Huang, G. (2011). Insights into summertime haze pollution events over Shanghai based on online water-soluble ionic composition of aerosols. *Atmospheric Environment*, 45(29), 5131–5137. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.06.027>
- Engling, G., Zhang, Y. N., Chan, C. Y., Sang, X. F., Lin, M., Ho, K. F., Li, Y. S., Lin, C. Y., & Lee, J. J. (2011). Characterization and sources of aerosol particles over the southeastern Tibetan Plateau during the Southeast Asia biomass-burning season. *Tellus, Series B: Chemical and Physical Meteorology*, 63(1), 117–128. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2010.00512.x>
- Feng, J. L., Guo, Z. G., Zhang, T. R., Yao, X. H., Chan, C. K., & Fang, M. (2012). Source and formation of secondary particulate matter in PM_{2.5} in Asian continental outflow. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 117(3), 1–11. <https://doi.org/10.1029/2011JD016400>
- Finlayson-Pitts, B. J., & Pitts, J. J. N. (2000). *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere. Theory, Experiments, and Applications*. Academic Press.
- Finlayson-Pitts, Barbara J., & Pitts, J. J. N. (2000). *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere. Theory, Experiments, and Applications*. Academic Press.
- Gaffney, J. S., & Marley, N. A. (2009). The impacts of combustion emissions on air quality and climate – From coal to biofuels and beyond. *Atmospheric Environment*, 43, 23–36. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.016>
- Glasius, M., Wessel, S., Christensen, C. S., Jacobsen, J. K., Jorgensen, H. E., Klitgaard, K. C., Petersen, L., Rasmussen, J. K., Hansen, T. S., Lohse, C., Boaretto, E., & Heinemeier, J. (2000). Sources to formic acid studied by carbon isotopic analysis and air mass characterization. *Atmospheric Environment*, 34, 2471–2479.
- Gomišček, B., Hauck, H., Stopper, S., & Preining, O. (2004). Spatial and temporal variations of PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀ and particle number concentration during the AUPHEP - Project. *Atmospheric Environment*, 38, 3917–3934. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.03.056>
- Guo, S., Hu, M., Wang, Z. B., Slanina, J., & Zhao, Y. L. (2010). Size-resolved aerosol water-soluble ionic compositions in the summer of Beijing: implication of regional secondary formation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 947–959.
- Guzmán-Torres, D., Eiguren-Fernández, A., Cicero-Fernández, P., Maubert-Franco, M., Retama-Hernández, A., Ramos Villegas, R., & Miguel, A. H. (2009). Effects of meteorology on diurnal and nocturnal levels of priority polycyclic aromatic hydrocarbons and elemental and organic carbon in PM₁₀ at a source and a receptor area in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 43, 2693–2699. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.03.003>
- Harrison, R. M., Jones, A. M., & Lawrence, R. G. (2004). Major component composition of PM₁₀ and PM_{2.5} from roadside and urban background sites. *Atmospheric Environment*, 38, 4531–4538. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.05.022>
- Harrison, R. M., & Yin, J. (2000). Particulate matter in the atmosphere: which particle properties are important for its effects on health? *The Science of the Total Environment*, 249, 85–101.
- Hernandez-Mena, L., Gallardo Valdez, J., Díaz-Torres, J. de J., & Villegas García, E. (2017). Contaminación del aire por partículas (PM₁₀) en el Polígono de Fragilidad Ambiental, Guadalajara, Jalisco. *Reaxion, Ciencia y Tecnología Universitaria*, 2(4), 12–25.
- Herrmann, P., & Hänel, G. (1997). Wintertime optical properties of atmospheric particles and weather. *Atmospheric Environment*, 31(24), 4053–4062.

- Hsieh, L.-Y., Chen, C.-L., Wan, M.-W., Tsai, C.-H., & Tsai, Y. I. (2008). Speciation and temporal characterization of dicarboxylic acids in PM 2.5 during a PM episode and a period of non-episodic pollution. *Atmospheric Environment*, *42*, 6836–6850. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.05.021>
- Hsieh, L.-Y., Kuo, S.-C., Chen, C.-L., & Tsai, Y. I. (2009). Size distributions of nano/micron dicarboxylic acids and inorganic ions in suburban PM episode and non-episodic aerosol. *Atmospheric Environment*, *43*, 4396–4406. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.04.034>
- Huang, X. F., Xue, L., Tian, X. D., Shao, W. W., Sun, T. Le, Gong, Z. H., Ju, W. W., Jiang, B., Hu, M., & He, L. Y. (2013). Highly time-resolved carbonaceous aerosol characterization in Yangtze River Delta of China: Composition, mixing state and secondary formation. *Atmospheric Environment*, *64*, 200–207. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.09.059>
- Huang, X., Liu, Z., Zhang, J., Wen, T., Ji, D., & Wang, Y. (2016). Seasonal variation and secondary formation of size-segregated aerosol water-soluble inorganic ions during pollution episodes in Beijing. *Atmospheric Research*, *168*, 70–79. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.08.021>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)*. <http://www.inegi.org.mx/>
- Jacobson, M. C., Hansson, H.-C., Noone, K. J., & Charlson, R. J. (2000). Organic atmospheric aerosols: Review and state of the science. *Reviews of Geophysics*, *38*(2), 267–294. <https://doi.org/10.1029/1998RG000045>
- Kawamuras, K., & Kaplan, I. R. (1987). Motor Exhaust Emissions as a Primary Source for Dicarboxylic Acids in Los Angeles Ambient Air. *Environmental Science & Technology*, *21*(20), 105–110.
- Koçak, M., Mihalopoulos, N., & Kubilay, N. (2007). Chemical composition of the fine and coarse fraction of aerosols in the northeastern Mediterranean. *Atmospheric Environment*, *41*, 7351–7368. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.05.011>
- Langner, J., & Rodhe, H. (1991). A Global Three-Dimensional Model of the Tropospheric Sulfur Cycle. *Journal of Atmospheric Chemistry*, *13*(22), 5–263.
- Laongsri, B., & Harrison, R. M. (2013). Atmospheric behaviour of particulate oxalate at UK urban background and rural sites. *Atmospheric Environment*, *71*, 319–326. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.02.015>
- Lee, C.-T., Chuang, M.-T., Lin, N.-H., Wang, J.-L., Sheu, G.-R., Chang, S.-C., Wang, S.-H., Huang, H., Chen, H.-W., Liu, Y.-L., Weng, G.-H., Lai, H.-Y., & Hsu, S.-P. (2011). The enhancement of PM 2.5 mass and water-soluble ions of biosmoke transported from Southeast Asia over the Mountain Lulin site in Taiwan. *Atmospheric Environment*, *45*, 5784–5794. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.07.020>
- Legrand, M., Preunkert, S., Oliveira, T., Pio, C. A., Hammer, S., Gelencsér, A., Kasper-Giebl, A., & Laj, P. (2007). Origin of C2-C5 dicarboxylic acids in the European atmosphere inferred from year-round aerosol study conducted at a west-east transect. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, *112*(23), 1–14. <https://doi.org/10.1029/2006JD008019>
- Li, H. J., Zhu, T., Zhao, D. F., Zhang, Z. F., & Chen, Z. M. (2010). Kinetics and mechanisms of heterogeneous reaction of NO₂ on CaCO₃ surfaces under dry and wet conditions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *10*, 463–474.
- Lim, H.-J., Carlton, A. G., & Turpin, B. J. (2005). Isoprene Forms Secondary Organic Aerosol through Cloud Processing: Model Simulations. *Environmental Science & Technology*, *39*, 4441–4446. <https://doi.org/10.1021/es048039h>

- Marley, N. A., Gaffney, J. S., Baird, J. C., Blazer, C. A., Drayton, P. J., & Frederick, J. E. (2001). An Empirical Method for the Determination of the Complex Refractive Index of Size-Fractionated Atmospheric Aerosols for Radiative Transfer Calculations. *Aerosol Science and Technology*, *34*:6, 535–549. <https://doi.org/10.1080/02786820118599>
- Massey, D., Kulshrestha, A., Masih, J., & Taneja, A. (2012). Seasonal trends of PM₁₀, PM_{5.0}, PM_{2.5} & PM_{1.0} in indoor and outdoor environments of residential homes located in North-Central India. *Building and Environment*, *47*(1), 223–231. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.07.018>
- Minguillón, M. C., Querol, X., Baltensperger, U., & Prévôt, A. S. H. (2012). *Fine and coarse PM composition and sources in rural and urban sites in Switzerland: Local or regional pollution?* <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.04.030>
- Moya, M., Castro, T., Zepeda, M., & Baez, A. (2003). Characterization of size-differentiated inorganic composition of aerosols in Mexico City. *Atmospheric Environment*, *37*, 3581–3591. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(03\)00345-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(03)00345-5)
- Pateraki, S., Asimakopoulos, D. N., Bougiatioti, a., Maggos, T., Vasilakos, C., & Mihalopoulos, N. (2014). Assessment of PM_{2.5} and PM₁ chemical profile in a multiple-impacted Mediterranean urban area: Origin, sources and meteorological dependence. *Science of the Total Environment*, *479–480*, 210–220. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.008>
- Perrone, M. R., Becagli, S., Garcia Orza, J. a., Vecchi, R., Dinoi, a., Udisti, R., & Cabello, M. (2013). The impact of long-range-transport on PM₁ and PM_{2.5} at a Central Mediterranean site. *Atmospheric Environment*, *71*(2013), 176–186. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.02.006>
- Querol, X., Alastuey, A., Lopez-Soler, A., Plana, F., Puigercus, J. A., Mantilla, E., & Palau, J. L. (1999). Daily evolution of sulphate aerosols in a rural area, northeastern Spain-elucidation of an atmospheric reservoir effect. *Environmental Pollution*, *105*, 397–407.
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2006). *Atmospheric chemistry and physics : from air pollution to climate change*. J. Wiley.
- Squizzato, S., Masiol, M., Agostini, C., Visin, F., Formenton, G., Harrison, R. M., & Rampazzo, G. (2016). *Factors, origin and sources affecting PM 1 concentrations and composition at an urban background site*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.06.002>
- Titos, G., Lyamani, H., Pandolfi, M., Alastuey, A., & Alados-Arboledas, L. (2014). Identification of fine (PM₁) and coarse (PM₁₀₋₁) sources of particulate matter in an urban environment. *Atmospheric Environment*, *89*, 593–602. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.03.001>
- Tsai, J.-H., Lin, J.-H., Yao, Y.-C., & Chiang, H.-L. (2012). Size distribution and water soluble ions of ambient particulate matter on episode and non-episode days in southern Taiwan. *Aerosol and Air Quality Research*, *12*(2), 263–274. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2011.10.0167>
- Tsai, Y. I., & Chen, C.-L. (2006). Atmospheric aerosol composition and source apportionments to aerosol in southern Taiwan. *Atmospheric Environment*, *40*, 4751–4763. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.04.029>
- Tsai, Y. I., Hsieh, L.-Y., Weng, T.-H., Ma, Y.-C., & Kuo, S.-C. (2008). *A novel method for determination of low molecular weight dicarboxylic acids in background atmospheric aerosol using ion chromatography*. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2008.07.041>
- Tsai, Y. I., Sopajaree, K., Chotrukha, A., Wu, H.-C., & Kuo, S.-C. (2013). Source indicators of biomass burning associated with inorganic salts and carboxylates in dry season ambient aerosol in Chiang Mai Basin, Thailand. *Atmospheric Environment*, *78*, 93–104. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.09.040>

- Tsai, Y. I., Wu, P.-L., Hsu, Y.-T., & Yang, C.-R. (2010). *Anhydrosugar and sugar alcohol organic markers associated with carboxylic acids in particulate matter from incense burning*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.06.030>
- Turšič, J., Berner, A., Podkrajšek, B., & Grgić, I. (2004). Influence of ammonia on sulfate formation under haze conditions. *Atmospheric Environment*, *38*, 2789–2795. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.02.036>
- Wang, G. H., Zhou, B. H., Cheng, C. L., Cao, J. J., Li, J. J., Meng, J. J., Tao, J., Zhang, R. J., & Fu, P. Q. (2013). Impact of Gobi desert dust on aerosol chemistry of Xi'an, inland China during spring 2009: differences in composition and size distribution between the urban ground surface and the mountain atmosphere. *Atmos. Chem. Phys. Atmospheric Chemistry and Physics*, *13*, 819–835. <https://doi.org/10.5194/acp-13-819-2013>
- Wang, Y., Zhuang, G., Chen, S., An, Z., & Zheng, A. (2007). Characteristics and sources of formic, acetic and oxalic acids in PM 2.5 and PM 10 aerosols in Beijing, China. *Atmospheric Research*, *84*, 169–181. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2006.07.001>
- Wang, Y., Zhuang, G., Sun, Y., & An, Z. (2006). The variation of characteristics and formation mechanisms of aerosols in dust, haze, and clear days in Beijing. *Atmospheric Environment*, *40*, 6579–6591. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.05.066>
- Wenger, D., Gerecke, A. C., Heeb, N. V., Hueglin, C., Seiler, C., Haag, R., Naegeli, H., & Zenobi, R. (2009). Aryl hydrocarbon receptor-mediated activity of atmospheric particulate matter from an urban and a rural site in Switzerland. *Atmospheric Environment*, *43*(22–23), 3556–3562. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.04.012>
- Whitby, K. T. (1978). The physical characteristics of sulfur aerosol. *Atmospheric Environment*, *12*, 135–159.
- Yan, J., Chen, L., Lin, Q., Li, Z., Chen, H., & Zhao, S. (2015). Chemical characteristics of submicron aerosol particles during a long-lasting haze episode in Xiamen, China. *Atmospheric Environment*, *113*, 118–126. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.05.003>
- Yang, F., Gu, Z., Feng, J., Liu, X., & Yao, X. (2014). Biogenic and anthropogenic sources of oxalate in PM 2.5 in a mega city, Shanghai. *Atmospheric Research*, *138*, 356–363. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.12.006>
- Zhang, Y. W., Zhang, X. Y., Zhang, Y. M., Shen, X. J., Sun, J. Y., Ma, Q. L., Yu, X. M., Zhu, J. L., Zhang, L., & Che, H. C. (2015). Significant concentration changes of chemical components of PM 1 in the Yangtze River Delta area of China and the implications for the formation mechanism of heavy haze-fog pollution. *Science of the Total Environment*, *538*, 7–15. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.104>

Capítulo 2 Caracterización de la biomasa lignocelulósica para la producción de biocombustibles

Chapter 2 Characterization of lignocellulosic biomass for biofuel production

BARAY-GUERRERO, María del Rosario*† y MANJARREZ-DOMINGUEZ, Carlos Baudel

Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales, Delicias, Chihuahua, Universidad Autónoma de Chihuahua.

Facultad de Ciencias Agro tecnológicas, Chihuahua, Chihuahua, Universidad Autónoma de Chihuahua

ID 1^{er} Autor: *María del Rosario, Baray-Guerrero* / **ORC ID:** 0000-0002-0289-9000, **CVU CONACYT ID:** 201384

ID 1^{er} Coautor: *Carlos Baudel, Manjarrez-Dominguez* / **ORC ID** 0000-0002-9802-7185, **CVU CONACYT ID:** 101794

DOI: 10.35429/H.2020.8.24.34

R. Baray & C. Manjarrez

rbaray@uach.mx

A. Marroquín, J. Olivares, L. Cruz y A. Bautista. (Coord) Ciencias ambientales, uso de recursos. Handbooks-©ECORFAN-Mexico, Querétaro, 2020.

Resumen

Transformar la biomasa lignocelulósica en compuestos valiosos de energía, es un campo de investigación que se considera de gran importancia en la actualidad debido a los problemas de la crisis energética y la contaminación ambiental, los biocombustibles producidos a partir de diversos materiales lignocelulósicos tales como madera, residuos agrícolas o forestales, residuos agroindustriales, etc. tienen el potencial de ser un sustituto valioso a los combustibles líquidos o gaseosos tanto para el sector del transporte como para la generación de energía. Los residuos agroindustriales representan una fuente de energía renovable, obteniéndose en grandes cantidades como resultado del procesamiento industrial de frutas y verduras, convirtiéndose en una materia prima barata para la conversión a biocombustibles, estos además de reducir las concentraciones de gases contaminantes y de efecto invernadero emitidos a la atmósfera así como reducir los grandes problemas de disposición de los residuos. Los residuos agroindustriales son de carácter orgánico (biomasa lignocelulósica) cuyo objeto de estudio, fue el residuo proveniente del procesamiento de la manzana en la extracción de jugo procedente de Cuauhtémoc, Chihuahua, específicamente la presente investigación tiene como objetivo determinar las técnicas estandarizadas adecuadas para caracterizar la biomasa lignocelulósica de los residuos del procesamiento de la manzana. Los resultados obtenidos de este estudio demuestran que el bajo contenido de cenizas y el alto contenido de materia volátil hacen de la biomasa lignocelulósica (residuo proveniente del procesamiento de la manzana en la extracción de jugo) un candidato con un alto potencial para la producción de biocombustible.

Biomasa lignocelulósica, caracterización, biocombustibles

Abstract

Transforming lignocellulosic biomass into valuable energy compounds is a field of research that is considered of great importance today due to the problems of the energy crisis and environmental pollution, biofuels produced from various lignocellulosic materials such as wood, agricultural or forest residues, agro-industrial residues, etc. They have the potential to be a valuable substitute for liquid or gaseous fuels for both the transportation sector and power generation. Agro-industrial waste represents a renewable energy source, obtained in large quantities as a result of the industrial processing of fruits and vegetables, becoming a cheap raw material for conversion to biofuels, these in addition to reducing the concentrations of pollutant gases and greenhouse gases emitted to the atmosphere as well as reducing major waste disposal problems. The agro-industrial residues are organic (lignocellulosic biomass) whose object of study was the residue from the processing of the apple in the extraction of juice from Cuauhtémoc, Chihuahua. Specifically, this research aims to determine the appropriate standardized techniques to characterize lignocellulosic biomass of apple processing residues. The results obtained from this study demonstrate that the low ash content and the high content of volatile matter make lignocellulosic biomass (residue from apple processing in juice extraction) a candidate with a high potential for biofuel production.

Lignocellulosic biomass, characterization, biofuels

2. Introducción

La biomasa lignocelulósica como fuente renovable no sólo permite sustituir parcialmente los combustibles fósiles, sino también para reducir las concentraciones de gases contaminantes y de efecto invernadero emitidos a la atmósfera. Los residuos agroindustriales representan una fuente de energía renovable y se obtienen en grandes cantidades como resultado del procesamiento industrial de frutas y verduras y son una materia prima barata para la conversión a biocombustibles. Se puede decir que los residuos agroindustriales son materiales en estado sólido o líquido que se generan a partir del consumo directo de productos primarios o de su industrialización, y que ya no son de utilidad para el proceso que los generó, pero que son susceptibles de aprovechamiento o transformación para generar otro producto con valor económico, de interés comercial y/o social.

El problema al que se enfrentan los residuos agroindustriales es que no existe una clara conciencia ambiental para su manejo, además de que falta capacidad tecnológica y recursos económicos para darles un destino final, así como una legislación específica para promover la gestión de este tipo de residuos, que asegure un buen manejo desde su generación hasta su disposición final. Aún en nuestros días, esta problemática prevalece a nivel mundial

Por otra parte el uso de tecnologías de energía renovable, como la eólica, geotérmica, hidroeléctrica, solar, hidrógeno y los obtenidos a partir de biomasa son alternativos a medio y largo plazo para la sustitución de los combustibles fósiles. La transformación de la biomasa residual en compuestos valiosos de energía es un campo de investigación que se considera de gran importancia en la actualidad debido a los problemas de la crisis energética y la contaminación ambiental actuales. También los biocombustibles producidos a partir de diversos materiales lignocelulósicos tales como madera, residuos agrícolas o forestales, tienen el potencial de ser un sustituto valioso (o complementar a los biocarburantes de la gasolina) a los combustibles líquidos o gaseosos para el sector del transporte y otros usos como producción de energía, un ejemplo específico de un desperdicio biomasa lignocelulósica es el residuo generado en el proceso de extracción de jugo de manzana el cual está formada por una mezcla compleja de cáscara, almendra de la semilla, cáliz, tallo y los tejidos blandos, que es representativo del residuo, y esto contiene principalmente celulosa, hemicelulosa, lignina y pectina.

2.1 Problemática

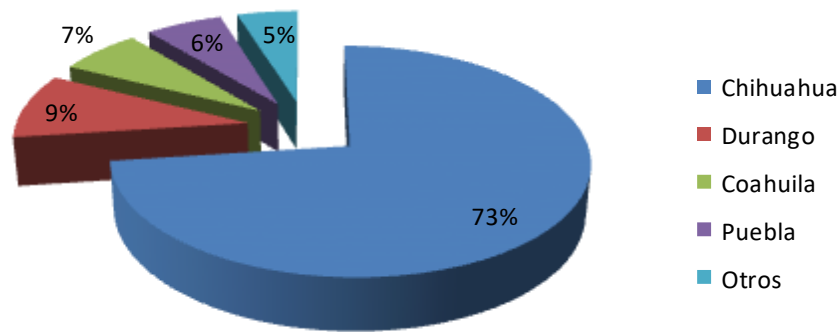
Un dato muy importante que ha proporcionado la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2011) es que la demanda de la energía crecerá en más de un 40 % hasta el año 2030, lo que provocara una gran afectación en el abasto, en el costo y en la sustentabilidad ambiental de la generación de energía por lo que actualmente esta problemática ha provocado que uno de los más grandes desafíos que está enfrentando el hombre sea el de encontrar diferentes alternativas de fuentes de energía lo cual ha generado interés en el uso de combustibles no fósiles, renovables y menos contaminantes. La Producción de biocombustibles a través de la biomasa pudiera ser una fuente de energía renovable, abundante y ecológica que podría ayudar a solucionar este problema ya que la biomasa es una energía renovable derivada de la materia orgánica animal y vegetal, compuesta principalmente de Carbono, Hidrogeno, Oxígeno, Nitrógeno y pequeñas cantidades de Azufre. Utilizar la biomasa como fuente de energía, tanto en los aspectos de su producción cuanto de su consumo, va a permitir que ésta siga siendo un combustible ideal para cubrir con los requerimientos de muchos países por mucho tiempo. Existen fuentes nuevas y renovables de energía pero la biomasa es la que se emplea en su mayoría como una alternativa más viable para que dé soluciones económicamente a nivel mundial y fundamentalmente en la de los países en desarrollo. (Xu J, Thomson, 2009).

La biomasa juntamente con la energía solar, representan las únicas fuentes de energía utilizadas por el hombre durante la mayor parte de la historia de la humanidad. La biomasa lignocelulósica, especialmente proveniente de residuos, está compuesta por una gran cantidad de partículas que pueden ser de diferentes formas y tamaños (geométricamente diferentes) y tener características físico-químicas específicas.

México es conocido por su importante producción de frutas como manzana (716,931 de toneladas / 2016), Aproximadamente el 42% en peso de la producción de fruta se usa para obtener jugo, aceites esenciales, miel de cítricos, mermelada, pectina y alimento para ganado (Miranda et al. 2009).

Los residuos agroindustriales, como las cáscaras, semillas y pulpas, representan aproximadamente el 50% de la fruta procesada cruda. Estos residuos de fruta no tienen importancia comercial y se eliminan en gran medida en vertederos municipales (Mamma et al. 2008; Oberoi et al. 2010).

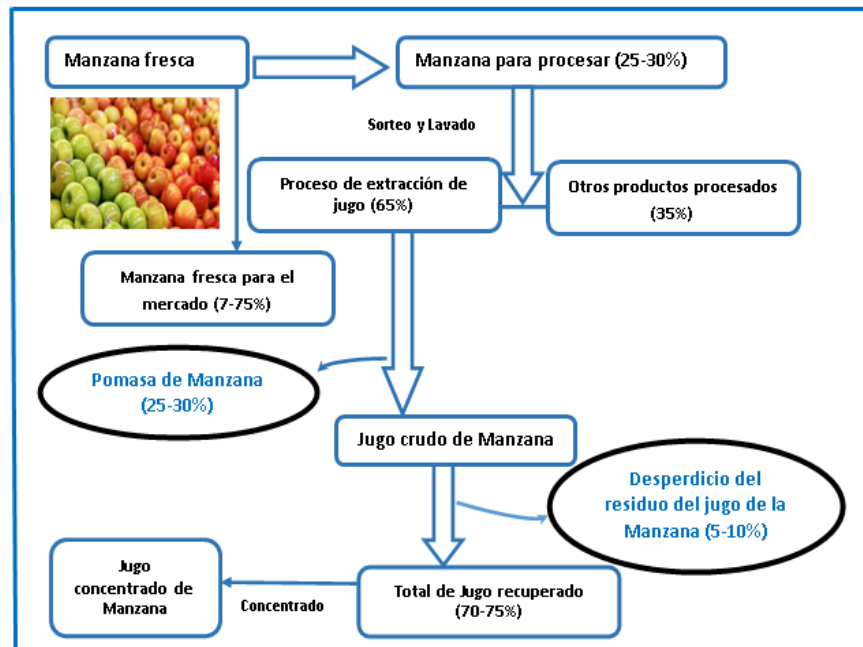
Los principales estados productores de manzana en México en 2018 son: Chihuahua con una participación del 73%, seguido por el estado de Durango con una participación del 9%, Coahuila con una participación del 7% y Puebla aporta el 5% del total nacional otros con el 3% (Gráfico 2.1). En la tabla 1 se puede apreciar en la producción 2014 cantidades por toneladas en cada uno de los estados principales productores de manzana.

Gráfico 2.1 Porcentaje de producción de manzana por estado 2018**Tabla 2.1** Participación de los estados en la Producción de Manzana en 2018

Estado	Ton.
Chihuahua	661,466
Durango	85,596
Coahuila	59,969
Puebla	55,857
Otros	43,976

Fuente: SIAP 2018

Los residuos de la industria del jugo están incluidos entre las principales fuentes de biomasa. El proceso de manufactura de la industria procesadora del jugo de manzana (figura 2) genera una cantidad excesiva de material de desecho alto en fibra y de baja densidad, conocido como biomasa lignocelulósica residual que es un subproducto que incluye cáscaras, semillas, restos fibrosos de pulpa y jugo agotado pobre en azúcares, generándose a razón de 15-19 kg/100 kg de manzana. En el año 2018 se produjeron 916,864.65 toneladas de Manzana a nivel nacional de las cuales Chihuahua Produce 661,466 (SIAP 2018), el 30% se destinaron a industrialización para jugo, de esos se generan aproximadamente un 25 - 30 % que son aproximadamente unas 43 mil toneladas de pomasa de manzana. La composición de la biomasa lignocelulósica de la manzana es similar a otros materiales ligno celulósicos: celulosa (40-50%), hemicelulosa (20-30%), lignina (20-25%), cenizas (1.5-3%) (H. Yang et al, 2005).

Figura 2.1 Diagrama de flujo del procesamiento de la manzana de la industria del jugo

La materia prima lignocelulósica, como las cáscaras de frutas, se compone principalmente de pectina, celulosa, hemicelulosa y pequeñas cantidades de lignina (Oberoi et al. 2010)

Los residuos agroindustriales son una materia prima potencial para la producción de bioetanol debido a su alto contenido de carbohidratos, que es similar a otras materias primas estudiadas (Boluda-Aguilar et al.2010; Wilkins 2009)

2.2 Objetivo

Determinar las técnicas estandarizadas adecuadas para caracterizar la biomasa lignocelulósica de los residuos derivados del procesamiento de la manzana para la extracción del jugo.

2.3 Experimentación

Se empleó una muestra del residuo derivado del procesamiento de manzana para la extracción de jugo procedente de la empresa la Norteña, ubicada en el Km. 98.5 s/n en la Carretera Chihuahua a Cuauhtémoc en Colonia Real del Monte en ciudad Cuauhtémoc, Chihuahua.

2.4 Preparación de la muestra

El residuo que se obtuvo de la empresa procesadora de jugos de manzana la Empresa la Norteña, se pesó en una balanza analítica para obtener su peso húmedo, la muestra se pasó a la mufla a secar durante 10 horas a 70°C y posteriormente se pulverizó y se tamizó para obtener varios tamaños de partícula ($150 > dp > 180 > dp > 250 > dp > 425 \mu\text{m}$) para realizar las diversas metodologías para la experimentación.

2.5 Caracterización fisicoquímica

En la caracterización fisicoquímica de la muestra se realizaron diferentes tipos de análisis como se mencionan a continuación:

2.6 Análisis Elemental

Este análisis se llevó a cabo en un equipo denominado Analizador Elemental Carlo Erba EA 1110 que nos proporcionó el contenido de carbono, nitrógeno, hidrógeno y azufre presente en la muestra. Esta técnica se basa en la oxidación completa de la muestra, que tiene lugar a 1000 °C en oxígeno puro, los productos que resultaron de la combustión fueron separados y analizados de diferente manera y el resultado final fue la cantidad de C, O, H, N y S que contiene la muestra expresada en porcentaje respecto a su peso total.

Las aplicaciones del análisis Elemental son muy diversas. Se puede llevar a cabo el control de calidad de fármacos y otros productos de síntesis (compuestos orgánicos, organometálicos, etc.), se puede analizar suelos (determinación de carbono total y carbono orgánico), material vegetal, combustibles fósiles, plásticos, etc.

2.7 Análisis composicional (lignina, celulosa y hemicelulosa)

En el análisis composicional de la muestra se usaron varias técnicas gravimétricas que se mencionan a continuación:

Los sólidos totales se determinaron por medio de la norma ASTM E 1756-95 que consistió en los siguientes pasos:

- Se puso un crisol a peso constante por 1 hora a 105 °C.
- Se pesó la muestra.
- Se registró el peso del crisol con la muestra.
- Se colocó el crisol con la muestra a 105 °C durante 3 horas.
- Se dejó enfriar en un desecador y se registró la muestra.
- Se metió de nuevo la muestra a la mufla a 105 °C por 1 hora y se pesó de nuevo.
- Se repitió hasta que no vario no más de 0.3 mg.

El porcentaje de lignina se determinó con la norma ASTM D 1106-96 que consistió en los siguientes pasos:

- En un vaso de precipitado se añadió lentamente, mientras se agitaba los 15 ml de H₂SO₄ (72%)
- Se dejó reposar la mezcla durante 2 horas con agitación frecuente, a una temperatura de 18° C.
- Se adiciono 489.3 ml de agua, se puso a hervir a 95 °C durante 4 horas
- Se decantó, se filtró y se pasó la muestra a una caja Petri
- Se metió la caja Petri a la mufla a 105 °C durante 2 horas.

El porcentaje de celulosa se obtuvo de la siguiente manera:

- Se lavó con una solución de 30 ml de agua más 25 ml de NaOH al 17.5%
- Se lavó con 30 ml de agua Destilada
- Se agregó 15 ml de ácido acético al 10% y se dejó reposar 5 min
- Se lavó con 50 ml de agua destilada y se aplicó vacío
- Se Pasó a una caja Petri y se metió una a mufla a 70°C

Para el porcentaje de Hemicelulosa se obtuvo de la siguiente manera

$$\% \text{ de Hemicelulosa} = \% \text{ Lignina} - \% \text{ de Celulosa-sólidos totales} \quad (1)$$

2.8 Análisis proximal (humedad, materia volátil, porcentaje de ceniza y carbón fijo)

En el análisis proximal se realizaron varias pruebas que se mencionan a continuación:

Para la determinación de humedad se calculó con la norma ASTM E 871-82 donde se siguieron los siguientes pasos:

- Se puso a peso constante una caja Petri a una temperatura de 103°C por 30 min
- Se pesó 50 gr de muestra húmeda
- Se registró el peso de caja ya a peso constante después de mufla
- Se registró el peso de la muestra molida
- Se registró el peso de la caja Petri con la muestra
- Se puso a secar en la mufla a 105 °C por 16 horas
- Se dejó enfriar en un desecador y se registró el peso
- Se metió por 2 horas a 103 °C en la mufla

Para la determinación de la materia volátil se procedió por medio de la norma ASTM E 872-82 que consistió en los siguientes pasos:

- Se pesó un crisol
- Se agregó 1 gramo de la muestra
- Se metió a la mufla a 950 °C
- Se dejó enfriar en un desecador
- W_c = peso del crisol y la tapa, g,
- W_i = peso inicial, g, y
- W_f = peso final, g.
- Se calculó el porcentaje de materia volátil en las muestras de análisis de la siguiente manera:
- Materias volátiles en la muestra de análisis, % = $A - B$
- Dónde:
- A = % de pérdida de peso, y
- B = la humedad, %, según se determina usando la norma ASTM E 871-82.

Para la determinación de cenizas se utilizó la norma ASTM E 1755-95 y;

- Se puso un crisol a peso constante en mufla a 575 °C por 2 horas y se registró el peso
- Se pesó la muestra seca de con tamaño partícula 150 μm (0.8223gr)
- Se pesó el crisol con la muestra
- Se colocó en la mufla por 48 horas a temperatura 575 °C
- Se pesó el crisol con la muestra después de la Mufla y se calculó el porcentaje de cenizas

Para la composición de la ceniza se determinó en el laboratorio de Análisis químicos con en el equipo Thermo Jarrel Ash, IRIS/AP DUO en donde se identificó los elementos basados en su longitud de onda emitida y por medio de su intensidad se determinó su proporción presente. El rango de longitudes de onda que el ICP que se puede detectar es de 190 – 800 nm por lo que se pudo identificar los elementos alcalinos y alcalinotérreos, metales de transición y los elementos del grupo III A con excepción del boro

La determinación de la cantidad de producto extraíble de etanol se realizó con la norma ASTM E 1690-95 que consistió en los siguientes pasos:

- Se secó el Soxhlet a 105°C
- Se dejó enfriar en desecador
- Se Pesó el Soxhlet (211.7gr)
- Se Pesó la muestra (3.515 gr)
- Se Pesó la muestra y el Soxhlet
- Se puso en un matraz poner bolitas de vidrio + 160 ml de etanol
- Se montó el Soxhlet y se dejó por 24 horas.
- Se filtró en un embudo Buchner

En la densidad de la pomasa de manzana se siguió la norma ASTM E 873-82. Que consistió en los siguientes pasos:

- Se pesó y se registró el peso de la probeta de 10 ml vacía
- Se pesó la muestra con un tamaño de partícula de 150µm
- Se pesó la probeta más la muestra
- Para su cálculo se utilizó la siguiente formula

El poder calorífico se realizó de acuerdo a la norma ASTM D 2015 que consistió en los siguientes pasos:

- Se pesó un gramo de muestra en el crisol de la bomba adiabática previamente lavado y secado para eliminar residuos y humedad , con la ayuda del pistilo se presionó la muestra hasta lograr una briqueta bien compacta y eliminar la presencia de poros entre la muestra que puedan alojar aire.
- Se cortó un fragmento de alambre de 10 centímetros y se conectó a los electrodos de la bomba; permitiendo que el alambre esté en contacto con el combustible para efectuar la combustión, pero cuidando que no roce las paredes de la cápsula, de lo contrario la ignición no sucede
- Se tapó y se ajustó la tapa de la bomba hasta asegurarse que quede bien cerrada, para luego conectarla al tanque de oxígeno a través de la válvula inyectora, la cual deberá estar inicialmente abierta para permitir que el oxígeno introducido, desplace al aire existente en el interior de la bomba y así realizar una combustión completa
- Una vez removido el aire se cerró la válvula y se inyectó el oxígeno, hasta alcanzar 20 atm.
- Concluido el periodo de inyección, se introdujo la bomba en la camisa adiabática previamente llena con 2000 gramos de agua, los dos electrodos son fueron conectados a una fuente que nos ayudó a hacer la chispa para empezar la combustión

- Se tapó la camisa adiabática y se encendió el termopar registrando la temperatura inicial del agua, para continuar registrando la temperatura cada minuto, hasta que sea estable o el incremento sea constante.
- Se encendió el motor del agitador durante 4 minutos con el fin de alcanzar el equilibrio, y continuar registrando la temperatura cada minuto, al inicio del minuto seis se encendió la chispa presionando el botón de ignición de la fuente, el cual se mantuvo presionando durante 4 segundos sin importar que la luz roja se apagara.
- Se apuntó la temperatura minuto a minuto hasta que esta se estabilizo (cuando 5 o más lecturas sean iguales o el incremento sea constante).
- Se apagó el equipo y se desmonto
- Se debe de abrir la bomba calorimétrica, despresurizándola previamente mediante desde la válvula de inyección.
- Se lavó y seco el equipo una vez concluida la prueba

2.9 Resultados

Como resultado de la caracterización de la biomasa lignocelulósica (residuo proveniente del procesamiento de la manzana en la extracción de jugo) en donde en todas las pruebas de la experimentación se procedieron a colocar entre 20-30 mg. de muestra con tamaño de partícula de 150 μm en el crisol de la termo balanza, se seleccionó la velocidad de calentamiento de 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, se eligió bajo una atmósfera inerte (N_2 a 100 cm^3/min), la muestra se elevó la temperatura hasta 600 $^{\circ}\text{C}$ resultando lo siguiente como se muestra en la siguiente tabla # 2.2 :

Tabla 2.2 Resultados del análisis elemental, análisis composicional, análisis proximal y de Cenizas

Tabla 2.2 Resultados de la caracterización de la pomasa de manzana

Análisis Elemental		
Parámetros	Unidad	Magnitud
C	%	47.980
H	%	6.653
N	%	0.779
O	%	37.44
S	%	N.D
Análisis Composicional		
Celulosa	%	47.49
Hemicelulosa	%	27.77
Lignina	%	22.38
(Otros)	%	2.34
Análisis Proximal		
Humedad	%	8.87
Carbón Fijo	%	6.41
Materia Volátil	%	81.32
Ceniza	%	3.4
Humedad	%	8.87
Composición de Ceniza		
Al	%	0.51
B	%	11.43
Ba	%	37.75
Ca	%	2.01
Cr	%	0.80
Cu	%	8.50

Fe	%	0.35
K	%	7.73
Mg	%	1.54
Mn	%	10.24
Na	%	0.23
Ti	%	17.51
V	%	0.56
Zn	%	0.84
Extraíbles		
En etanol	%	2.89
Propiedades físicas		
Densidad	Kg/m ³	1103
Poder Calorífico	kJ/kg	22420

2.10 Conclusiones

Este estudio evaluó diferentes técnicas de caracterización del residuo proveniente del procesamiento de la manzana en la extracción de jugo, como una materia prima potencial siendo esta una alternativa para la producción de biocombustibles debido a su bajo costo y fácil disponibilidad en el estado de chihuahua principalmente en la región de Cuauhtémoc.

Como puede observarse, el residuo proveniente del procesamiento de la manzana en la extracción de jugo presenta una pequeña cantidad de N para el caso del S ni siquiera se pudo detectar lo cual resulta ventajoso ya que se minimiza los problemas de corrosión asociados a la formación de ácidos y previene la lluvia ácida (Sharma RK, 2008) mostrando una mayor cantidad de Carbono un 47.980% seguido del oxígeno con un 37.44%. Por otra parte, su bajo contenido de cenizas y la alta proporción de volátiles, característica de los materiales lignocelulósicos, lo hace atractivo para los procesos de degradación térmica (L. Burhenne et al 2011).

La composición lignocelulósica es típica de materiales biomásicos, aunque cabe destacar su alto contenido en celulosa. En las cenizas los metales mayoritarios son el Bario y el Titanio. Para encontrar el intervalo de temperatura en el cual se presenta la pérdida en peso representativa de la desvolatilización, se analizó la muestra bajo una atmósfera inerte (N₂ a 150 cm³/min) y una velocidad de calentamiento de 10 °C/min.

2.11 Referencias

Boluda-Aguilar, M., García-Vidal, L., González-Castañeda, F. P., and López-Gómez, A. (2010). "Mandarin peel wastes pretreatment with steam explosion for bioethanol production," *Bioresour. Technol.* 101(10), 3506–3513.

IEA Agencia internacional de la Energía. Los residuos de industrias agrícolas. 2011.

Haiping Yang a,* , Rong Yan b, Hanping Chen a, Dong Ho Lee b, Chuguang Zheng a Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis 2006

Oberoi, H. S., Vadlani, P. V., Madl, R. L., Saida, L., and Abeykon, J. P. (2010). "Ethanol production from orange peels: Two-stage hydrolysis and fermentation studies using optimized parameters through experimental design," *J. Agric. Food Chem.* 58(6), 3422-3429.

Mamma, D., Kourtoglou, E., and Christakopoulos, P. (2008). "Fungal multienzyme production on industrial by-products of the citrus-processing industry," *Bioresour. Technol.* 99(7), 2373-2383.

Miranda, R., Bustos-Martínez, D., Sosa-Blanco, C., Gutiérrez-Villareal, M. H., and Rodríguez-Canú, M. E. (2009). "Pyrolysis of sweet orange (*Citrus sinensis*) dry peel," *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 86(2), 245-251.

Sharma RK, Wooten JB, Baliga VL, Lin X, Chan GT, Hajaligol MR. Caracterización de los caracteres de la pirólisis de la lignina. *Combustible* de 2008; 83:1469-82

Lu, D., Cao, Q., Li, X., Cao, X., Luo, F. y Shao, W. (2009). Kinetics and equilibrium of Cu(II) adsorption onto chemically modified orange peel cellulose biosorbents. *Hydrometallurgy*, 95(1–2), 145-152.

Xu J., Thomsen MH., Thomsen AB. Enzymatic hydrolysis and ferment ability of corn Stover pretreated by lactic acid and/or acetic acid. *Journal of Biotechnology*. 2009; 139:300-5.

Wilkins, M, R. (2009). "Effect of orange peel oil on ethanol production by *Zymomonas mobilis*," *Biomass and Bioenergy* 33(3), 538-541.

Capítulo 3 Dinámica de fluidos computacional y aplicación de flujo multifásico para el análisis de gradientes termohalinos en energías marinas renovables

Chapter 3 Fluid Dynamics and multiphase flow for the analysis of thermohaline gradients in marine renewable energies

RODRÍGUEZ-OCAMPO, Paola E†., CALLEJAS-JIMÉNEZ, Mariana E*. y ALCÉRRECA-HUERTA, Juan Carlos

Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, México.

El Colegio de la Frontera Sur, Departamento de Observación y Estudio de la Tierra, la Atmósfera y el Océano, Av. del Centenario km 5.5, Chetumal, México.

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología-El Colegio de la Frontera Sur (CONACYT-ECOSUR), Departamento Observación y Estudio de la Tierra, la Atmósfera y el Océano, Av. del Centenario km 5.5, Chetumal, México.

ID 1^{er} Autor: Paola E. Rodríguez-Ocampo / **ORC ID:** 0000-0001-6635-0028; **CVU CONACYT:** 630950

ID 1^{er} Coautor: Mariana E. Callejas-Jiménez / **ORC ID:** 0000-0002-9822-4656, **CVU CONACYT:** 164487

ID 2^{do} Coautor: Juan Carlos Alcérreca-Huerta / **ORC ID:** 0000-0001-6325-3118, **CVU CONACYT:** 332841

DOI: 10.35429/H.2020.8.35.47

P. Rodríguez, M. Callejas y J. Alcérreca

mecallejas@ecosur.mx

A. Marroquín, J. Olivares, L. Cruz y A. Bautista. (Coord) Ciencias ambientales, uso de recursos. Handbooks-©ECORFAN-México, Querétaro, 2020.

Resumen

La investigación y desarrollo tecnológico dirigido hacia la optimización y aprovechamiento de fuentes de energía renovables ha tomado amplia relevancia dentro del contexto ambiental, económico y geopolítico. Las energías oceánicas, como el caso de la energía por gradiente termohalino se basan en la generación de energía en función de la diferencia de temperatura y salinidad entre las capas de agua del océano para operar sistemas hidrocráticos o membranas. La dinámica de fluidos computacional (CFD) proporciona un enfoque para el análisis de detalle de la interacción de masas de agua con diferentes propiedades termohalinas. Además, soporta el análisis de la dilución de fluidos y su trayectoria dentro de las complejas condiciones de los ecosistemas costeros. No obstante, no existe un modelo CFD capaz de simular la dinámica de fluidos multifásicos para aplicaciones costeras considerando: i) generación, propagación y absorción de olas y corrientes; ii) modelado trifásico con una mezcla de 2 fases y superficie libre, iii) equilibrio térmico y iv) modelado de turbulencia. Por lo tanto, este capítulo muestra el desarrollo y la implementación de las ecuaciones de gobierno para simular estos procesos dentro del marco de trabajo CFD de OpenFoam® dando pie a la generación del nuevo modelo numérico *interMixingTemperatureWaveFoam*. Los resultados muestran la aplicabilidad del modelo al considerar el caso de una laguna arrecifal con un aporte de agua subterránea (SGD).

CFD, modelación numérica, flujo multifásico, gradiente termohalino, energía renovable

Abstract

Research and technological development directed towards the optimization and use of renewable energy sources has taken on wide relevance within the environmental, economic and geopolitical context. Oceanic energies, as in the case of thermohaline gradient energy, are based on the generation of energy based on the difference in temperature and salinity between the layers of ocean water to operate hydrocratic systems or membranes. Computational fluid dynamics (CFD) provides an approach for the detailed analysis of the interaction of water masses with different thermohaline properties. In addition, it supports the analysis of fluid dilution and its trajectory within the complex conditions of coastal ecosystems. However, there is no CFD model capable of simulating multiphase fluid dynamics for coastal applications considering: i) generation, propagation and absorption of waves and currents; ii) three-phase modeling with a mixture of 2 phases and free surface, iii) thermal equilibrium and iv) turbulence modeling. Therefore, this chapter shows the development and implementation of governance equations to simulate these processes within the OpenFoam® CFD framework, leading to the generation of the new *interMixingTemperatureWaveFoam* numerical model. The results show the applicability of the model when considering the case of a reef lagoon with an underground water supply (SGD).

CFD, numerical modeling, multiphase flow, thermohaline gradient, renewable energy

3. Introducción

Factores ambientales, económicos y geopolíticos han motivado la investigación y desarrollo tecnológico para a aceleración y optimización en la obtención y recolección de energía de fuentes renovables (Bhattacharya et al., 2016; Olabi, 2017; Burke y Stephens, 2018). Los avances tecnológicos en la captación, transformación y almacenamiento de la energía oceánica han tomado una mayor relevancia en las últimas décadas (Magagna y Uihlein, 2015). No obstante, diversos estudios han señalado la necesidad de mejores herramientas numéricas para estudiar el flujo multifásico en aplicaciones marinas particularmente de descargas de agua dulce y mezcla con aguas marinas (e.g. McCoy y Corbett, 2009; Ma et al., 2014; Lujendijk et al., 2020), térmicas por parte de plantas de conversión de energía térmica oceánica (e.g. Kim y Kim, 2014; Lee et al., 2016; Wang y Tabeta, 2017), o en procesos hidrodinámicos turbulentos y laminares (e.g. Dávalos-Fassler, 2020; Robles-Hernández, 2020), así como sus métodos de solución (e.g. Escalante, 2020).

El desarrollo de métodos numéricos para la solución de sistemas fundamentales de ecuaciones diferenciales parciales es requerido dado que no existen métodos analíticos para estudiar la naturaleza compleja del flujo multifásico (Kolev, 2011). Por ello, los métodos de dinámica de fluidos computacional (CFD) son una de las herramientas más extendidas para estudiar los flujos multifásicos.

Las herramientas CFD de acceso abierto (e.g. OpenFOAM®) han permitido una mayor popularidad entre los usuarios no sólo por la eliminación de tarifas de licencia, sino también por la posibilidad de extender y modificar los códigos nativos del software y, por tanto, de sus potenciales aplicaciones (Tomislav et al., 2014).

Estos métodos se basan en soluciones numéricas generadas por computadora de las ecuaciones de dinámica de fluidos, pero requieren de un proceso de validación a fin de determinar el grado en que el modelo o simulación y sus datos asociados representan de forma precisa y exacta al mundo real (Eça y Hoekstra, 2008; Eca et al., 2016; ITTC, 2008; Stern et al., 2006; Stern et al., 2001). Entre las diversas aproximaciones para validar modelos multifásicos se han logrado validaciones parciales mediante la reproducción numérica de resultados *in-situ* o de laboratorio (Rodríguez-Ocampo et al., 2020; Hernández-Fontes et al., 2018; Mohseni et al., 2018; Higuera et al., 2013; Jacobsen et al., 2012; Greco et al., 2005, 2007). A pesar de dichos desarrollos, no se dispone de un modelo que simule el equilibrio térmico y la mezcla de dos fases líquidas con una condición de superficie libre dentro de una plataforma CFD de acceso libre.

Por tanto, el presente trabajo presenta el desarrollo e implementación de un modelo basado en la plataforma CFD de OpenFOAM® que considera la inclusión de la ecuación de energía, y de la conservación de cantidades escalares para la difusión de dos fases miscibles. La aplicabilidad del modelo se realiza mediante un caso de referencia para estimar el comportamiento hidrodinámico de una descarga de agua submarina en un cuerpo costero (i.e. una laguna arrecifal). Esto busca proveer un antecedente como una potencial aplicación en el análisis de problemas de energía renovable oceánica por medio del aprovechamiento de gradientes termohalinos y así contribuir a la evaluación de viabilidad de la futura implementación de esta tecnología en México.

3.1 Ecuaciones de gobierno en modelos numéricos CFD

Dentro del modelado CFD, existen tres leyes fundamentales que funcionan como principales ecuaciones de gobierno en la resolución de problemas termodinámicos de fluidos y descritas por i) conservación de la masa (ecuación de continuidad), ii) conservación del momento (2ª. ley de Newton), y iii) conservación de la energía (1ª. ley de la termodinámica). Además, la ley de conservación de cantidades escalares es requerida para el cálculo de soluciones ante condiciones multifásicas.

En la dinámica de fluidos, se suele considerar el flujo al interior de un volumen de control (VC) en lugar de una cantidad de sustancia dada o masa de control (MC). No obstante, la ley de conservación de masas relaciona la tasa de cambio en el tiempo (t) de una propiedad extensiva en una masa de control dada, por lo que para la conservación de la masa (m), la ecuación se puede escribir como en la Ecuación 1. Mientras tanto, la segunda ley de movimiento de Newton conduce a la ecuación de conservación de momento (Ecuación 2), donde t es el tiempo, U la velocidad y f las fuerzas que actúan sobre la masa de control.

$$\frac{dm}{dt} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d(mU)}{dt} = \sum f \quad (2)$$

En las Ecuaciones 1 y 2, la masa y el momento son propiedades extensivas; sin embargo, si ϕ es una propiedad intensiva conservada por unidad de masa, la propiedad extensiva correspondiente Φ puede expresarse conforme a la Ecuación 3, donde Ω_{MC} es el volumen ocupado por la MC y ρ la densidad.

$$\Phi = \int_{\Omega_{MC}} \rho \phi \, d\Omega \quad (3)$$

Al considerar la definición de la Ecuación 3, es posible desarrollar las ecuaciones de gobierno en función de un volumen de control. Así, la tasa de cambio de la propiedad Φ en la masa de control es igual a la tasa de cambio de la propiedad dentro del VC más el flujo neto de la misma a través del del VC (Ferziger y Peric, 2002).

Por lo tanto, para un VC fijo determinado, la ecuación de volumen de control (en función de la propiedad intensiva ϕ) se puede expresar como se muestra en la Ecuación 4, donde Ω_{CV} representa el volumen de control, S_{VC} es la superficie que encierra el VC, n es el vector unitario ortogonal a S_{VC} y se dirige hacia afuera. El primer y segundo término en el lado derecho de la Ecuación 4 son los términos temporal y convectivo, respectivamente.

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega_{MC}} \rho \phi \, d\Omega = \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega_{VC}} \rho \phi \, d\Omega + \int_{S_{VC}} \rho \phi U \cdot n \, dS \quad (4)$$

3.2 Ecuación de conservación de masa

Para la ecuación de continuidad, la propiedad Φ es constante por conservación de la masa, por lo que la Ecuación 4 se reduce a la Ecuación 5 (i.e. si $\Phi = m$, $\phi = 1$). A través del teorema de Gauss, el término convectivo se transforma de una integral de superficie en una integral de volumen. Asimismo, al considerar que el VC es infinitesimalmente pequeño, la forma diferencial libre de coordenadas de la ecuación de continuidad se puede expresar conforme en la Ecuación 6. Finalmente, para flujo incompresible (i.e. $\rho = \text{cte.}$) la ecuación de conservación de masa se puede expresar como en la Ecuación 7.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \, d\Omega + \int_S \rho U \cdot n \, dS = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (\text{forma conservativa}) \quad \text{ó} \quad \frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot (U) = 0 \quad (\text{forma no conservativa}) \quad (6)$$

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (7)$$

3.3 Ecuación de conservación de momento

La ecuación de conservación de momento se obtiene considerando la propiedad intensiva $\phi = U$, expresándose como se señala en la Ecuación 8. Considerando la Ecuación 2, y que la propiedad extensiva resultaría $\Phi = mU$, es posible introducir el efecto de las fuerzas de superficie y cuerpo por unidad de masa (Ecuación 9), donde \mathbf{T} es el tensor de estrés para fluidos newtonianos (Ecuación 10), y b es un término fuente / sumidero (fuerzas corporales por unidad de masa):

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho U \, d\Omega + \int_S \rho U U \cdot n \, dS = \sum f \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho U \, d\Omega + \int_S \rho U U \cdot n \, dS = \int_S \mathbf{T} \cdot n \, dS + \int_{\Omega} \rho b \, d\Omega \quad (9)$$

$$\mathbf{T} = -\left(p + \frac{2}{3}\mu \nabla \cdot U\right) \mathbf{I} + 2\mu \mathbf{S} \quad (10)$$

donde μ es la viscosidad dinámica, \mathbf{I} el tensor unitario, p es la presión estática y \mathbf{S} es la tasa de tensor de deformación ($\mathbf{S} = \frac{1}{2}(\nabla U + (\nabla U)^T)$).

La forma vectorial libre de coordenadas de la Ecuación 9 se obtiene aplicando el teorema de divergencia de Gauss a los términos de flujo convectivo y difusivo (Ecuación 11).

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) = \nabla \cdot \mathbf{T} + \rho b \quad (11)$$

$$\text{si } \nabla \cdot U = 0, \text{ entonces} \quad \mathbf{T} = -p\mathbf{I} + 2\mu \left(\frac{1}{2}(\nabla U + (\nabla U)^T)\right) = -p\mathbf{I} + \mu(\nabla U + (\nabla U)^T) \quad (12)$$

$$\text{donde } \nabla \cdot \mathbf{T} = \nabla \cdot (-p\mathbf{I} + \mu(\nabla U + (\nabla U)^T)) = -\nabla \cdot (p\mathbf{I}) + \nabla \cdot \mu \nabla U = -\nabla p + \mu \nabla^2 U$$

La Ecuación 12 se sustituye en la Ecuación 11 y, considerando la gravedad g como la única fuerza de cuerpo se obtiene la Ecuación 13):

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) = \nabla \cdot (\mu \nabla U) - \nabla p + \rho g \quad (13)$$

donde ν es una viscosidad cinemática constante, p es la presión. Para flujos incompresibles, es conveniente y más eficiente para la solución numérica, definir $p^* = p - \rho g z$ como la presión dinámica. Esta forma permite ignorar el efecto de la aceleración gravitacional cuando se calcula el movimiento del fluido bajo condiciones de densidad constante (Ecuación 14). Si no hay velocidad del fluido, entonces $p^* = 0$ y p corresponde sólo a la presión hidrostática. En flujos de densidad constante, la gravedad no juega un papel determinante en la obtención del campo de flujo (Ten y Edwards, 2006).

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) = \nabla \cdot (\mu \nabla U) - \nabla(p^*) \quad (14)$$

3.4 Conservación de cantidades escalares

El tercer principio de conservación es la conservación de ecuaciones de cantidades escalares. La cual se deriva de la ecuación de volumen de control (Ecuación 4) considerando que la variación de la propiedad extensiva Φ en el tiempo es igual al transporte neto de la cantidad escalar ϕ . Así, la forma integral también se puede expresar como en la Ecuación 15, donde $\sum f_\phi$ es resultado de la suma del transporte de la cantidad escalar ϕ por mecanismos distintos (f) a la convección y cualquier fuente o sumidero del escalar. La forma integrada de la ecuación de conservación de cantidades escalares se puede escribir como en la Ecuación 16 para flujo incompresible (forma conservativa), donde D es la difusividad para la cantidad ϕ , y q_ϕ es un término fuente / sumidero de ϕ . El término difusivo es importante para definir la mezcla entre fases líquidas (Ferziger y Peric, 2002).

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \phi d\Omega + \int_S \rho \phi U \cdot n dS = \sum f_\phi \quad (15)$$

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \phi U) = \nabla \cdot (D \nabla \phi) + q_\phi \quad (16)$$

3.5 Conservación de energía

La ecuación de energía, se puede escribir como en la Ecuación 17, donde h es la entalpía, T es la temperatura absoluta, K es la conductividad térmica $K = \mu c_p / Pr$, \mathbf{S}_0 es la parte viscosa del tensor de tensión \mathbf{T} , $\mathbf{S}_0 = \mathbf{T} + p\mathbf{I}$ es el número de Prandtl, μ es la viscosidad dinámica, y c_p es la capacidad calorífica específica a presión constante. En esta ecuación, no se consideran efectos de transferencia de calor radioactivo y la generación interna de calor debido a una posible reacción química.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho h d\Omega + \int_S \rho h U \cdot n dS = \int_S K \nabla T \cdot n dS + \int_{\Omega} (U \cdot \nabla p + \mathbf{S} \cdot \nabla U) d\Omega + \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho d\Omega \quad (18)$$

Una forma vectorial libre de coordenadas de la ecuación de energía para flujos incompresibles (i.e. $\nabla \cdot U = 0$) está dada por la Ecuación 18, donde h es la entalpía específica que está relacionada con la energía interna específica, $h = e + p/\rho$, y q_ϕ es la función de disipación, que representa el trabajo realizado contra las fuerzas viscosas y que se convierte irreversiblemente en energía interna, $q_\phi = (\tau \cdot \nabla)U$.

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h U) = \nabla \cdot (K \nabla T) - \frac{Dp}{Dt} + q_\phi \quad (19)$$

Al considerar incompresibilidad de los flujos ($\rho = \text{cte.}$) y capacidad calorífica específica constante ($c_p = \text{cte.}$), la relación $dh = c_p dT$ y la ecuación de energía se pueden escribir como en la Ecuación 19, donde se puede despreciar el término de presión.

$$\frac{\partial \rho c_p T}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho c_p T U) = \nabla \cdot (K \nabla T) + q_\phi \quad (19)$$

Los flujos compresibles e incompresibles se suelen manejar por códigos CFD particularmente desarrollados para alguna modalidad, lo que conlleva a que el sistema debe considerarse compresible o incompresible para su análisis.

3.6 Transferencia de calor

Dentro de los flujos acompañados de transferencia de calor, las propiedades del fluido son típicamente una función de la temperatura T . Las propiedades generalmente se calculan por medio de un proceso iterativo partiendo de una temperatura inicial. Asimismo, la conducción del calor se describe mediante la ecuación de Laplace (Ecuación 20), mientras que la conducción inestable se rige por la ecuación del calor al agregarle una derivada del tiempo (Ecuación 21), donde ∇^2 es el operador de Laplace.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (20)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} - K \nabla^2 \phi = 0 \quad (21)$$

3.7 Integración del modelo *interMixingTemperatureWaveFoam*

El código y configuración completa del nuevo modelo implementado y denominado *interMixingTemperatureWaveFoam*, fue desarrollado considerando la plataforma CFD de OpenFOAM®, e incluye la capacidad de resolver tres fluidos incompresibles, dos de los cuales son miscibles (“*interMixing...*”-código nativo ya existente) pero con la adición de la ecuación de energía para análisis del equilibrio térmico (“*...Temperature...*”) y la generación/absorción de forzamientos de oleaje y corrientes (“*...waveFoam*”), éste último considerando la aproximación proporcionada y descrita por Jacobsen (2012). Los modelos de turbulencia, esquemas de generación de mallas y otras utilidades genéricas de OpenFOAM® están disponibles como parte del paquete de herramientas para la configuración y ejecución del caso.

Dentro del modelo, la dinámica de fluidos multifásica consta de tres fases con diferentes densidades y temperaturas. En aplicaciones marinas y de energías oceánicas, dos de las fases se pueden considerar líquidas y miscibles (e.g. agua dulce y agua salada), y la tercera quedar representada por aire permitiendo la existencia de una condición de superficie libre.

Las ecuaciones de gobierno utilizadas en el modelo *interMixingTemperatureWaveFoam*, se derivaron de una simplificación de las ecuaciones de continuidad y momentum expresadas en la Ecuación 7 y la Ecuación 14, también conocidas como Ecuaciones de Navier Stokes (NSE) para flujo incompresible e isotérmico. Las NSE describen con precisión el flujo de un fluido newtoniano (Ferziger y Peric, 2002), pero su resolución normalmente considera simplificaciones para reducir los costos computacionales sin incidir en errores importantes para los fenómenos de estudio. Así, para resolver las NSE, se consideró la solución aproximada mediante un proceso de promediado en el tiempo, que consiste en la descomposición de la variable de flujo en el componente medio (promedio de tiempo) y el componente fluctuante. Si la variable de flujo es la velocidad U , ésta se puede separar en el componente medio \bar{U} y el componente fluctuante U' , es decir $U(\mathbf{x}, t) = \bar{U}(\mathbf{x}) + U'(\mathbf{x}, t)$, donde $\mathbf{x} = (x, y, z)$ es la posición del vector. Un proceso análogo se lleva a cabo con la presión dinámica p^* y la temperatura T : $p^*(\mathbf{x}, t) = \bar{p}(\mathbf{x}) + p'(\mathbf{x}, t)$, $T = \bar{T}(\mathbf{x}) + T'(\mathbf{x}, t)$.

Las NSE promediadas en el tiempo, e implementadas en el modelo *interMixingTemperatureWaveFoam* se conocen como ecuaciones de Navier-Stokes promediadas de Reynolds (RANS). Las ecuaciones RANS quedan entonces expresadas por la ecuación de continuidad (Ecuación 22) y la ecuación de conservación de momentum (Ecuación 23) para flujos incompresibles:

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (22)$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) = \nabla \cdot (\mu \nabla U - \rho \tau) - \nabla(p) + \rho g + \sigma \kappa_\alpha \nabla \alpha \quad (23)$$

donde τ es el tensor de tensión de Reynolds específico. La expresión $(\mu \nabla U - \rho \tau)$ corresponde al esfuerzo cortante total. El tensor de Reynolds específico $\tau = \overline{u_i' u_j'}$ se puede definir a través de la aproximación de Boussinesq (Ecuación 24), donde μ_t es el viscosidad turbulenta y k la energía cinética turbulenta por unidad de masa, definida como $k = 0.5 \overline{u_i' u_j'}$.

El tensor de Reynolds relaciona las tensiones de Reynolds con gradientes de la velocidad promedio \bar{U} , pero requiere modelado adicional para el cierre de las ecuaciones RANS (i.e. los modelos de turbulencia) y estimar los valores de k y μ_t .

$$\tau = \frac{2}{\rho} \mu_t S - \frac{2}{3} \mathbf{k}I \quad (24)$$

Por otra parte, dentro del modelo se consideraron la ecuación de conservación de cantidades escalares (Ecuación 25), así como también la implementación de la ecuación de conservación de energía en función de la temperatura (Ecuación 26), considerando el promediado de Reynolds:

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \phi U) = \nabla \cdot (D \nabla \phi) + q_\phi \quad (25)$$

$$\frac{\partial \rho c_p T}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho c_p T U) = \nabla \cdot (K \nabla T) + q_\phi \quad (26)$$

La Ecuación 25 involucra la difusividad molecular D para modelar la mezcla entre las fases líquidas. Este coeficiente es la constante de proporcionalidad de la ley de Fick y representa la facilidad con la que cada soluto se mueve en el solvente. En el SI, D se expresa como m^2/s y varía con la temperatura; sin embargo, por simplicidad del modelo, se consideró constante el valor de D dentro del intervalo de tiempo de análisis. Por otra parte, debido a que no se contemplan cambios de fase en el modelo desarrollado, este primer enfoque considera el término fuente q_ϕ como cero.

Para la distinción de la condición de superficie libre entre los fluidos no miscibles, se empleó el método VOF fundamentado en la ecuación de fracción de volumen α considerando la aproximación descrita por Hirt y Nichols (1984) con un factor de compresibilidad (Berberović et al., 2009) para su refinamiento. Para un sistema de fluido de superficie libre, $\alpha = 0$ representa la fase gaseosa y $\alpha = 1$ la mezcla de las fases fluidas. De esta manera, los valores intermedios representan la interfaz entre los fluidos no miscibles, describiendo la dinámica de fluidos multifásica requerida. La distribución de α se modela con una ecuación convectiva denominada ecuación de fracción de volumen (Ecuación 27), que es un caso particular de la ecuación de conservación de cantidades escalares:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha U) + \nabla \cdot (U_r \alpha (1 - \alpha)) = 0 \quad (27)$$

donde U_r es una velocidad relativa. El último término en el lado izquierdo de la Ecuación 27 corresponde al término de compresión que limita el tamaño de la interfaz.

Los valores del número de Prandtl Pr y la capacidad calorífica específica c_p se introducen en el modelo como datos constantes para cada una de las tres fases. Con ellos se estima la conductividad térmica K para la mezcla (Ecuación 28), requerida para modelar el campo de temperatura con la ecuación de conservación de energía. El número de Prandtl resulta del cociente entre la velocidad de difusión viscosa y la velocidad de difusión térmica e indica la efectividad de la conducción en comparación con la convección al transferir calor. La conductividad térmica en $\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1} \text{K}^{-1}$, mide la capacidad de conducción de calor de una sustancia y se puede obtener como:

$$K = \rho v \frac{c_p}{Pr} \quad (28)$$

Como el modelo funciona con tres fases fluidas diferentes, K se obtiene a través de una media aritmética ponderada, donde K toma en cuenta la fracción de cada fase α en cada celda, como se muestra en la Ecuación 30.

$$K = \alpha_1 \rho_1 v_1 \frac{c_{p1}}{Pr_1} + \alpha_2 \rho_2 v_2 \frac{c_{p2}}{Pr_2} + \alpha_3 \rho_3 v_3 \frac{c_{p3}}{Pr_3} \quad (29)$$

Además, la capacidad de calor específica para la mezcla $\rho * c_p$, así como el flujo de calor $\rho * \phi * c_p$, se obtienen respectivamente como:

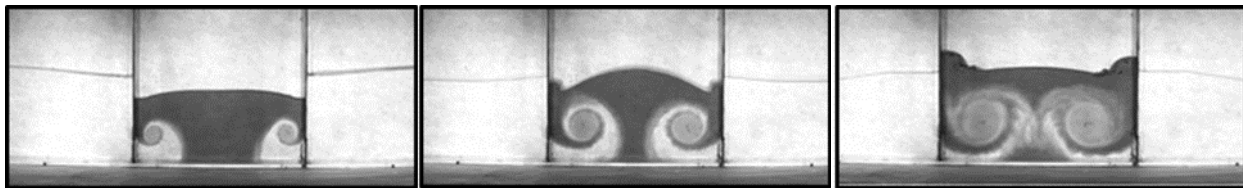
$$\rho * c_p = \alpha_1 \rho_1 c_{p1} + \alpha_2 \rho_2 c_{p2} + \alpha_3 \rho_3 c_{p3} \quad (30)$$

$$\rho * \varphi * c_p = \alpha_1 \rho_1 c_{p1} + \alpha_2 \rho_2 c_{p2} + \alpha_3 \rho_3 c_{p3} \quad (31)$$

Las ecuaciones 29, 30 y 31 son los términos asociados con el laplaciano, la derivada parcial y la divergencia, respectivamente, de la ecuación de conservación de energía (Ecuación 26).

Como se mencionó anteriormente, las ecuaciones RANS requieren de un modelo de cierre para la estimación del comportamiento de las fluctuaciones de las variables de velocidad, presión y conductividad térmica en este caso. Dichos modelos de cierre se conocen como modelos de turbulencia (Ferziger y Peric, 2002) y se caracterizan por reflejar propiedades observables de las variables dadas como una señal irregular en el espacio y el tiempo, flujo rotacional, alta difusividad, carácter impredecible de trayectorias, la coexistencia de remolinos de escalas muy diferentes y disipación. La Figura 1 muestra el desarrollo del flujo turbulento resultado de un experimento de laboratorio en el que las compuertas verticales entre compartimentos se levantan de forma cuasi-instantánea hasta una apertura dada, permitiendo la interacción de los fluidos por la diferencia en su gradiente de densidad, contrastada por un trazador (i.e. compartimentos laterales - agua dulce, compartimento central - agua salada). Al presentar una apertura súbita manual de las compuertas se tiene un flujo altamente turbulento que evidencia la presencia de remolinos a diferente escala.

Figura 3.1 Representación experimental de flujo turbulento con sus característicos remolinos de diferente escala, alta difusividad y flujo rotacional.



Fuente de Consulta: (Rodríguez-Ocampo, P.E. 2016. Tesis de Maestría. II-UNAM)

Existen diferentes enfoques para modelar la turbulencia en las simulaciones de fluidos, que se han desarrollado con diferentes niveles de complejidad, por ejemplo: a) modelos estadísticos con una hipótesis de turbulencia-viscosidad; b) modelos avanzados que involucran ecuaciones de transporte o simulaciones numéricas turbulentas de grades remolinos. Sin embargo, cada enfoque tiene ventajas y limitaciones de rendimiento, pero son complementarios y se eligen según el tipo de problema a resolver y la respuesta que se espera (Schiestel, 2008). Cabe señalar, que la plataforma CFD de OpenFOAM® cuenta con códigos de una gran variedad de modelos de turbulencia de tipo Zero-equation, RAS (Reynolds Average Simulation), LES (Large Eddy Simulation) y DES (Direct Eddy Simulation).

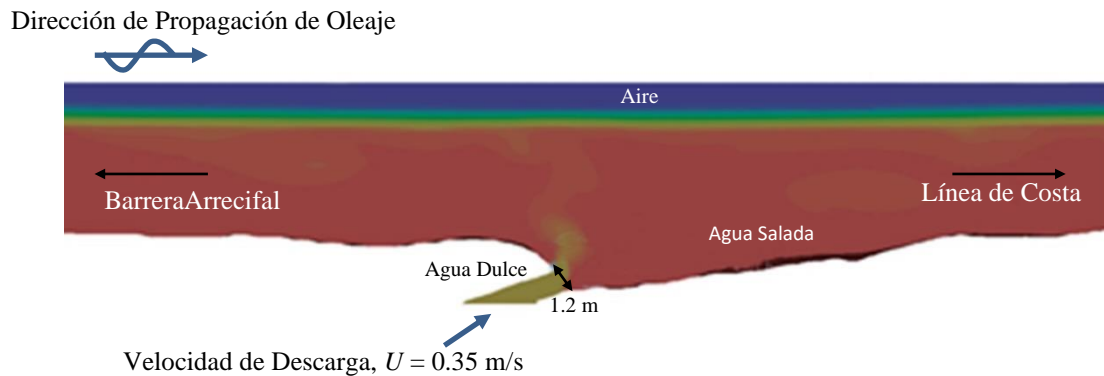
3.8 Resultados de implementación en caso de estudio de descarga de aguas submarina

La validación de las diferentes componentes del modelo *interMixingTemperatureWaveFoam* puede consultarse de forma detallada en Rodríguez-Ocampo, 2016, 2020 y Rodríguez-Ocampo et al. 2020. Así, el caso de simulación de una descarga de aguas subterráneas (SGD) en un cuerpo de agua costero es presentado a fin de mostrar la implementación del modelo en aplicaciones estrechamente vinculadas con el aprovechamiento de gradientes termohalinos (i.e., energía renovable oceánica).

La SGD implementada se localiza en los 20.880 °N y 86.859 °W, al interior de una laguna arrecifal. Las principales características de la laguna consideran una profundidad media del agua $h_{media} \approx 3.5$ m, influencia de oleaje local con altura de ola $H_s = 0.2-0.3$ m; y régimen micromareal con un rango de marea máximo de 0.4 m (Rodríguez-Ocampo, 2016). La descarga media del flujo de salida del SGD se consideró con $Q \approx 0.4-0.5$ m³/s con su batimetría conformada por una abertura de ~1.2 m de diámetro en la boca del SGD (Parra et al., 2015) (Figura 2). Además, el caso consideró una malla semi-estructurada con tamaños de celda de ~ 0.20 m para un dominio bidimensional de 180 m de largo y 6 m de altura, con una profundidad de la columna de agua de 4 m. La aceleración gravitacional se consideró de 9.81 m/s², mientras que el caudal de la descarga se estableció en $Q_{entrada} = 0.4$ m³/s con una velocidad $U_{entrada} = 0.35$ m/s.

El oleaje incidente fue considerado con un período pico $T = 7$ s y altura $H = 0.3$ m. El tiempo total de simulación consideró 150 s. Los datos generales de la configuración del caso respecto a las tres fases consideraron: i) Fase 1 (Agua dulce), $\nu_1 = 1 \times 10^{-6}$ m²/s, $\rho_1 = 1000$ kg/m³, ii) Fase 2 (Agua salada), $\nu_2 = 1 \times 10^{-6}$ m²/s, $\rho_2 = 1030$ kg/m³, iii) Fase 3 (Aire), $\nu_3 = 1.48 \times 10^{-5}$ m²/s, $\rho_3 = 1.2$ kg/m³. La difusión molecular (D) entre las fases miscibles (Fase 1 y Fase 2) se definió $D = 1.26 \times 10^{-9}$ m²/s. La tensión superficial entre la Fase 3 y el resto de las fases se consideró como $\sigma = 0.7$ N/m.

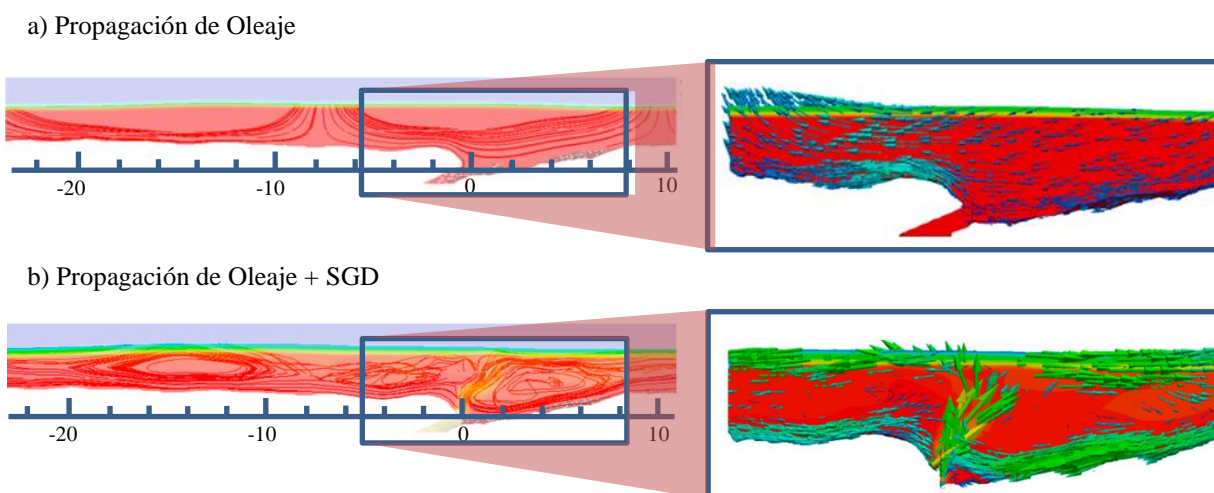
Figura 3.2 Corte lateral de la batimetría de la descarga de agua subterránea



Fuente de Consulta: (Rodríguez-Ocampo, P.E. 2016. Tesis de Maestría. II-UNAM)

En general, se puede observar la influencia del tren de olas en la columna de agua salobre que emerge del manantial submarino (Figura 3.2), junto con la formación de remolinos de aproximadamente 1.5-2 m de diámetro (Figura 3.3). Estos remolinos aparecen cerca de la superficie libre debido al proceso de flotación por la menor densidad del agua dulce que se disuelve en la fase de agua salada. Para las condiciones simuladas, la zona de influencia del SGD mostró un radio de ~ 20 m, mayormente desarrollado en dirección a la línea de costa (Figura 3.3). Las líneas de corriente y los vectores de velocidad se trazaron para un caso sin aporte de agua dulce (solo propagación de olas) y para el caso con un manantial submarino "activo" (Figuras 3.3), esto permitió evidenciar cómo la entrada de agua dulce afecta el flujo, especialmente en la zona cercana a la superficie libre y cerca del manantial submarino. La capa de agua salobre que se forma cerca de la superficie libre representa un obstáculo para el tren de olas y causa una zona con un flujo caótico y la formación de remolinos (4 a 6 m de diámetro).

Figura 3.3 Líneas de corriente (izquierda) y vectores de velocidad (derecha) para caso: a) propagación de oleaje y b) propagación de oleaje y descarga de agua dulce del SGD. El tamaño del vector es proporcional al valor del vector.



Fuente de Consulta: (Rodríguez-Ocampo, P.E. 2016. Tesis de Maestría. II-UNAM)

Cabe señalar que los resultados presentados consideran condiciones isotérmicas pero de densidad variable, con el fin de exponer la capacidad del modelo para el mezclado entre fases, condiciones de oleaje, y la implementación de fuentes puntuales de flujo. Por lo tanto, estos resultados pueden ser extendidos considerando los gradientes termohalinos de la zona, así como su validación con datos *in-situ*, para determinar la influencia real de descargas submarinos bajo ciertas condiciones de interés.

3.9 Conclusiones

El presente trabajo muestra las bases para la implementación del modelo *interMixingTemperatureWaveFoam* dentro de la plataforma CFD de OpenFOAM®, con el fin de permitir el análisis de flujos multifásicos considerando la mezcla de fases y el intercambio térmico entre ellas. Para dicho propósito se consideraron las ecuaciones de gobierno promediadas de Reynolds de: i) conservación de momento, ii) continuidad, iii) conservación de cantidades escalares, iv) fracción de volumen (VOF) y v) conservación de energía en función del campo de temperatura. A partir de dicho modelo, es posible el análisis de flujos multifásicos en aplicaciones marinas como el aprovechamiento de la energía oceánica por gradientes termohalinos. Para demostrar la capacidad del modelo, se mostró su implementación y desarrollo teórico, así como su aplicabilidad a un caso de descargas submarinas puntuales de agua en un cuerpo costero bajo la influencia de oleaje y masas de agua de diferente densidad.

El flujo de fluido se observó afectado por varios factores, entre los que se pueden mencionar:

- a) Acción de fuerzas aplicadas externamente como diferencias de presión, rotación y tensión superficial (que se clasifican como fuerzas de superficie) y fuerzas de cuerpo dadas por la gravedad y fuerzas centrífugas.
- b) Densidad y viscosidad del fluido, cuya influencia en variaciones termohalinas es fundamental en procesos de flotabilidad, turbulencia y dinámica de flujos multifásicos.
- c) Velocidad del flujo, que puede inducir inestabilidad en el flujo y describe un régimen de flujo (laminar, transición o turbulento). Además, la velocidad de flujo permite la consideración de incompresibilidad de fluidos para números bajos de Mach (i.e., $Ma < 0.3$).

Aproximaciones con datos *in-situ* o pruebas de laboratorio podrían ser de relevancia para validar los fenómenos transitorios y aplicar el modelo desarrollado en los casos en que esta característica sea relevante. Por otro lado, debido a la versatilidad de los modelos CFD, el modelo desarrollado también se puede implementar en una variedad de casos diferentes que involucran flujos multifásicos, miscibilidad de dos fases líquidas con diferente temperatura/salinidad (i.e., densidad), generación/absorción de olas o corrientes, y la necesidad de evaluar diferentes modelos de turbulencia. De esta manera, las aplicaciones potenciales del modelo, además de la descarga de agua termal de plantas OTEC (conversión de energía térmica oceánica) pueden atender otro tipo de problemáticas comunes en zonas costeras tales como la descarga submarina de agua subterránea, la descarga de aguas residuales en aguas costeras y la descarga costera de agua de desecho, entre otros. Por último, dado que OpenFOAM® es una plataforma CFD de código abierto, *interMixingTemperatureWaveFoam* puede ser mejorado y ampliado en el futuro por usuarios y desarrolladores para satisfacer la resolución de problemas de energía o de flujos multifásicos en zonas costeras.

3.10 Declaración de disponibilidad de datos

Los datos que dan soporte a este estudio se encuentran disponibles de manera abierta en Mendeley Data <http://dx.doi.org/10.17632/x7p6drp9r6.1>.

3.11 Agradecimientos

La primera autora agradece el apoyo para la realización de la presente investigación al programa de becas de maestría y doctorado CONACYT, al programa EXCEED-SWINDON, así como el proyecto CONACYT-SENER SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA: FSE-2014-06-249795 "Centro Mexicano de Innovación en Energía del Océano (CEMIE Océano)".

3.12 Referencias

Berberović, E., Van Hinsberg, N.P., Jakirlić, S., Roisman, I. V., Tropea, C., 2009. Drop impact onto a liquid layer of finite thickness: Dynamics of the cavity evolution. *Phys. Rev. E - Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys.* 79. <https://doi:10.1103/PhysRevE.79.036306>.

- Bhattacharya, M., Paramati, S. R., Ozturk, I., & Bhattacharya, S. (2016). The effect of renewable energy consumption on economic growth: Evidence from top 38 countries. *Applied Energy*, 162, 733-741. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.104>.
- Brennen, C.E., 2005. *Fundamentals of Multiphase Flows*.
- Burke, M. J., & Stephens, J. C. (2018). Political power and renewable energy futures: A critical review. *Energy Research & Social Science*, 35, 78-93. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.10.018>.
- Dávalos Fassler, E. T. (2020). Modelo numérico CFD del túnel de carga, tubería a presión y distribuidores utilizando el paquete computacional ANSYS Fluent. Caso de aplicación Proyecto Hidroeléctrico Sopladora. Master's thesis, Ecuador. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20657>
- Davide Magagna, Andreas Uihlein. 2015. Ocean energy development in Europe: Current status and future perspectives. *International Journal of Marine Energy*, 11, 84-104. <https://doi.org/10.1016/j.ijome.2015.05.001>.
- Escalante, P.Q. (2020). Aplicación del método del gradiente conjugado para la solución de sistemas lineales simétricos en la simulación numérica de yacimientos. Bachelor's Thesis, IPN, México. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12850.76485>.
- Eça, L., Hoekstra, M., 2008. Code Verification of unsteady flow solvers with method of manufactured solutions. *Int. J. Offshore Polar Eng.* 18, 120–126. <https://doi.org/10.1115/1.1412235>.
- Eça, L., Vaz, G., Koop, A., Pereira, F., Abreu, H., 2016. Validation: What, Why and How, in: *Proceedings of the ASME 2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2016 Busan, South Korea*.
- Ferziger, J.H., Peric, M., 2002. *Computational Methods for Fluid Dynamics*, 3rd ed, Vasa. Springer. [https://doi.org/10.1016/S0898-1221\(03\)90046-0](https://doi.org/10.1016/S0898-1221(03)90046-0).
- Greco, M., Colicchio, G., Faltinsen, O.M., 2007. Shipping of water on a two-dimensional structure. Part 2. *J. Fluid Mech.* 581, 371–399.
- Greco, M., Faltinsen, O.M., Landrini, M., 2005. Shipping of water on a two-dimensional structure. *J. Fluid Mech.* 525, 309–332.
- Hernández-Fontes, J. V., Vitola, M.A., Esperança, P. de T.T., Sphaier, S.H., 2018. Assessing shipping water vertical loads on a fixed structure by convolution model and wet dam-break tests. *Appl. Ocean Res.* 82, 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2018.10.022>.
- Higuera, P., Lara, J.L., Losada, I.J., 2013. Realistic wave generation and active wave absorption for Navier-Stokes models. Application to OpenFOAM®. *Coast. Eng.* 71, 102–118. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.07.002>.
- Hirt, C.W. y B.D Nichols. 1981. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *Journal of Computational Physics* 39(1):201-225. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5).
- Issakhov, A., 2018. Mathematical modeling of the hot water discharge effect on the aquatic environment of the thermal power plant by using two water discharge pipes. *Int. J. Energy a Clean Environ.* 19, 93–103. <https://doi.org/10.1615/InterJenerCleanEnv.2018020872>.
- Issakhov, A., Zhandalet, Y., 2019. Numerical simulation of thermal pollution zones' formations in the water environment from the activities of the power plant. *Eng. Appl. Comput. Fluid Mech.* 13, 279–299. <https://doi.org/10.1080/19942060.2019.1584126>.
- ITTC, 2008. *Uncertainty Analysis in CFD Verification and Validation Methodology and Procedures*, 25th ITTC International Towing Tank Conference 2008.

- Jacobsen, N.G., Fuhrman, D.R., Fredsøe, J., 2012. A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam. *Int. J. Numer. Methods Fluids* 1073–1088. doi:10.1002/fld.
- Kim, J., Kim, H.-J., 2014. Numerical Modeling of Thermal Discharges in Coastal Waters, in: *International Conference on Hydroinformatics*. CUNY Academic Works.
- Kolev, N.I., 2011. *Multiphase Flow Dynamics 1 - Fundamentals*, Fourth. ed. Springer, Herzogenaurach, Germany. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-15296-7>.
- Luijendijk, E., Gleeson, T., Moosdorf, N., 2020. Fresh groundwater discharge insignificant for the world's oceans but important for coastal ecosystems. *Nat. Commun.* 11. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15064-8>.
- Ma, Q., Li, H., Wang, Xuejing, Wang, C., Wan, L., Wang, Xusheng, Jiang, X., 2014. Estimation of seawater–groundwater exchange rate: case study in a tidal flat with a large-scale seepage face (Laizhou Bay, China). *Hydrogeol. J.* 23, 265–275. <https://doi.org/10.1007/s10040-014-1196-z>.
- McCoy, C. a., Corbett, D.R., 2009. Review of submarine groundwater discharge (SGD) in coastal zones of the Southeast and Gulf Coast regions of the United States with management implications. *J. Environ. Manage.* 90, 644–651. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.03.002>
- Mohseni, M., Esperanca, P.T., Sphaier, S.H., 2018. Numerical study of wave run-up on a fixed and vertical surface-piercing cylinder subjected to regular, non-breaking waves using OpenFOAM. *Appl. Ocean Res.* 79, 228–252. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2018.08.003>.
- Olabi, A. G. (2017). Renewable energy and energy storage systems. *Energy*, 136, 1–6 <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.054>.
- Parra, S.M., Valle-Levinson, A., Mariño-Tapia, I., Cecilia, E., 2015. Salt intrusion at a submarine spring in a fringing reef lagoon Sabrina. *J. Geophys. Res.* 1–15. <https://doi.org/10.1002/2014JC010459>.
- Robles Hernández, B. A. (2020). Control de la conificación de agua en pozos horizontales con terminación de liner ranurado mediante la optimización del área disponible al flujo. Bachelor's Thesis, IPN, México. <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/28132>.
- Rodríguez-Ocampo, P.E., 2016. Modelación numérica de flujos multifásicos: interacción del oleaje con descargas submarinas de agua dulce. Master's Thesis, UNAM, Mexico.
- Rodríguez-Ocampo, P.E., 2020. Modelación termodinámica de fluidos multifásicos: aplicación en dispositivos de conversión de energía térmica oceánica. Doctoral Thesis, UNAM, Mexico.
- Rodríguez-Ocampo, P.E., Ring, M., Hernández-Fontes, J.V., Alcérreca-Huerta, J.C., Mendoza-Baldwin, E.G., Gallegos-Diez-Barroso, G., et. al. 2020. A 2D image-based approach for CFD validation of liquid mixing in a free-surface condition. *Journal of Applied Fluid Mechanics.* 13 (5). <https://doi.org/10.36884/jafm.13.05.30909>, pp. 1487-1500.
- Schiestel, R., 2008. *Modeling and Simulation of Turbulent Flows*. ISTE. <https://doi.org/10.1002/9780470610848>.
- Stern, F., Wilson, R. V, Coleman, H.W., Paterson, E.G., 2001. Comprehensive Approach to Verification and Validation of CFD Simulations—Part 1: Methodology and Procedures. *J. Fluids Eng.* 123, 793–802.
- Stern, F., Wilson, R. V, Coleman, H.W., Paterson, E.G., 2001. Comprehensive Approach to Verification and Validation of CFD Simulations—Part 1: Methodology and Procedures. *J. Fluids Eng.* 123, 793–802.
- Stern, F., Wilson, R., Shao, J., 2006. Quantitative V&V of CFD simulations and certification of CFD codes. *Int. J. Numer. Methods Fluids* 50, 1335–1355. <https://doi.org/10.1002/fld.1090>.

Thai, T.H., Tri, D.Q., 2017. Modeling the Effect of Thermal Diffusion Process from Nuclear Power Plants in Vietnam. *Energy Power Eng.* 09, 403–418. <https://doi.org/10.4236/epe.2017.98027>.

Tomislav, M., Höpken, J., Mooney, K., 2014. *The OpenFOAM Technology Primer*, First. ed. Sourceflux, Germany.

Wang, Z., Tabeta, S., 2017. Numerical simulations of ecosystem change due to discharged water from ocean thermal energy conversion plant 1–5.

Capítulo 4 Obtención y caracterización de hidrolizados proteicos de quinoa y amaranto por digestión *in vitro*

Chapter 4 Obtaining and characterizing of protein hydrolyzates of quinoa and amaranth by *in vitro* digestion

VÁZQUEZ-LUNA, Alma†*, DÍAZ-VÁZQUEZ, Alma Elena, LEZAMA-PARADA, Luz Mariana y PIMENTEL-CORTÉS, Vanessa

Instituto de Ciencias Básicas, Universidad Veracruzana

Instituto de Investigaciones en Comportamiento Alimentario, Universidad de Guadalajara

ID 1^{er} Autor: Alma, Vázquez-Luna / **ORC ID:** 0000-0001-5648-7549, **CVU CONACYT ID:** 168130

ID 1^{er} Coautor: Alma Elena, Díaz-Vázquez / **ORC ID:** 0000-0002-5033-5218, **CVU CONACYT ID:** 933895

ID 2^{do} Coautor: Luz Marian, Lezama-Parada / **CVU CONACYT ID:** 946125

ID 3^{er} Coautor: Vanessa, Pimentel-Cortés / **CVU CONACYT ID:** 1066529

DOI: 10.35429/H.2020.8.48.58

A. Vázquez, A. Díaz, L. Lezama y V. Pimentel

almvazquez@uv.mx

A. Marroquín, J. Olivares, L. Cruz y A. Bautista. (Coord) Ciencias ambientales, uso de recursos. Handbooks-©ECORFAN-Mexico, Querétaro, 2020.

Resumen

En la actualidad se ha incrementado el consumo de alimentos que puedan suplir el consumo de carne. Esto debido al impacto ambiental que causa su producción, así como los daños a la salud que se han reportado en recientes estudios. Recientemente los pseudocereales han surgido como una alternativa, concretamente la quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) y el amaranto (*Amaranthus spp*). Dichos pseudocereales se caracterizan por aportar grandes cantidades de macronutrientes ayudando al correcto funcionamiento del organismo, promueven el crecimiento y regulan los procesos metabólicos. A pesar de esta reciente tendencia de consumo, aún no se ha evaluado la digestibilidad gástrica y duodenal *in vitro* para determinar cuánto de la proteína que se ingiere puede absorberse para ser aprovechada por el organismo. Por lo tanto, el presente trabajo tuvo como objetivo evaluar lo anterior, por medio de la elaboración de harinas desengrasadas de quinoa y amaranto, a las cuales se les realizaron aislados proteicos a pH 2, 4 y 6. Posteriormente, se hidrolizaron los aislados mediante simulación gástrica a pH 4 debido a que fue el pH de mayor rendimiento. Se corrieron electroforesis SDS-PAGE. La digestión duodenal simulada se llevó a cabo con las enzimas papaína y bromelina. El rendimiento de los hidrolizados de proteína, así como su concentración fue mayor para quinoa a los diferentes pH ensayados a diferencia de amaranto. En la simulación gástrica se determinó que las proteínas mayoritarias en ambos pseudocereales fueron globulinas y albúminas. En la fase duodenal no se observó ninguna proteína. De acuerdo con los valores obtenidos se concluyó que las proteínas presentes en quinoa y amaranto presentan una excelente digestibilidad y por tanto pueden absorberse a través del duodeno.

Quinoa, amaranto, proteínas, electroforesis.

Abstract

Currently, the consumption of food that can replace the consumption of meat has increased. This is due to the environmental impact caused by its production, as well as the health damage that has been reported in recent studies. Recently, pseudocereals have emerged as an alternative to supplement that consumption, specifically quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) and amaranth (*Amaranthus spp*). These pseudocereals are characterized by providing large amounts of macronutrients, helping the body to function properly, promoting growth and regulating metabolic processes. Despite this recent consumption trend, gastric and duodenal digestibility *in vitro* has not yet been evaluated to determine how much of the protein ingested can be absorbed to be used by the body. Therefore, the objective of this work was to evaluate the above, by means of the preparation of defatted quinoa and amaranth flours, to which protein isolates were made at pH 2, 4 and 6. Subsequently, the isolates were hydrolyzed by gastric simulation at pH 4 because it was the highest yielding pH. SDS-PAGE electrophoresis was run. Simulated duodenal digestion was carried out with the papain and bromelain enzymes. The yield of the protein hydrolyzates, as well as their concentration was higher for quinoa at the different pHs tested, unlike amaranth. In the gastric simulation it was determined that the main proteins in both pseudocereals were globulins and albumins. In the duodenal phase, no protein was observed. According to the obtained values, it was concluded that the proteins present in quinoa and amaranth have excellent digestibility and therefore can be absorbed through the duodenum.

Quinoa, amaranth, proteins, electrophoresis

4. Introducción

Los cereales constituyen la base de la alimentación para gran parte de la población mundial, ocupando un lugar indiscutible en la base de la pirámide nutrimental. Los pseudocereales quinoa (*Chenopodium Quinoa wild*) y amaranto (*Amaranthus spp*) han sido reconocidos por mucho tiempo como importantes cultivos alimenticios en las zonas centro y sur del continente americano (Vázquez et al., 2019). Son granos con una importante cantidad de proteínas y compuestos bioactivos superando en valor biológico a los tradicionales granos, como el maíz y trigo (Alvarez-Jubete et al., 2009; Alvarez-Jubete et al., 2010). La importancia de las proteínas en los alimentos radica en la gran variedad de funciones a nivel metabólico. En el adulto, la pérdida de proteína corporal se asocia con numerosas alteraciones patológicas y a un aumento en la mortalidad (Martínez y Martínez de Victoria, 2006).

Las proteínas están constituidas por unidades de aminoácidos (Gallegos et al., 2013). Los aminoácidos se clasifican en esenciales y no esenciales. Los primeros no son producidos por el organismo, por tanto deben de ser obtenidos a través de los alimentos de la dieta. En su mayoría pueden ser encontrados en alimentos de origen animal y derivados, así como en cereales integrales (González, 2014). De acuerdo con la FAO la quinoa y el amaranto aportan al menos diez de los aminoácidos esenciales dependiendo de la variedad que se trate (FAO/OMS/UNU, 1985). Por tanto, el valor biológico de una proteína depende fundamentalmente de su composición en aminoácidos; se ha observado que ciertos factores influyen en dicho valor, como la especie, edad y el estado fisiológico del cereal o pseudocereal.

Otro factor que condiciona la utilización de las proteínas alimenticias, modificándolas en forma variable es la digestibilidad. La digestibilidad será igual a 100 cuando el nitrógeno ingerido sea totalmente absorbido (Suárez et al., 2006). Para medir digestibilidad de proteínas se encuentran numerosos métodos entre los que destaca el método *in vitro*. El método *in vitro* es una simulación de las condiciones fisiológicas de la digestión *in vivo*, es una técnica ampliamente utilizada en campos como la nutrición, farmacología o química de los alimentos (Lucas, 2016). Para seleccionar el método más adecuado es importante tomar en cuenta que el método sea lo más simple posible, rápido, que arroje resultados reproducibles y posea una alta correlación con algún método *in vivo* (Hsu et al., 1977).

Tomando en cuenta lo anterior, la presente investigación tuvo como objetivo llevar a cabo un estudio comparativo de la digestibilidad que presentan los aislados de proteínas de la harina de amaranto y quinoa. Se seleccionaron dichos pseudocereales debido a: 1) el alto valor biológico de sus proteínas, 2) similitudes filogenéticas, 3) importancia en la agricultura mexicana, 4) fuente alternativa de proteína para personas que no pueden consumir alimentos cárnicos por patologías digestivas, enfermedades crónicas degenerativas o recursos limitados para su compra.

4.1 Material y Métodos

4.2 Pseudocereales

Debido a la importancia de los cultivos de pseudocereales en el continente americano, se buscó utilizar dos pseudocereales endémicos: quinoa y amaranto. La quinoa utilizada en este estudio fue traída de Chile, dado que se tiene registro de ser un cereal ancestral en este país, además de que la semilla ha sido mejorada genéticamente para adaptarse a diferentes zonas de cultivo. Con respecto al amaranto se seleccionó a México, por las mismas razones que se expusieron anteriormente para Chile. El amaranto utilizado proviene de cultivos establecidos en el estado de Puebla. Una vez que se tuvieron los pseudocereales se llevó a cabo la producción de las harinas. Ambas harinas fueron producidas a través de molienda en una licuadora comercial (marca Osterizer, Milwaukee, Wisconsin), posteriormente se tamizaron en una malla 200 (NOM-247-SSA1-2008), para finalmente empacar ambas harinas en bolsas de plástico laminadas y selladas (marca Osterizer, Milwaukee, Wisconsin) para almacenarlas a temperatura ambiente (25-28°C) y realizar las determinaciones que se describen a continuación.

4.3 Desengrasado de las harinas

La harina fue desengrasada mediante un proceso de extracción con n-hexano en una relación 1:10. Este proceso se realizó a temperatura ambiente con agitación continua durante 5 horas y posterior reposo durante 19 horas, completando el proceso en 24 horas de contacto de la harina con el solvente. Luego se separó la harina del hexano por filtración, dejándola bajo campana durante 12 horas esparcida sobre una superficie plana para eliminar los restos de hexano.

4.4 Obtención de aislados de proteína de quinoa y amaranto

El aislado proteico fue obtenido según el método descrito por Quelal et al. (2019). Se utilizó harina desengrasada para ambos pseudocereales. La harina fue suspendida en agua destilada, en una relación 1:10 harina/agua, se llevó a pH 8.0 bajo agitación intensa durante una hora controlando el pH regularmente para obtener una precipitación isoeléctrica. Transcurrido ese tiempo, se centrifugó durante 30 min a 10,000 rpm a una temperatura de 4 °C usando una centrífuga MIKRO 220R (marca Hettich).

El sobrenadante, se llevó a pH 2, 4 y 6 con una solución HCl 2 N para precipitar las proteínas, manteniéndolo durante 10 min bajo agitación, posteriormente se centrifugó durante 20 min a las mismas condiciones. El precipitado de proteínas se suspendió en agua llevando el pH a 7.0. Posteriormente se ultracongeló la suspensión a -86 °C y se liofilizó a -50 °C, conectando los frascos con la suspensión al equipo de secado en frío FreeZone 6 liter de Labconco durante 48 h. El liofilizado obtenido se homogenizó y se guardó en frascos herméticamente cerrados a 4 °C hasta su utilización. Cada ensayo se llevó a cabo por triplicado (n = 3).

4.5 Hidrólisis enzimática del aislado de proteínas

La hidrólisis se llevó a cabo de acuerdo a lo reportado por Nongonierma y FitzGerald (2015), con modificaciones. El aislado de proteínas se resuspendió en agua destilada a (25 g/L), ajustando el pH a 2.0 con NaOH 0.5 M y se dejó hidratar durante 30 minutos a 50 °C. Se usaron preparaciones enzimáticas de papaína obtenidas a partir de látex de *Carica papaya*, añadiéndose en una relación enzima:sustrato (E:S) del 2% (v/p) y realizándose la hidrólisis a 50 °C durante 180 min. Una muestra control sin enzimas, se mantuvo en las mismas condiciones que la muestra de reacción. Las enzimas se inactivaron por calor en un baño de agua a 90 °C. Los hidrolizados generados con papaína se liofilizaron conectando los frascos con los hidrolizados al equipo de secado en frío FreeZone 6 liter de Labconco durante 48 h y almacenaron a -20 °C antes de análisis posterior. Cada ensayo se llevó a cabo por triplicado (n = 3).

4.6 Cuantificación de proteínas de los aislados

4.7 Método de Bradford

Se utilizó azul de Coomassie G250, etanol 2.5 mL, ácido fosfórico 5 mL y agua 50 mL, se mezclaron en ese orden, se agitaron y filtraron. Para la curva de papaína, se colocaron 20 mL de muestra en un tubo de hemólisis. Se agregaron 50 mL de NaOH 1 N más 1 mL de reactivo de color e incubaron por 5 min, se midió la absorbancia a 590 nm en cubetas de vidrio usando un espectrofotómetro de placas modelo Elx800 marca BioTek. Cada ensayo se llevó a cabo por triplicado (n = 3).

4.8 Método de Kjeldahl

Se pesó 1 g de muestra y se colocó cuantitativamente en un matraz de Kjeldahl, se añadieron 2 g de sulfato de cobre, 10 g de sulfato de sodio anhidro, 25 mL de ácido sulfúrico y perlas de vidrio. Se colocó el matraz cuidadosamente en el digestor durante 45 min y posteriormente fue calentada hasta que toda la muestra estuvo carbonizada, se aumentó la temperatura progresivamente hasta que la disolución se mostró totalmente clara, se dejó por 30 min a esta temperatura. Posteriormente se dejó enfriar y se añadieron de 400 a 450 mL de agua destilada para disolver por completo la muestra; se agregaron 3 o 4 gránulos de zinc, y un poco de parafina cuando se requirió y por último 50 mL de hidróxido de sodio 1:1. Seguido estos pasos, se conectó inmediatamente el matraz a un sistema de destilación, en el cual previamente se colocó un matraz Erlenmeyer de 500 mL que contenía 50 mL de ácido bórico y unas gotas del reactivo Shiro Tashiro como indicador en la salida del refrigerante. Se destiló hasta que el amoníaco fue eliminado, posteriormente se retiró el matraz Erlenmeyer y se tituló el destilado con HCl 0.1 N (AOAC, 2015). Cada ensayo se llevó a cabo por triplicado (n = 3).

Fórmula para determinación de proteínas

$$\% \text{ Nitrógeno} = \frac{V \times N \times 0.14}{m} (100)$$

Donde:

V= Volumen de ácido clorhídrico empleado en la titulación

N= Normalidad del ácido clorhídrico (0.1)

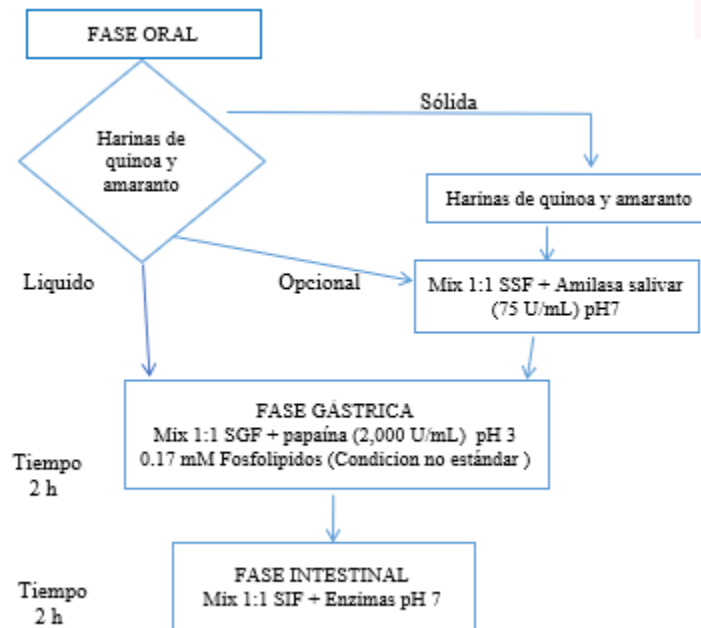
m= Masa de la muestra

0.014= Equivalente del nitrógeno

4.9 Protocolo experimental de simulador *in vitro*

El método *in vitro* utilizado estuvo basado en el protocolo Minekus et al. (2014). Se realizó un método de digestión estandarizado y práctico basado en condiciones fisiológicamente relevantes, que se pudieran aplicar para varios puntos finales y que pueden modificarse para adaptarse a otros requisitos específicos (véase Figura 4.1).

Figura 4.1 Diagrama de flujo de simulador *in vitro*.



Nota. Adaptado de “A standardised static *in vitro* digestion method suitable for food – an international consensus” (Minekus et al., 2014).

4.10 Preparación de soluciones madre de fluidos de digestión simulados

Los volúmenes se calcularon para un volumen final de 500 mL para cada fluido simulado. Estos concentrados de 1.25 se denominaron soluciones de electrolito de líquido salival simulado (SSF), líquido gástrico simulado (SGF) y líquido intestinal simulado (SIF) (véase Tabla 4.1).

Tabla 4.1 Preparación de soluciones madre de fluidos de digestión simulados.

Constitución	Stock concentración		SSF pH 7		SGF pH 3		SIF pH 7	
	g L ⁻¹	mol L ⁻¹	Volumen de valores	Concentración en SSF	Vol. de valores	Concentración en SGF	Volumen de valores	Concentración en SIF
			MI	mmol L ⁻¹	MI	mmol L ⁻¹	MI	mmol L ⁻¹
KCl	37.3	0.5	15.1	15.1	6.9	6.9	6.8	6.8
KH ₂ PO ₄	68	0.5	3.7	3.7	0.9	0.9	0.8	0.8
NaHCO ₃	84	1	6.8	13.6	12.5	25	42.5	85
NaCl	117	2	-	-	11.8	47.2	9.6	38.4
MgCl ₂ (H ₂ O) ₆	30.5	0.15	0.5	0.15	0.4	0.1	1.1	0.33
(NH ₄) ₂ CO ₃	48	0.5	0.06	0.06	0.5	0.5	-	-
Para ajuste de pH								
	mol L ⁻¹		MI	mmol L ⁻¹	MI	mmol L ⁻¹	MI	mmol L ⁻¹
NaOH	1		-	-	-	-	-	-
HCl	6		0.09	1.1	1.3	15.6	0.7	8.4
CaCl₂(H₂O)₂ no se agrega a los fluidos de digestión simulados								
	g L ⁻¹	mol L ⁻¹		mmol L ⁻¹		mmol L ⁻¹		mmol L ⁻¹
CaCl ₂ (H ₂ O) ₂	44.1	0.3		1.5 (0.75*)		0.15 (0.075*)		0.6 (0.3*)

Nota. Adaptado de Fuente: (Minekus et al., 2014)

4.11 Fase oral

La masticación de alimentos sólidos se simuló con una cantidad de alimento previamente triturado en una licuadora convencional. La solución madre SSF se agregó para crear una consistencia similar a una pasta delgada. Se colocó una porción de alimento y SSF de 50:50 (w/v). Como el alimento utilizado contiene almidón se usó α -amilasa salival 75 U/mL, seguida de CaCl_2 0.75 mM y la cantidad necesaria de agua hasta completar la dilución. El tiempo recomendado con la enzima fue de 2 min a 37 °C, lo que requirió de un precalentamiento de todos los reactivos a dicha temperatura, usando un baño de temperatura controlada marca LABCONCO.

4.12 Fase gástrica

Cinco partes de alimento líquido o bolo oral, se mezclaron con 4 partes de solución de electrólito de reserva de SGF para obtener una proporción final de alimento a SGF de 50:50 (v/v) después de la adición de otros recipientes y agua. Se agregó papaína previamente liofilizada 2000 U/mL, seguido de HCl 1 M hasta reducir el pH a 3.0. Finalmente se agregó agua hasta completar la dilución. El tiempo de digestión fue de 2 horas a 37°C en un baño de temperatura marca LABCONCO.

4.13 Fase intestinal

Cinco partes de quimo gástrico se mezclaron con cuatro partes de solución madre SIF para obtener una relación final de quimo gástrico a SIF de 50:50 (v/v) después de las adiciones de otros recipientes y agua. Las muestras gástricas-quimo se mezclaron con electrolito SIF solución de electrólito stock. Se requirió la adición de una base (NaOH 1 M) para neutralizar la mezcla a pH 7.0.

4.14 Electroforesis (SDS PAGE)

Mediante electroforesis SDS-PAGE se caracterizó el aislado proteico puro de quinoa y los hidrolizados de proteínas de quinoa, se usaron geles de poli(acrilamida) al 12 %, para determinar los pesos moleculares aproximados de las proteínas del aislado y de los hidrolizados. Se usó un estándar de pesos moleculares (14-140 kDa) de la marca Bio-Rad®, Hercules, CA, EE.UU. Se agregaron 20 μL de muestra y 10 μL de estándar en los pocillos del gel, la electroforesis se llevó a cabo en el equipo Bio-Rad Modelo PowerPac™ Basic a 120 voltios durante 120 minutos. Las bandas de polipéptidos se tiñeron de azul brillante de Coomassie G-250 durante 24 horas y posteriormente se destiñó con una solución de ácido acético (5 %), agua y metanol (50 %) por 24 horas. Las masas moleculares relativas de proteína se determinaron mediante una comparación con marcadores de peso molecular (Bio-Rad, Hercules, CA, EE.UU.) y el software Quantity One del equipo ChemiDoc (Bio-Rad).

4.15 Análisis Estadístico

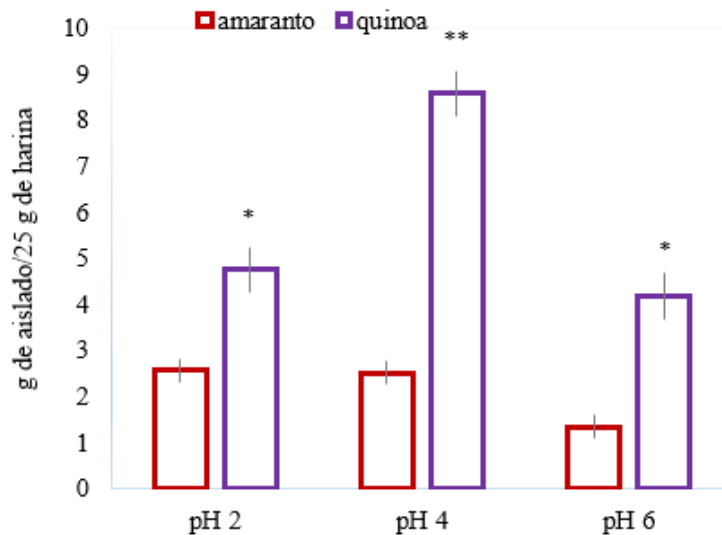
Los resultados fueron analizados mediante ANOVA de una vía donde los tratamientos fueron los pseudocereales empleados y las variables de respuesta los resultados obtenidos de las diferentes determinaciones, cuando hubo diferencia significativa se realizó la comparación de medias por la prueba de Tukey con un nivel de significancia del 0.05.

4.16 Resultados y Discusión

4.17 Obtención de aislados proteicos a partir de harina desengrasada

Una vez obtenidos los aislados proteicos a pH 2, 4 y 6 liofilizados, se calculó el porcentaje de rendimiento del proceso de extracción. Para ello se pesaron las tres réplicas de los distintos pH. Se calculó la desviación estándar y se representaron los valores como la media \pm SD. En la figura 2 podemos ver que el mayor rendimiento fue para los aislados proteicos de quinoa sometidos a pH 4, a diferencia del rendimiento de amaranto el cual se mantuvo constante en los pH 2 y 4, también podemos observar diferencias significativas entre los rendimientos de amaranto y quinoa ($p < 0.05$).

Figura 4.2 Rendimiento promedio del proceso de aislamiento de los péptidos a los diferentes valores de pH.



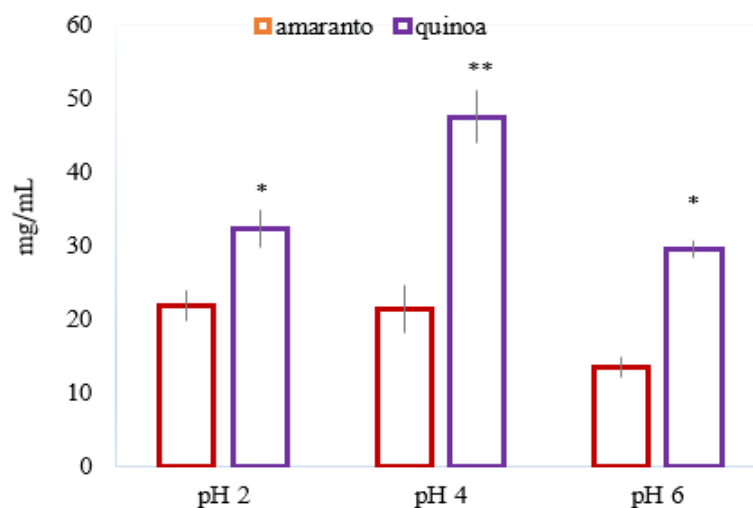
En un estudio reportado por Callisaya, et. al. (2009), se compararon los aislados proteicos de quinoa (*Chenopodium quinoa*) y cañahua (*Chenopodium pallidicaule*), los cuales se realizaron en torno al pH isoelectrico y se demostró que la variación del pH influyó sobre la apariencia física de la proteína aislada, obteniendo un mejor rendimiento a pH 3.02, sin embargo, la apariencia física de la proteína cambió considerablemente precipitando en forma de agregados o grumos. Por otra parte Castel (2010), determinaron que el rendimiento más alto en amaranto se obtiene a pH de 4.6 y, que la concentración más alta se encuentra en la cáscara que en el perisperma, en el presente trabajo se obtuvo un rendimiento parecido a pH de 2 y de 4 para amaranto, sin embargo en ambos casos fue menor al obtenido con quinoa. El cuerpo humano tiene un complejo sistema para descomponer las proteínas. En la ingesta de alimentos en la boca se mezclan con la saliva que en su mayoría es amilasa, más tarde el bolo es sujeto a un proceso gástrico donde varía el pH y actúan enzimas (amilasas, proteasas y lipasas) y con surfactantes (sales biliares y fosfolípidos) en el duodeno. Dependiendo del grado de hidrólisis en la fase gástrica y duodenal, las proteínas de los alimentos son degradadas a fragmentos más pequeños, para que puedan atravesar la capa de moco del epitelio, para ello son convertidas en moléculas más pequeñas; como aminoácidos, di y tripéptidos (Thomas et al., 2004).

4.18 Cuantificación de proteínas de los aislados

4.19 Método de Bradford

En la Figura 4.3 se presentan los resultados obtenidos para la determinación de proteínas para los diferentes pH utilizados anteriormente, cómo se puede observar hubo diferencias significativas entre quinoa y amaranto ($p < 0.05$) independientemente del pH utilizado.

Figura 3. Contenido de proteína en aislados de quinoa y amaranto



Castel (2010) obtuvo un rendimiento parecido en diferentes variedades de amaranto cuando se acercaron al punto isoeléctrico de las proteínas como en el presente estudio. Por otra parte Abugoch et al. (2008) determinaron que a pH menor a 5 las proteínas de quinoa empiezan a precipitar obteniendo un rendimiento mayor para los aislados de proteína, en este trabajo la mayor concentración de proteínas se obtuvo a pH 4. En general los trabajos que se han reportado mencionan que la extracción ácida ofrece un mejor rendimiento para los aislados proteicos y que el tamaño pequeño del gránulo de almidón de amaranto dificulta su separación en los procesos de clarificación y centrifugación (Cordero et al., 2005)

4.20 Cuantificación de proteína sin digerir en los aislados de amaranto y quinoa por el método de Kjeldahl

Se determinó el porcentaje de solubilidad de las proteínas en los aislados proteicos. Las muestras se tomaron al inicio de la incubación (tiempo 0) y a las 24, 48 y 72 h. En la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos para la proteína total y soluble, con respecto a la primera no se observaron diferencias significativas para ambos pseudocereales solubilidad de proteínas a los intervalos de tiempo estudiados, se obtuvieron diferencias significativas entre la proteína de quinoa ($p < 0.05$) con respecto a la de amaranto, sin importar el tiempo de incubación. Las proteínas utilizadas como aditivos en alimentos pueden ser parcialmente o completamente solubles o completamente insolubles en agua, el concepto realmente novedoso desde el punto de vista nutricional es la utilización de la proteína y/o de sus péptidos con el propósito fundamental de mejorar una función biológica o de tratar de prevenir o reducir el riesgo de una enfermedad (Martínez & Martínez de Victoria, 2006; Hidalgo et al., 2018).

Tabla 4.2 Concentración de proteínas totales en harina de amaranto y quinoa

Tiempo de incubación (h)	Harina de amaranto		Harina de quinoa	
	Proteína total (mg/mL)	Proteína soluble (mg/mL)	Proteína total (mg/mL)	Proteína soluble (mg/mL)
0	3.9 ± 0.02	0	3.6 ± 0.08	0
24	3.5 ± 0.1	0.48 ± 0.01	3.5 ± 0.1	0.21 ± 0.01
48	3.4 ± 0.04	0.44 ± 0.4	3.6 ± 0.03	0.23 ± 0.1
72	3.7 ± 0.01	0.49 ± 0.02	3.7 ± 0.01	0.25 ± 0.02

*Nota: *Los datos representan la media ± desviación estándar*

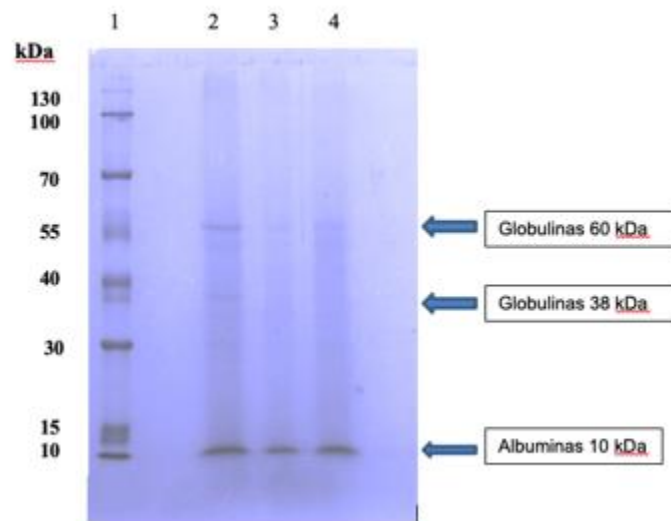
4.21 Análisis de aislados e hidrolizados enzimáticos de proteína de amaranto y quinoa mediante electroforesis

Se encontraron proteínas en diferentes bandas de peso molecular para amaranto, las proteínas más abundantes estuvieron en 100, 60 (globulinas), 36, 22 y 10 kDa (albúminas). Se ha reportado que las albúminas tienen un peso menor a 30 kDa y que suelen ser las más abundantes en amaranto, por otra parte las globulinas son intermedias presentan pesos entre 60 a 80 kDa generalmente se les conoce como proteínas de reserva en el amaranto (Juan et. al., 2007; Castel, 2010). En cuanto a la quinoa se observaron bandas a los 70, 55, 40, 35, 20 y 10 kDa, básicamente globulinas y albúminas. Estos resultados también fueron observados por Abugoch et. al., 2008 y Toapanta en 2016 con otras variedades de quinoa. Las globulinas tienen dos grupos en función de su coeficiente de sedimentación: 11S-12S y 7S-8S. Las proteínas predominantes de almacenamiento de la quinoa son globulinas 11S y 7S.

4.22 Fase gástrica

En la Figura 4 se observan los perfiles proteicos de amaranto y quinoa obtenidos mediante electroforesis en presencia del simulador gástrico. En el carril 1 se encuentra el marcador de peso molecular, en el carril 2 se observaron bandas para amaranto a pesos moleculares de 60, 34 y 10 kDa y en el carril 4 se observan bandas a 60 y 10 kDa para quinoa. Toapanta en 2016 también observó estas mismas bandas en quinoa, aún cuando diluyó sus muestras en una proporción de 1:4, aparecían las bandas de globulinas y albúminas en el gel de electroforesis.

Figura 4.4 Electroforesis SDS-PAGE de aislado de proteínas de quinoa y amaranto



4.23 Fase intestinal

No se observaron bandas en las electroforesis que se llevaron a cabo para la fase intestinal, ni en amaranto ni en quinoa, éstas fueron hidrolizadas completamente para cada una de las repeticiones llevadas a cabo. Aproximadamente entre el 85 – 90 % de la proteína que alcanza el intestino delgado es digerida, el resto se excreta por las heces, las células de la mucosa intestinal sólo puede dejar pasar aminoácidos y pequeños oligopéptidos. La biodisponibilidad de las proteínas expresa la proporción de la cantidad total de aminoácidos de la dieta que pueden ser absorbidos y utilizados metabólicamente (Martínez & Martínez de Victoria, 2006).

4.24 Conclusión

Los aislados de proteínas de quinoa a pH 4 fueron los de mayor rendimiento y de mayor contenido proteico, incluso superior a los de amaranto en todos los tratamientos ensayados. Las proteínas de quinoa y amaranto obtenidas durante la simulación gástrica y determinadas mediante electroforesis fueron globulinas y albúminas, con pesos moleculares entre 60 y 10 kDa. La digestión duodenal fue total para ambos pseudocereales como se observó en los geles de electroforesis obtenidos por lo que podríamos hablar de una buena biodisponibilidad de las proteínas de quinoa y amaranto.

4.25 Agradecimiento

Las autoras agradecen al Dr. Francisco Fuentes Profesor-Investigador de la Pontificia Universidad Católica de Chile quien donó la quinoa utilizada en la presente investigación, con quien actualmente estamos trabajando mediante Convenio Institucional para poder cultivar quinoa chilena en México.

4.26 Referencias

Abugoch L. (2009). Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) composition, chemistry, nutritional, and functional properties. *Advances in Food and Nutrition Research*. 58(1):1-31. doi: 10.1021/jf703689u
 Álvarez-Jubete, L., Arendt, E. K., & Gallagher, E. (2009). Nutritive value and chemical composition of pseudocereals as gluten-free ingredients. *International Journal of Food Science and Nutrition*. 60(4): 240-257. doi.org/10.1080/09637480902950597

Álvarez-Jubete, L., Arendt, E. K., & Gallagher, E. (2010). Nutritive value of pseudocereals and their increasing use as functional gluten-free ingredients. *Trends in Food Science and Technol.* 21(2): 106-113. doi.org/10.1016/j.tifs.2009.10.014

AOAC. (2015). *Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemist*. Washington D.C., US: (Horwitz W., Latimer G., edits), p. 24.

Callisaya, A.J.C. & Alvarado, K.J.A. (2009). Aislados proteínicos de granos altoandinos chenopodiaceas: Quinoa “*Chenopodium quinoa*”, Cañahua “*Chenopodium pallidicaule*” por precipitación isoeléctrica. *Revista Boliviana de Química*. 26(1):12-20 Recuperado de: http://scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0250-546020090001000

Castel, M.V. (2010). *Estudio de las propiedades funcionales, tecnológicas y fisiológicas de las proteínas de amaranto*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional del Litoral, Argentina. pp. 64-65. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/11185/212>

Cordero, M.Y., Osuna-Castro J.A., Borodanenko, A., & Paredes-López, O. (2005). Physicochemical and functional characterisation of amaranth (*amaranthus hypochondriacus*) protein isolates obtained by isoelectric precipitation and micellisation. *Food Science and Technology International*. 11:269-280. doi.org/10.1177/1082013205056491

World Health Organization FAO/WHO/UNU (1985). Expert Consultation. Energy and Protein Requirements. Technical Report Series 724. Recuperado de: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/39527>

Gallegos S. T., Chel G. L., Corzo R. L. J., & Martínez, A. L. (2013). *Péptidos con actividad antioxidante de proteínas vegetales*. En M. Segura Campos, L. Chel Guerrero & D. Betancur Ancona (Eds.), *Bioactividad de péptidos de proteínas alimentarias* (pp. 111-122). Barcelona: OmniaScience

González, V. L. (2014). La información a los consumidores sobre la ausencia o presencia reducida de gluten en los alimentos. *Revista de Derecho Agrario y Alimentario* 65(2). Recuperado de: https://works.bepress.com/luis_gonzalez_vaque/110/

Hidalgo, A., Ferraretto, A., De Noni, I., Bottani, M., Cattaneo, S., Galli, S., & Brandolini A. (2018). Bioactive compounds and antioxidant properties of pseudocereals-enriched water biscuits and their in vitro digestates. *Food Chemistry*. 240: 799-807. doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.08.014

Hsu, H. W., Vavak D. L., Satterlee L. D. y Millar G. A. (1977). A multienzyme technique for estimating protein digestibility. *Journal of food Science*. 42: 1269-1273. doi.org/10.1111/j.1365-2621.1977.tb14476.x

Juan R., Pastor J., Alaiz M., Megías C., Vioque J. (2007). Caracterización proteica de las semillas de once especies de amaranto. *Grasas y Aceites*. 58(1):49-55. Recuperado de: <http://digital.csic.es/bitstream/10261/1510/1/vioquegya.pdf>

Lucas-González, R. (2016). Digestión de alimentos: Tendencias en los modelos de digestión in vitro. *Revista doctorado UMH*. 2(2): p5. doi: <https://doi.org/10.21134/doctumh.v2i2.1278>

Martínez, A. O. & Martínez de Victoria, N. (2006). Proteínas y péptidos en nutrición enteral. *Nutrición Hospitalaria*. 21:1-14. Recuperado de: http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0212-16112006000500002

Minekus, M., Alminger, P., Alvito, S., Ballance, T. Bohn, C. Bourlieu, F., Carriere, R., Boutrou, M., Corredig, D., Dupont, C., Dufour, L., Egger, M., Golding, S., Karakaya, B., Kirkhus, S., Feunteun, U., Lesmes, A., Macierzanka, A., Mackie, S., Marze, D.J., McClements, O., Menard, I., Recio, C.N., Santos, R.P., Singh, G.E., Vegarud, M.S., Wickham, J., Weitschies, W., & Brodkorb, A. (2014). A standardised static in vitro digestion method suitable for food – an international consensus. *Food and Function* 5: 1113-1124. doi: 10.1039/c3fo60702j

Nongonierma, A.B., & FitzGerald, R.J., (2015). Investigation of the potential of hemp, pea, rice and soy protein hydrolysates as a source of dipeptidyl peptidase IV (DPP-IV) inhibitory peptides. *Food Digestion: Research and Current Opinion* 6: 19-29. DOI: 10.1007/s13228-015-0039-2, 1-11.

Quelal, M., Nazate, K., Villacrés, E., & Cuarán, J. (2019). Obtención y caracterización de un hidrolizado proteico de quinoa (*Chenopodium quinoa Willd*). *Enfoque UTE*. 10(2):79-89. http://ingenieria.ute.edu.ec/enfoqueute/public/journals/1/html_v10n2/art007.html

Suárez, M., Kizlansky, A., & López, L. B. (2006). Evaluación de la calidad de las proteínas en los alimentos calculando el score de aminoácidos corregido por digestibilidad. *Nutrición Hospitalaria*. 21(1):47-51. Recuperado de: http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0212-16112006000100009

Thomas, K., Aalbers, M., Bannon, G. A., Bartels, M., Dearman, R. J., Esdaile, D. J., Fu, T. J., Glatt, C. M., Hadfield, N., Hatzos, C., Hefle, S. L., Heylings, J.R., Goodman, R. E., Henry B., Herouet, C., Holsapple, M., Ladics, G. S., Landry, T. D., & Zawodny, J. (2004). A multi-laboratory evaluation of a common in vitro pepsin digestion assay protocol used in assessing the safety of novel proteins. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 39(2):87-98. doi: 10.1016/j.yrtph.2003.11.003.

Vázquez-Luna, A., Fuentes, F., Rivadeneyra, E., Hernández, C., & Díaz-Sobac, R. (2019). Nutritional content and functional properties of quinoa flour from Chile and Mexico. *Ciencia e Investigación Agraria*. 46(2): 144-153. doi: 10.7764/rcia.v46i2.2099

Capítulo 5 Pruebas de factibilidad y desempeño de un control híbrido neurodifuso para una unidad turbogás

Chapter 5 Feasibility and Performance of a hybrid neuro-fuzzy system for a gas turbine

VILLAGRÁN-VILLEGAS, Luz Yazmin†*, PATIÑO-ORTIZ, Miguel, HERNÁNDEZ-GÓMEZ, Luis Héctor y SIORDIA-VÁSQUEZ, Xóchitl

*Instituto Politécnico Nacional
Universidad Veracruzana*

ID 1^{er} Autor: *Luz Yazmin, Villagrán-Villegas* / **ORC ID:** 0000-0003-3860-2923, **CVU CONACYT ID:** 96365

ID 1^{er} Coautor: *Miguel, Patiño-Ortiz* / **ORC ID:** 0000-0002-5630-8077, **CVU CONACYT ID:** 167388

ID 2^{do} Coautor: *Luis Héctor, Hernández-Gómez* / **ORC ID:** 0000-0003-2573-9672, **CVU CONACYT ID:** 5107

ID 3^{re} Coautor: *Xóchitl, Siordia-Vázquez* / **ORC ID:** 0002-8472-8001, **CVU CONACYT ID:** 1036998

DOI: 10.35429/H.2020.8.59.68

L. Villagrán, M. Patiño, L. Hernández y X. Siordia

yvillagran@uv.mx

A. Marroquín, J. Olivares, L. Cruz y A. Bautista. (Coord) Ciencias ambientales, uso de recursos. Handbooks-©ECORFAN-Mexico, Querétaro, 2020.

Resumen

Durante el desarrollo e implantación de Sistemas de Control Distribuido para Centrales de Ciclo Combinado Gómez Palacio (SCD-GP) de la Comisión Federal de Electricidad [1, 2] se han detectado varias necesidades y oportunidades de desarrollo tecnológico. Una de las más importantes y necesaria es la del mejoramiento de las estrategias de control de potencia, velocidad y temperatura de las unidades turbogás. En gran parte esto se debe a que las unidades turbogás se caracterizan por operar a temperaturas, presiones y velocidades relativamente más altas que las de cualquier otro tipo de unidades, lo cual se traduce en mayores y más estrictos requerimientos del sistema de control para obtener una operación segura y rentable [3]. Actualmente, los sistemas de control de unidades turbogás están basados en algoritmos de control convencionales del tipo PI (Proporcional e Integral) La idoneidad de este tipo de controladores para tareas de regulación ha sido ampliamente probada. Sin embargo su uso para el control de velocidad durante el arranque, o para el control de potencia en todo el rango de generación de una unidad turbogás, plantea serios cuestionamientos, ya que el desempeño de la unidad puede ser afectado adversamente debido a la no linealidad de la dinámica del proceso, la cual cambia conforme al punto de operación. A pesar de ello el uso de los controladores se ha prolongado por mucho tiempo debido a su sencillez y a que estrictamente, no se requiere de un modelo matemático del proceso para su diseño y ajuste. La importancia de este último hecho no puede menospreciarse, ya que la dificultad de contar con modelos matemáticos precisos del proceso es una de las causas fundamentales para que no se haya generalizado la aplicación de estrategias de control moderno. Una alternativa atractiva para mejorar el desempeño de las unidades turbogás es el empleo de técnicas de Inteligencia Artificial para el control de procesos, las cuales podrían superar algunas de las desventajas del control moderno y permitirían satisfacer requerimientos más sofisticados que con el control convencional. Específicamente resulta de interés investigar la aplicabilidad del control basado en lógica difusa, para el cual se han reportado múltiples aplicaciones exitosas en otras áreas industriales. En el Instituto de Investigaciones Eléctricas, en el desarrollo de controladores difusos para unidades turbogás [4], en donde se rediseñó la programación del sistema de control para la unidad turbogás W501 y se incorporó un controlador difuso de velocidad en tiempo real para el arranque de la turbina de gas [5,6] Posteriormente este trabajo fue continuado y extendido al control de la potencia generada [7,8] En ambos casos los resultados obtenidos fueron exitosos y constituyen una base sólida para el uso de controladores difusos en una unidad turbogás real. Sin embargo, desde un principio fue latente la dificultad para obtener la base de reglas y los parámetros de los diversos elementos del sistema de inferencia difuso incluido en el controlador. Para solucionar esta problemática y automatizar lo más posible el diseño del sistema de sintonización basado en redes neuronales, el cual primeramente se aplicó a controladores PI convencionales [9], y en una segunda etapa a la sintonización de un controlador difuso [10] El enfoque de este último trabajo consistió en desarrollar un sistema que proporcionara los parámetros que definen las variables lingüísticas del controlador usando un algoritmo de aprendizaje de redes neuronales. El conjunto formado por la red neuronal y el sistema difuso del controlador es un sistema de tipo cooperativo en donde ambos componentes son aplicaciones independientes; la red neuronal le comunica los resultados de aprendizaje al sistema difuso. Debido a las dificultades encontradas con el sistema neuro-difuso cooperativo, se planteó el desarrollo de un controlador neuro-difuso en donde se conjuguen en un solo sistema híbrido las ventajas de las redes neuronales y los sistemas de inferencia difusos, de tal manera que el procedimiento de aprendizaje de los parámetros del controlador difuso se lleve a cabo en una forma directa y más simple. En este artículo se presenta un controlador digital basado en un sistema de inferencia neuro-difuso que puede ser diseñado fuera de línea en forma automatizada y se demuestra su factibilidad basada en la evaluación de robustez de desempeño, como un primer paso a su aplicación en el control de unidades turbogás. La evaluación se hace mediante simulaciones extensivas, aplicando el controlador a un sistema de primer orden con retardo. Las pruebas incluyen variaciones en rango amplio de la ganancia, retardo y constante de tiempo del proceso. También se evalúa el efecto de perturbaciones determinísticas y estocásticas en la señal de control, la variable manipulada y la señal controlada. Los resultados obtenidos demuestran la factibilidad de utilizar el controlador neurodifuso en aplicaciones reales.

Control neurodifuso, turbina de gas, redes neuronales, control PI

5. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados de la evaluación de la robustez del desempeño de un controlador neurodifuso, como un primer paso a su aplicación en un proceso real. En estas pruebas se presenta una de las versiones más simples de un controlador neuro-difuso digital basado en un algoritmo de control PI convencional del tipo velocidad. La evaluación se hace mediante simulaciones en tiempo discreto; aplicando el controlador a un sistema de primer orden con retardo.

El diseño se realiza fuera de línea en forma automatizada en una computadora personal y puede ser implantado directamente en una plataforma digital de grado industrial para su aplicación a un proceso real [1]. Así, como un primer paso para su aplicación en el control en tiempo real de unidades turbogás, se presentan los resultados de la evaluación de la robustez del desempeño del controlador.

Las pruebas consisten en evaluar la respuesta del sistema ante variaciones en rango amplio de los parámetros del proceso, los cuales incluyen la ganancia, el retardo y la constante de tiempo. También se evalúa el efecto de perturbaciones determinísticas y estocásticas en la señal de control, la variable manipulada y la variable controlada.

El controlador PI neurodifuso se encuentra en un lazo de control para su análisis en un ambiente de simulación desarrollado en una plataforma de computadora personal usando el ambiente de programación Matlab/Simulink que puede ser personalizado para la ejecución de diversas pruebas que permiten sintonizar y analizar el sistema de control. En la Fig. 1. 1 se presenta el diagrama de un sistema de primer Durante el desarrollo e implantación de Sistemas de Control Distribuido para Centrales de Ciclo Combinado Gómez Palacio (SCD-GP) de la Comisión Federal de Electricidad [2, 3] se han detectado varias necesidades y oportunidades de desarrollo tecnológico. Una de las más importantes y apremiantes es la del mejoramiento de las estrategias de control de potencia, velocidad y temperatura de las unidades turbogás. En gran parte esto se debe a que las unidades turbogás se caracterizan por operar a temperaturas, presiones y velocidades relativamente más altas que las de cualquier otro tipo de unidades, lo cual se traduce en mayores y más estrictos requerimientos para el sistema de control a fin de obtener una operación segura y rentable [4]

Actualmente, los sistemas de control de unidades turbogás están basados en algoritmos de control convencionales del tipo PI (Proporcional e Integral) La idoneidad de este tipo de controladores para tareas de regulación ha sido ampliamente probada. Sin embargo su uso para el control de velocidad durante el arranque, o para el control de potencia en todo el rango de generación de una unidad turbogás, plantea serios cuestionamientos, ya que el desempeño de la unidad puede ser afectado adversamente debido a la no linealidad de la dinámica del proceso, la cual cambia conforme al punto de operación. A pesar de ello el uso de los controladores se ha prolongado por mucho tiempo debido a su sencillez y a que estrictamente, no se requiere de un modelo matemático del proceso para su diseño y ajuste. La importancia de este último hecho no puede menospreciarse, ya que la dificultad de contar con modelos matemáticos precisos del proceso es una de las causas fundamentales para que no se haya generalizado la aplicación de estrategias de control moderno.

Una alternativa atractiva para mejorar el desempeño de las unidades turbogás es el empleo de técnicas de Inteligencia Artificial para el control de procesos, las cuales podrían superar algunas de las desventajas del control moderno y permitirían satisfacer requerimientos más sofisticados que con el control convencional. Específicamente resulta de interés investigar la aplicabilidad del control basado en lógica difusa, para el cual se han reportado múltiples aplicaciones exitosas en otras áreas industriales.

En el Instituto de Investigaciones Eléctricas, el desarrollo de controladores difusos para unidades turbogás se inició en 1993 [5], en donde se rediseñó la programación del sistema de control para la unidad turbogás W501 y se incorporó un controlador difuso de velocidad en tiempo real para el arranque de la turbina de gas [6,7] Posteriormente este trabajo fue continuado y extendido al control de la potencia generada [8,9] En ambos casos los resultados obtenidos fueron exitosos y constituyen una base sólida para el uso de controladores difusos en una unidad turbogás real.

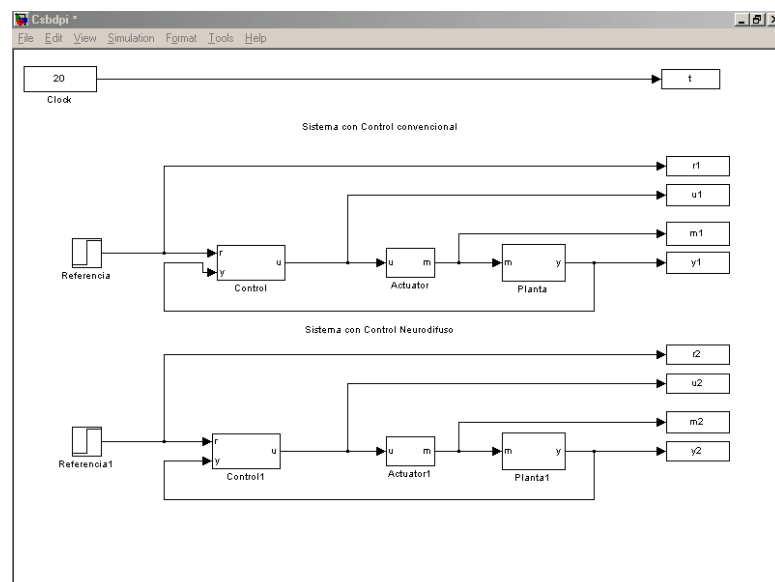
Sin embargo, desde un principio fue patente la dificultad para obtener la base de reglas y los parámetros de los diversos elementos del sistema de inferencia difuso embebido en el controlador.

Para solucionar esta problemática y automatizar lo más posible el diseño del sistema de sintonización basado en redes neuronales, el cual primeramente se aplicó a controladores PI convencionales [10], y en una segunda etapa a la sintonización de un controlador difuso [11,12] El enfoque de este último trabajo consistió en desarrollar un sistema que proporcionara los parámetros que definen las variables lingüísticas del controlador usando un algoritmo de aprendizaje de redes neuronales. El conjunto formado por la red neuronal y el sistema difuso del controlador es un sistema de tipo cooperativo en donde ambos componentes son aplicaciones independientes; la red neuronal le comunica los resultados de aprendizaje al sistema difuso.

Debido a las dificultades encontradas con el sistema neuro-difuso cooperativo, se planteo el desarrollo de un controlador neuro-difuso en donde se conjuguen en un solo sistema híbrido las ventajas de las redes neuronales y los sistemas de inferencia difusos, de tal manera que el procedimiento de aprendizaje de los parámetros del controlador difuso se lleve a cabo en una forma directa y más simple.

En este artículo se presenta un controlador digital basado en un sistema de inferencia neuro-difuso que puede ser diseñado fuera de línea en forma automatizada y se demuestra su factibilidad basada en la evaluación de robustez de desempeño, como un primer paso a su aplicación en el control de unidades turbogás. La evaluación se hace mediante simulaciones extensivas, aplicando el controlador a un sistema de primer orden con retardo. Las pruebas incluyen variaciones en rango amplio de la ganancia, retardo y constante de tiempo del proceso. También se evalúa el efecto de perturbaciones determinísticas y estocásticas en la señal de control, la variable manipulada y la señal controlada. Los resultados obtenidos demuestran la factibilidad de utilizar el controlador neurodifuso en aplicaciones reales.

Figura 5.1 Sistema de control PI convencional y sistema de control PI neurodifuso



El proceso por controlar es simulado con un modelo de primer orden con retardo:

$$G(s) = \frac{K_{dc} - e^{t_d s}}{\tau s + 1} \quad (1)$$

en donde K_{dc} es la ganancia en estado estable, t_d es el retardo en el tiempo, τ es la constante de tiempo, y s es la variable de Laplace. Los valores nominales de estos parámetros son:

$$K_{dc} = 2.0$$

$$t_d = 0.4 \text{ sec}$$

$$\tau = 4.0 \text{ sec}$$

Figura 5.2 Control PI convencional

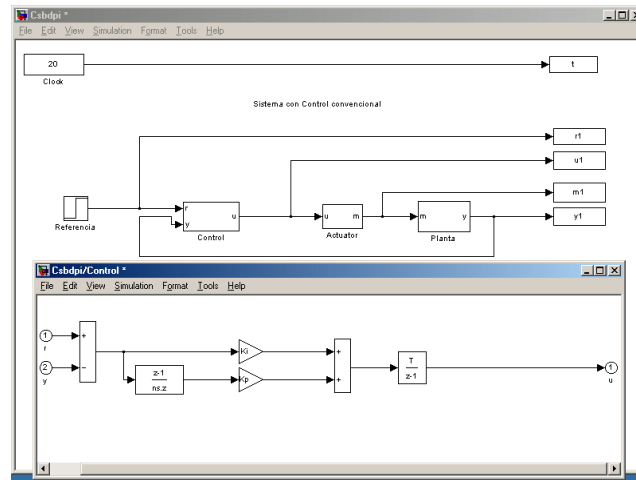
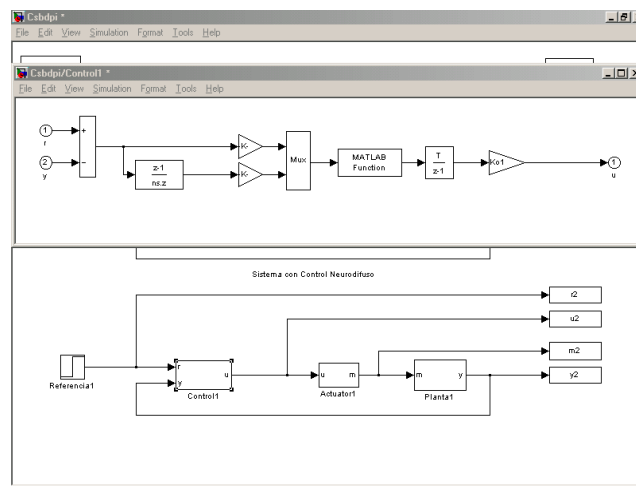


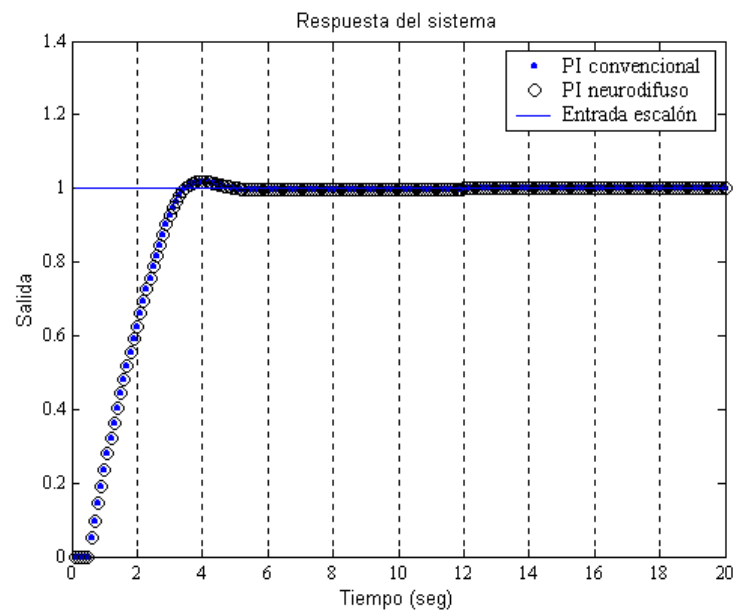
Figura 5.3 Control PI neurodifuso



Las Fig. 5.2. y 5.3. muestran los diagramas de bloques de los controladores implementados para realizar las pruebas de desempeño.

La respuesta de los dos sistemas se muestra en la Fig. 5.4 en donde se observa la respuesta ante una entrada escalón unitario con un control PI convencional y con un control PI neurodifuso.

Figura 5.4 Respuesta del control PI convencional y PI neurodifuso.



A fin de determinar las características de robustez en el desempeño del controlador PI neurodifuso se llevaron a cabo varias pruebas en dos conjuntos.

En el primer conjunto de pruebas se evalúa la robustez del controlador PI neurodifuso ante cambios en los valores de los parámetros de la planta. Y se realiza la medición del índice de desempeño IAE (integral del valor absoluto del error):

$$IAE = \int_0^t |r - y| dt \quad (2)$$

En el segundo conjunto de pruebas se sometió al lazo de control a perturbaciones estocásticas y determinísticas en las señales más importantes. En ambos conjuntos de pruebas se evaluaron varios índices de desempeño evaluados durante la respuesta a un cambio en escalón en la señal de referencia. Aquí solamente se presentan los resultados obtenidos con el índice IAE definido.

Las Fig. 5.5, 5.6 y 5.7 muestran el desempeño del controlador cuando los parámetros del modelo, ganancia en estado estable, tiempo de retardo y constante de tiempo, respectivamente, se hicieron variar en un rango desde el 50% hasta el 200% de su valor nominal, el cual es un rango de variación muy amplio, más allá de lo razonablemente esperado en una aplicación real, que se reporta aquí solo con fines ilustrativos del desempeño en condiciones extremas. Como puede observarse, el desempeño en la vecindad de los valores nominales solamente presenta una variación suave, lo cual es esperado en una aplicación real.

Figura 5.5 Desempeño ante variaciones en la ganancia

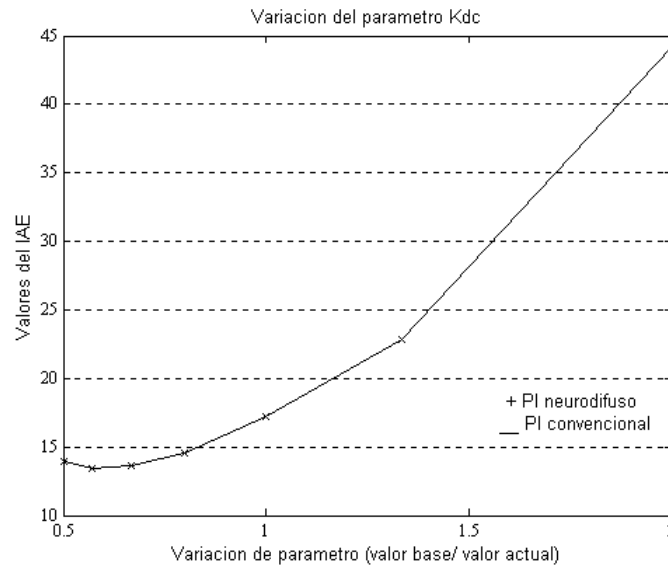


Figura 5.6 Desempeño ante variaciones en el tiempo de retardo

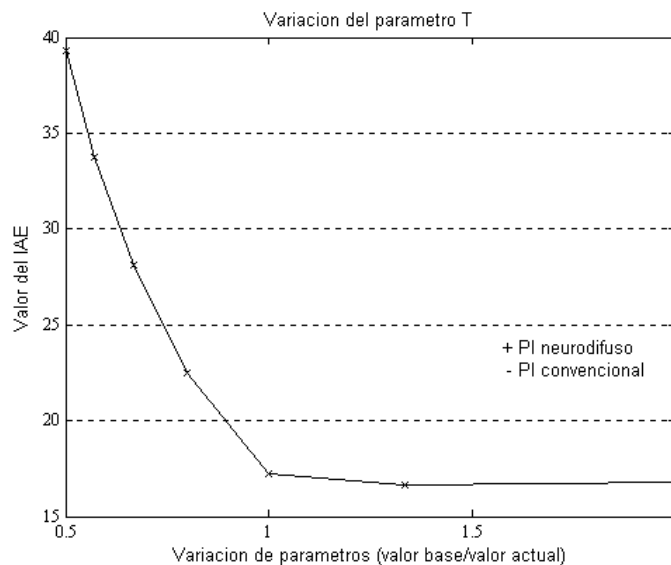
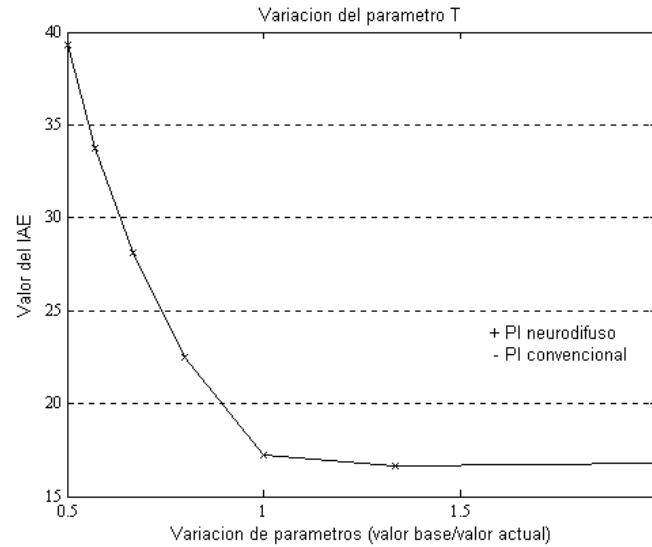


Figura 5.7 Desempeño ante variaciones en la constante de tiempo

Las Fig. 5.8 presenta el desempeño del lazo de control sujeto a perturbaciones aditivas aleatorias en las señal de control u y en la señal de salida de la planta y , respectivamente. De nueva cuenta el desempeño del controlador presenta variaciones suaves en un gran rango. La Fig. 5.9 muestra el desempeño ante un cambio de carga en la señal de salida de la planta, simulado mediante la adición de un escalón a los 10 segundos de simulación. De estas pruebas puede verse que el controlador posee buenas características de rechazo a perturbaciones, tal y como es deseable en una aplicación real.

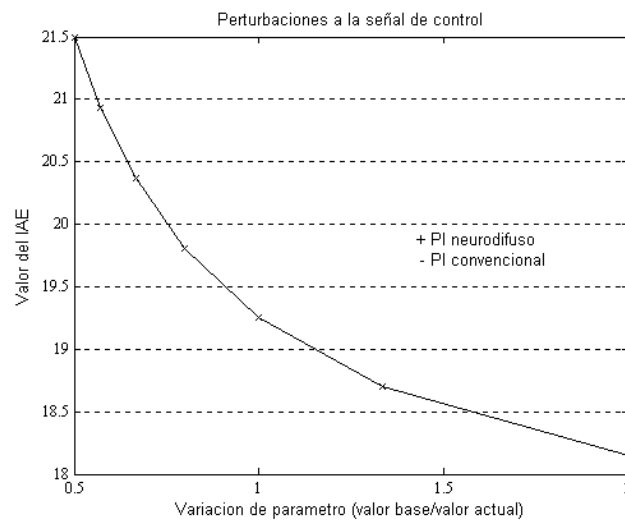
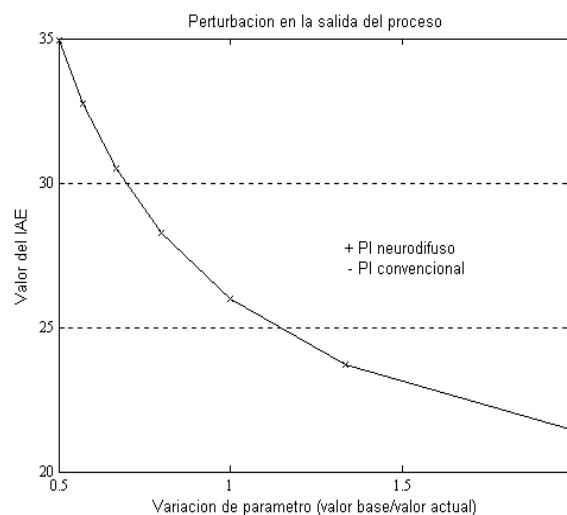
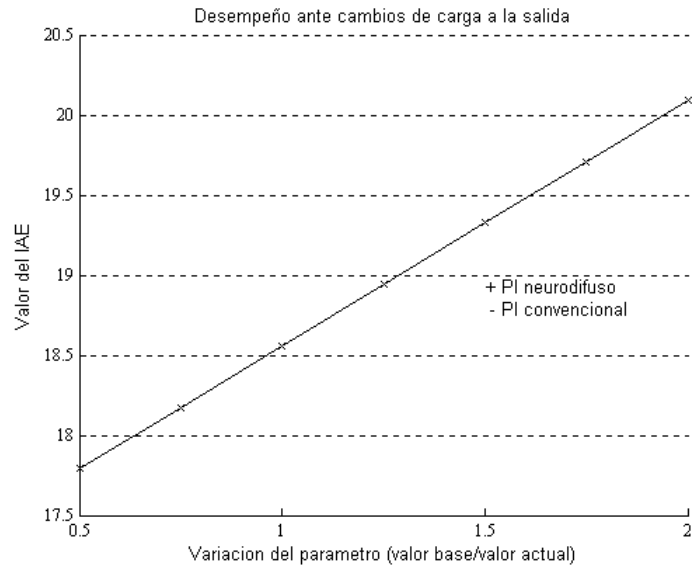
Figura 5.8 Desempeño ante ruido en la señal de control**Figura 5.9** Desempeño ante ruido en la salida del proceso

Figura 5.10 Desempeño ante cambios de carga a la salida

Las Fig. 5.11 a 5.14 muestran la respuesta del sistema utilizando tanto el controlador PI digital convencional (trazo continuo), como el controlador digital neurodifuso (trazo estrellado). En cada figura se muestran dos casos de respuesta típicos, con el objeto de ilustrar un conjunto más amplio de casos de prueba, los cuales demuestran la equivalencia del comportamiento del lazo de control usando ambos controladores.

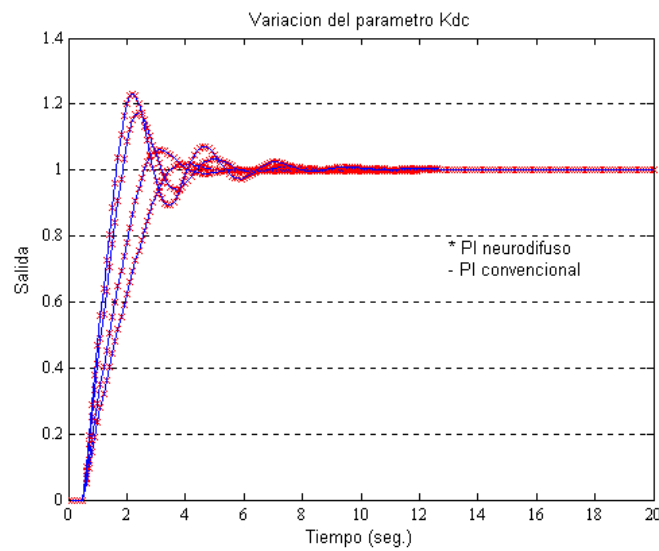
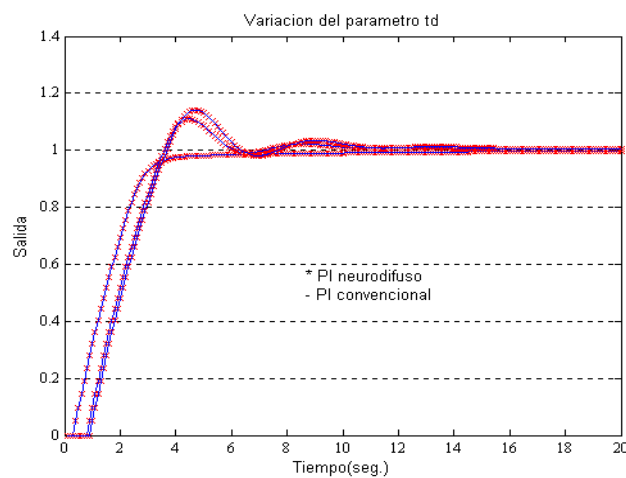
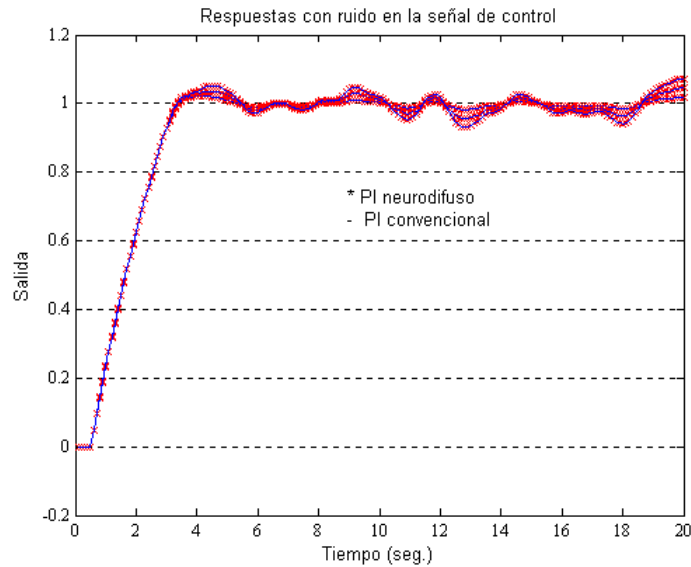
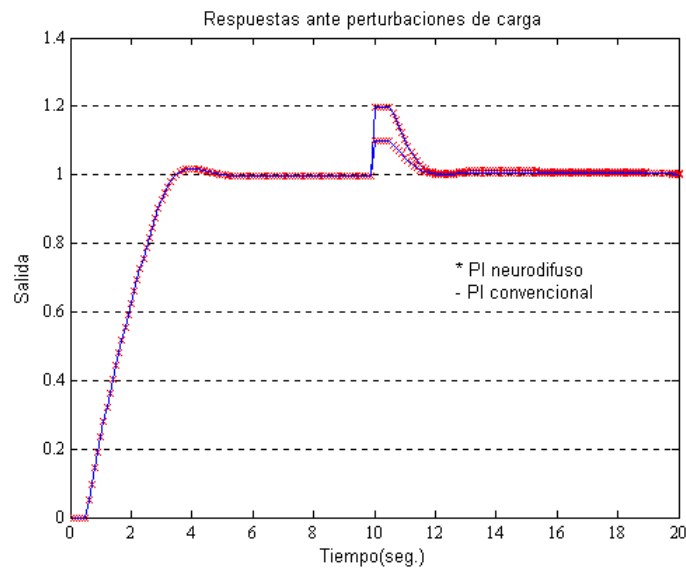
Figura 5.11 Respuesta ante variaciones en la ganancia.**Figura 5.12** Respuesta ante variaciones en el tiempo de retardo.

Figura 5.13 Respuesta con ruido en la señal de control.**Figura 5.14** Respuesta ante perturbaciones de carga.

5.1 Agradecimiento

Este trabajo fue apoyado por el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, SEPI-ESIME y el CONACYT.

5.2 Conclusiones

En esta primera parte de pruebas se puede concluir que el controlador PI neurodifuso emula la dinámica de un controlador PI convencional en configuración de velocidad. El sistema de inferencia difuso incluido en el controlador es del tipo TSK de primer orden implementa un mapeo $R2 \rightarrow R$, de la señal de error y su razón de cambio a la diferencial de la señal de control. El diseño del sistema de inferencia difuso se lleva a cabo fuera de línea empleando el método ANFIS con patrones de aprendizaje obtenidos de las entradas y la salida de un controlador PI convencional.

Los resultados obtenidos en las pruebas de análisis de robustez muestran que el controlador PI neurodifuso posee buenas características de desempeño, lo cual demuestra la factibilidad de emplearlo en el mismo tipo de aplicaciones que un controlador PI convencional mediante una sustitución directa. Demostrándose finalmente la factibilidad de utilizarlo en aplicaciones reales cuyos rangos de incertidumbre y variación son mucho menores a los evaluados en este caso de estudio.

Después de la demostración de factibilidad del controlador PI neurodifuso, reportada en esta primera parte de pruebas se tiene planeada su utilización para el control de la velocidad durante el arranque y el control de potencia generada de una unidad turbogás, en donde se tendrá en cuenta la disponibilidad de un gran número de parámetros para mejorar el rendimiento de la unidad bajo índices de desempeño específicos.

5.3 Referencias

Benavente, J. C. (2020). Solar Matienzo: estudio sobre la factibilidad y propuesta de instalación de un sistema de generación solar fotovoltaico en la Base Matienzo-Antártico.

Chávez, R. y Delgadillo, M.A. (1990). Modernization of a computer control system in a combined cycle power plant. Proceedings ISA 90. Nueva Orleans, E.E.U.U. Vol. 4, págs. 165-170.

Chávez, R. y Díaz, R. (1993). Upgrading of a computer control system in a combined cycle power plant. Proceedings Power-Gen Americas '93. Dallas, E.E.U.U. Vol. 12-13, págs. 56-62.

Chávez, R. y Gómez, O. (1995). Sistemas de control distribuido en plantas de ciclo combinado. Boletín IIE. Vol. 19, No. 2, págs. 47-51.

Garduño, R. y Sánchez, M. (1995). Control system modernization: turbogás unit case study. Symposium on Control of Power Plants and Power Systems. Cancún, México. Vol. 2, págs. 245-250.

García, C.D. (1997). Control Digital de Unidades Turbogás. Tesis de Maestría. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Cuernavaca, México.

García, C.D. y Garduño R. (1997). Gas turbine fuzzy speed control. Proceedings 2nd Joint Mexico-USA International Conference on Neural Networks and Neurocontrol. Sianka'an, México.

Pat, M. y de Lara, S. (1999). Sintonización con redes neuronales de un controlador PID. Aplicación a una unidad tubogás. Información Tecnológica. Vol. 10, No. 6, págs. 25-32.

Ramírez, G.M. (1996). Modernización del Control de Velocidad, Potencia y Temperatura de una Unidad Turbogás. Tesis de Licenciatura. Instituto Politécnico Nacional. D.F, México.

De Lara, S. y Martínez, M.A. (1999). Desarrollo del sistema para la sintonización de controladores difusos usando redes neuronales artificiales. IIE reporte interno. No. 11500INDT (A5)01.03. Cuernavaca, México.

Sánchez, M. y Bahamaca L. (1999). Realización de controladores lógicos difusos para el control de procesos en tiempo real: especificación y diseño. Memorias 2o. Encuentro Nacional de Computación. Pachuca, México.

Sánchez, M. y Bahamaca L. (2000). Speed and load fuzzy control for gas turbines. Proceedings 1 st. ISA POWID/EPRI/DOE Joint Controls and Instrumentation Conference. Snt. Antonio U.S.A. Vol. 1, págs. 2180-2185.

Capítulo 6 Biosíntesis de Nano Partículas Metálicas

Chapter 6 Biosynthesis of Nano Metallic Particles

LOZANO-CAMARGO, Maria Luisa†*, LORENZILLA-GARCÍA, Jatziri, GALICIA-LUIS, Laura y BARRERA-CALVA, Enrique

*Tecnológico de Estudios Superiores del Oriente del Estado de México
Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa*

ID 1^{er} Autor: *Maria Luisa Lozano-Camargo*/ORD ID: 0000-0002-0777-6392, CVU CONACYT ID: 46638

ID 1^{er} Coautor: *Jatziri Lorenzilla-García*/ ORD ID: 0000-0001-5406-872X

ID 2^{do} Coautor: *Laura, Galicia-Luis* / CVU CONACYT ID: 120121

ID 3^{er} Coautor: *Enrique, Barrera Calva*/ ORD ID: 0000-0002-3041-5552

DOI: 10.35429/H.2020.8.69.85

M. Lozano, J. Lorenzilla, L. Galicia y E. Barrera

maria.lozano@tesoem.edu.mx

A. Marroquín, J. Olivares, L. Cruz y A. Bautista. (Coord) Ciencias ambientales, uso de recursos. Handbooks-©ECORFAN-Mexico, Querétaro, 2020.

Resumen

En las últimas décadas se han incrementado las investigaciones sobre nuevos métodos de síntesis de nanopartículas metálicas, que sean capaces de cubrir las demandas actuales de energía, economía y medio ambiente. La síntesis de nanopartículas de óxidos de manganeso (**MnO**), los cuales son favorables para su uso en “capacitores eléctricos”, dadas sus particularidades ópticas, físicas y químicas, así como su gran capacidad para almacenar grandes cantidades de energía de ahí el nombre de “capacitores”. En este trabajo se empleó un método de síntesis verde de nanopartículas de óxidos de zinc (**ZnO**) y óxidos de manganeso (**MnO**) presentes en los residuos de las pilas zinc-carbón, empleando la biomasa del Lirio Acuático (*Eichhornia Crassipies*) como agente biorreductor, se seleccionó el lirio por las características que esta planta presenta en la acumulación de metales y su empleo para eliminar metales pesados en las plantas de tratamiento de agua, los nanometales obtenidos, fueron analizados mediante las técnicas de difracción de Rayos X (DRX) y microanálisis por energía dispersiva de rayos X (**EDX**) con el Microscopio de Transmisión de Electrones (**TEM** por sus siglas en inglés); que también permite micrografías para identificar su estructura y tamaño obtenido.

Síntesis Nano partículas, óxidos de manganeso, óxido de zinc, pilas zinc-carbón, lirio acuático

Abstract

In recent decades, research has increased on new methods of synthesis of metallic nanoparticles, which are capable of meeting current energy, economic and environmental demands. The synthesis of nanoparticles of manganese oxides (MnO), which are favorable for use in "electrical capacitors", given their optical, physical and chemical characteristics, as well as their great capacity to store large amounts of energy, hence the name of "Capacitors". In this work, a green synthesis method of nanoparticles of zinc oxides (ZnO) and manganese oxides (MnO) present in the residues of zinc-carbon cells was used, by means of using the biomass of the Water Lily (*Eichhornia Crassipies*) as a bio-reducing agent, the lily was selected for the characteristics that this plant presents in the accumulation of metals and its use to eliminate heavy metals in water treatment plants, the obtained nanometals were analyzed by means of X-ray diffraction, DRX, and X-ray energy dispersive spectroscopic (EDX) microscope techniques. Transmission System (TEM) to identify its structure and size was also used.

Synthesis Nano particles, manganese oxides, zinc oxide, zinc-carbon batteries, water lily

6. Introducción

En los últimos años los nanomateriales han sido de gran interés para la comunidad científica-tecnológica por presentar propiedades físicas, químicas, electrónicas y magnéticas diferentes a sus estructuras macroscópicas; sus dimensiones se encuentran en un rango de la nanoescala (inferior a 100 nanómetros), cuentan con una mayor área superficial, haciendo más activo a éstos materiales, sus efectos cuánticos pueden producir cambios significativos en sus propiedades en comparación con sus análogos en volumen. En esta escala, los cambios cualitativos en las propiedades fisicoquímicas y la reactividad están ligadas al número de átomos o moléculas que forman el material, permitiendo observar el efecto del tamaño en fenómenos tales como: la resonancia de plasmón (es un cuanto de oscilación del plasma; es decir, la cuasipartícula que resulta de las oscilaciones del plasma) superficial (RPS) en las nanopartículas metálicas, el confinamiento cuántico en partículas semiconductoras y el superparamagnetismo en nanomateriales magnéticos (**Roudner, 2006; Jun, et col., 2007**); En el siglo XIX Faraday realizó trabajos de síntesis y estudios las propiedades ópticas de las nanopartículas (**Faraday, 1857**).

En 1959 surge el concepto de nanociencia, en la conferencia de Richard Feynman titulada “There’s a Plenty of Room at the Bottom” donde planteó la idea de una nueva ciencia basada en la manipulación individual de átomos y moléculas mediante un nuevo camino, abriendo paso al mundo de la multidisciplinariedad; no fue hasta 1974 que el término “nanotecnología” fue reconocido por Norio Taniguchi (Tokio Science University), como la separación, deformación de la materia a nivel atómico y molecular (**N. Taniguchi, et. Col., 1974**). Desde entonces se marca una nueva era en el avance científico-tecnológico.

Los científicos han desarrollado diversos estudios con la finalidad de establecer métodos seguros y reproducibles en la síntesis y fabricación de estos materiales controlando su tamaño, forma y estructura. La Agencia del Medioambiente de los EE.UU. clasifico a los nanomateriales basados en carbono en cuatro tipos los que presentan forma elipsoidal o esférica se conocen como fullerenos, los cilíndricos son nanotubos; los puntos cuánticos basados en metales de oro, plata y óxidos metálicos. La síntesis de nanopartículas se emplea con la finalidad de crear a nano escala estructurales de cadenas poliméricas largas como el ADN, para diseño de sensores automáticos que son empleados en diagnósticos y terapias de diversas enfermedades (cáncer, glucosa, etc.), así como para la fabricación de motores moleculares con polímeros inteligentes, biosensores y bio-sondas, etc.

Las nanopartículas se encuentran presentes en la vida cotidiana y procesos industriales, en su conjunto son esenciales en la nanociencia y la nanotecnología; los nanomateriales se han empleado de manera impresionante en el campo de la electrónica, óptica, la industria alimenticia, textil, cemento, plástico, y en la medicina Zarría y. Col. Realizaron una investigación de los efectos de las nanopartículas de ZnO, SiO₂ y TiO₂ sobre la expresión génica de las interleuquinas 3 (IL-3) y 7 (IL-7) y el efecto estimulante de colonias de granulocito-macrófago (GMCSF), moléculas producidas en la MOR y otros grupos celulares. La síntesis de nanomateriales es empleada también para establecer métodos de biorremediación de desechos radiactivos (Uranio), en efectos antibacteriales y en la óptica no lineal. Estudios realizados con la magnetita y los materiales a base de silicio mostrando buenas propiedades eléctricas por lo que pueden ser usados en el sector energético, emplearon para ello, 5 ratones aplicándoles dosis que iban de 0.5 a 10 mg de SiO₂ y ZnO y de 5 a 25 mg de TiO₂ empleando como electrolito soporte una solución salina las cuales fueron inyectadas vía intraperitoneal, posteriormente fueron sacrificados para su extracción de médula ósea roja a partir de los huesos largos de patas anteriores y posteriores, logrando con ello, incrementar el conocimiento de los efectos perjudiciales de dichas partículas exponiendo a la médula ósea roja como un tejido adecuado para este tipo de evaluaciones y a los genes seleccionados como marcadores idóneos para la trazabilidad de estos efectos (**Jacquelyne et. Col., 2017**).

Serrano et. col. realizaron la optimización y síntesis de AUNPs empleando *Hypericum perforatum* y evaluando la actividad antimicrobiana combinando tratamientos biológicos y físicos, la extracción de *Hypericum perforatum* (HP) les permitió tener compuestos reductores y estabilizadores en la síntesis de partículas de oro a nanoescala, siendo una alternativa libre de materiales peligrosos o tóxicos, el emplear HP como biocatalizadores junto con el método por microondas es una ventaja ya que reduce la síntesis a 10 segundos en comparación con otros métodos biológicos (**Serrano et. col, 2020**).

Existe también diversos procedimientos que ofrecen grandes posibilidades para su aplicación a nivel industrial, al utilizar bacterias para la formación de cristales cuánticos semiconductores, al igual que inmovilizando sustancias bioactivas como enzimas, anticuerpos, ADN y ARN. (**Perdigón, 2010**). Una de las aplicaciones interesantes son las nanopartículas de óxido de hierro (FeO) ya que presentan propiedades muy interesantes en nano-medicina por ser ampliamente biocompatibles, además de contar con propiedades magnéticas y eléctricas aplicables en la nanoelectrónica.

Las nanopartículas de Ti/Ni presentan propiedades interesantes a escala nano, investigaciones realizadas por **Schabes et col.** indican que éstas pueden ser empleadas como recubrimientos anticorrosivos, catalizadores y con una gran posibilidad utilizarse en materiales inteligentes o como memorias (**P.S. Schabes et col., 2006**); las nanopartículas de Pt/Pd tienen propiedades catalíticas muy eficientes (**R. Herrera-Becerra, at col. 2008**); así como las nanopartículas de Eu-Au son factibles para su empleo en el control nuclear, sensores ópticos, medicina nuclear y sobre todo en fotónica, las nanopartículas de Yb pueden emplearse en dispositivos ópticos y fotónicos logrando grandes avances en estos campos de la ciencia rompiendo así barreras preestablecidas (**Ascencio et col. 2004**); las nanopartículas de Sm presentan tamaños nm con buenos efectos cuánticos, momento magnético muy alto (5m_B), colocando a estos materiales como nuevos magnetos permanentes de gran capacidad que los actuales, además de presentar propiedades catalíticas interesantes.

6.1 Tipos de síntesis de nanometales

Los métodos de síntesis de nanopartículas suelen agruparse en dos categorías:

- from top to bottom

Consiste en dividir el sólido másico en proporciones más pequeñas, mediante la molienda o el desgaste, empleando métodos químicos o la volatilización de un sólido seguido por la condensación de los componentes volatilizados. **(Baylon, 2015).**

Existen varios métodos que utilizan la aproximación de <from top to bottom> los más utilizados son:

a) La evaporación térmica

Consiste en calentar el material que se pretende precipitar hasta que este comience a evaporarse, para lo cual se utiliza una cámara de vacío en la que se condensa el vapor sobre una lámina fría y se mantiene un control preciso de las condiciones de crecimiento para evitar modificaciones en la morfología de la capa depositada.

b) Deposito químico en fase vapor

Consiste en la descomposición de uno o varios compuestos volátiles, en el interior de una cámara de vacío (reactor), cerca de la superficie de un sólido para obtener la formación de un material en forma de capa delgada o de nanopartículas.

c) Preparación de clusters gaseosos

Emplea un láser de alta potencia que produce vapores atómicos metálicos los cuales son acarreados en un gas inerte y posteriormente son depositados en un óxido monocristalino u otro sustrato, bajo condiciones de ultra-alto vacío.

d) Implantación de iones

Consiste en la implementación de iones de un material en un sólido, modificando las propiedades físicas y químicas del sólido debido a que el ion implantado por ser un elemento distinto al que lo compone, causar cambios estructurales en el sólido implantado.

e) Molienda de partículas de tamaño macro o micrómetro

Se emplean molinos de alta eficiencia para obtener partículas de macro o micrométricas las cuales son clasificadas por métodos físicos, con la finalidad de recuperar las de tamaño micrométrico **(Boldyrev, 2006).**

– bottom up

Consiste en la fabricación de nanopartículas a través de la condensación de átomos o entidades moleculares en una fase gaseosa o en solución. Este último enfoque es mucho más utilizado. **(Wachs, 2001).**

Los métodos que más se emplean en la aproximación bottom up, son aquellos que utilizan procedimientos químicos. Los cuales inician con la reducción de los iones, metálicos a átomos metálicos, seguido por la agregación controlada de estos átomos. Ya que este método permite obtener nanopartículas uniformes y pequeñas. Los métodos más empleados son:

a) Método coloidal

Consiste en disolver una sal del precursor metálicos o del óxido a preparar, un reductor y un estabilizante en una fase continua o dispersante (un líquido). El agua puede emplearse como reductor, estabilizante o ambos. En principio el tamaño promedio, la distribución de tamaños y la forma o morfología de las nanopartículas se pueden controlar mediante variaciones en la concentración de los reactantes, del agente reductor y del estabilizante, así como la naturaleza del medio dispersante. **(Faraday, 1957)**

b) Reducción fotoquímica y radioquímica

Es la síntesis de nanopartículas metálicas, se modifica el sistema químico mediante altas energías la cual está asociada con la generación de reductores fuertes altamente activos con electrones, radicales y especies excitadas. La reducción fotoquímica (fotólisis) y la radiación-química (radiólisis) difieren en el nivel de energía utilizado. La síntesis fotoquímica se caracteriza por energías por debajo de 60 eV, mientras que la radiólisis utiliza energías de 103-104 eV. Los métodos de reducción fotoquímica y radioquímica tienen como ventaja sobre el método de reducción química la ausencia de impurezas formadas cuando se usan agentes reductores químicos. Estos métodos producen nanopartículas de alta pureza. Además, la reducción fotoquímica y radioquímica permiten producir nanopartículas en condiciones de estado sólido y a bajas temperaturas. (**Ershov, 1997**).

c) Irradiación con microondas

La técnica de irradiación con microondas produce nanopartículas con una muy baja dispersión de tamaño, aunque no siempre se logre un control preciso en la morfología. Las microondas actúan como campos eléctricos de alta frecuencia, capaces de calentar cualquier material conteniendo cargas eléctricas como las moléculas polares en un disolvente o iones conductores en un sólido. Los solventes polares se calientan y sus componentes moleculares se ven obligados a girar con el campo y pierden energía en colisiones. Las muestras conductoras y semiconductoras se calientan cuando los iones y los electrones contenidos en ellas forman una corriente eléctrica y la energía se pierde debido a la resistencia eléctrica del material. (**Zhu et al., 2004**)

d) Utilización de Dendrimeros

La síntesis de nanopartículas también se ha llevado a cabo usando micelas, emulsiones y dendrimeros como nanorreactores que permiten la síntesis de partículas de forma y tamaños definidos. Esto se logra alterando la naturaleza de los dendrimeros. Los dendrimeros son moléculas altamente ramificadas, las que incluyen un núcleo central, unidades intermediarias repetitivas y grupos funcionales terminales (**Muzafarov y Rebrov, 2000**).

e) Síntesis solvotermal

En este se agrupan una serie de técnicas en las que un precursor metálico disuelto en un líquido, en recipiente cerrado, se calienta por encima de su punto de ebullición, lo que genera una presión superior a la atmosférica, el líquido habitual es agua, aunque cada vez se van utilizando con mayor frecuencia otros medios líquidos como: disolventes orgánicos, amoníaco líquido, hidracina, etc. Lo cual da a la síntesis solvotermal gran versatilidad. En este tipo de técnicas los tiempos de reacción son largos.

f) Método sol-gel

Es un proceso químico en fase húmeda ampliamente utilizado en la ciencia de los materiales. Este método se utiliza principalmente para la fabricación de nanomateriales. Se parte de una solución química o sol que actúa como precursor de una red integrada ya sea de partículas discretas o de una red de polímeros. Los precursores típicos son los alcóxidos y los cloruros metálicos, que sufren varias reacciones de hidrólisis y policondensación para formar una dispersión coloidal, que luego de una polimerización lenta forma un gel, precursor de los compuestos deseados. (**Baylon, 2015**)

6.2 Biosíntesis de nanopartículas metálicas

Hoy en día se han desarrollado diversos métodos para la síntesis de materiales a escala nanométrica con un control sobre la forma y tamaño de las nanopartículas suficientemente bueno para ser empleadas en diversas aplicaciones, sin embargo, la mayoría de los métodos de síntesis son costosos y agresivos con el medio ambiente (**Frederix et, col., 2003**)

En la búsqueda de tecnologías amigables con el medio ambiente se ha permitido el desarrollo de investigación dirigida hacia lo que hoy en día se define como “Síntesis verde o biosíntesis”. El procedimiento de la biosíntesis de nanopartículas involucra la reacción del extracto vegetal con soluciones acuosas. (**Baylón, 2015**)

Dicho método de biosíntesis o bio-reducción se reporta como una tecnología auto-sostenida, donde la biorremediación y la producción de partículas de metal están relacionadas. El uso de estos métodos o técnicas auto sostenibles abren las posibilidades de ser utilizado con otros elementos y plantas. **(Yu et col., 2004)**

El uso de los métodos de química verde cada vez es más importante, en particular, para la obtención de nuevos materiales a escala manométrica de metales y semiconductores, cabe señalar que en la actualidad es posible incluir el uso de compuestos de origen biológico, como reductores y estabilizadores para la síntesis de nanoestructuras. Y se han reportado múltiples trabajos sobre la producción de pequeñas partículas de metal mediante el uso de bio-masa con ayuda de hongos, hierba de limón, geranio de tamarindo, de árbol de neem, entre otras plantas. **(Yu et col., 2004)**.

En el caso específico de la síntesis de nanopartículas metálicas, se ha dirigido al uso de diferentes organismos como: bacterias o hongos, así como de plantas y sus extractos donde sus componentes participan como agentes biológicos en las reacciones de reducción y formación de nanopartículas metálicas. **(Baylon, 2015)**.

El titanio un material de gran biocompatibilidad en los tejidos y huesos ya que permite el crecimiento de manera ordenada aun en contacto con las contingencias biofuncionales (infecciones por acumulación de placa bacteriana), estos implantes proporcionan propiedades antibacterianas y antifúngicas, la síntesis e inmovilización de nanopartículas de plata (AgNPs) sobre sustratos de titanio poroso con potencial osteointegrable por silanización, funcionalizando el titanio al adicionar moléculas orgánicas microrugosas, permite obtener sustratos modificados superficialmente **(Gaviria et. col., 2019)**.

Entre los principales metabolitos que tienen propiedades reductoras se encuentran los compuestos fenólicos como el ácido gálico, ácido benzoico y ácido cafeico entre otros, que están presentes en algunas plantas. **(Seung, Choi y J. Hwang, 2006)**.

Así por ejemplo se han obtenido nanopartículas de oro y plata a temperatura ambiente utilizando ácido gálico, un metabolito presente en algunos vegetales. **(Karuvath, et col., 2007)**; también se ha llevado a cabo la síntesis de nanopartículas de oro por medio de un procedimiento sencillo empleando extracto de nopal (*Opuntia ficus-indica*) como agente reductor. **(Baylón, 2015)**. La hoja de Té Negro, la cual es extremadamente eficiente en cuanto a biosíntesis debido a que lleva una rápida formación de nanopartículas estables de diferentes morfologías: esferas, trapezoides, prismas y varillas, utilizando tres diferentes soluciones acuosas de extractos derivados de las hojas del Te Negro para la síntesis de oro y plata. **(Ara et al., 2009)**.

Plantas como la de alfalfa es una de las más usadas para la reducción de iones de plata, donde la caracterización por TEM muestra una variedad de formas de las nanopartículas a través de esta biosíntesis, también en *Capsicum annum* se reporta la formación de las estructuras metálicas con un tamaño de 20 nm, en un tiempo de reacción de 9hrs y de 40 nm en 13 hrs, la forma que se presenta es esférica. **(Romero, 2014)**. Ledezma et al., sintetizaron nanopartículas de plata (AgNPs), utilizando extracto acuoso de nopal como agente bioreductor en presencia de polímeros biocompatibles solubles en agua poli (vinil alcohol) [PVA] como agente de estabilización de las nanopartículas. **(Baylón, 2015)**.

Las *Prosopis juliflora* Sw (mezquite) y *Pluchea 74ericea* Nutt (cachanilla) son plantas con la capacidad de generar metabolitos secundarios biológicamente activos susceptibles de convertirse en fitonanopartículas (fitoNPs) metálicas que aumentan su potencia y espectro biológico, ya que los compuestos presentes en los extractos acuosos del mezquite y cachanilla son capaces de transformarse en fitonapartículas estables de cobre y zinc, empleando técnicas de síntesis verde utilizando disoluciones de CuSO_4 y ZnSO_4 respectivamente, las fitoNPs de mezquite presentan un tamaño de partículas metálicas de Cu y Zn de 33.8 y 51.25 nm respectivamente vs 68 y 53.4 nm las de cachanilla, presentando una formas elipsoidales y esféricas de las fitoNPs en presencia de cobre y formas irregulares por la interacción del Zn, el estudio realizado de la actividad biológica demostró las fitoNPs-Zn presentaron mayor efecto insecticida, incluyendo daño celular y mortalidad sobre *Phenacoccus solenopsis*, seguidas de las fitoNPs-Cu de esta planta, pero sin mortalidad.

Dichos resultados alientan a continuar explorando las propiedades biológicas y químicas de fitonanopartículas botánicas de estas y otras especies nativas (**Jiménez, 2020**).

Como se muestra todos estos procesos biológicos son limpios en comparación con procesos químicos que necesitan emplear sustancias tóxicas y peligrosas, mientras que con la biosíntesis podemos encontrar el mismo resultado al utilizar agentes biológicos a temperatura ambiente.

Por tanto, la biosíntesis es una excelente respuesta para la incursión en nanotecnologías; y siguiendo con la línea de investigación en el presente trabajo se utilizó el lirio acuático (*Echhornia Crassipes*) para la biosíntesis de nanometales en residuos de pilas zinc- carbón.

6.3 Lirio Acuático

Nombre científico: (*Eichhornia Crassipes*) es una planta hidrófita libre flotadora perteneciente a la familia de las Pontederiaceae (Malik, 2007), Originaria del Amazonas en Sudamérica (Lindsey et col., 2000). Presenta una morfología como planta flotadora, perene, que posee hojas de color verde brillante, espigas florales de color violeta o amarillas y una raíz fibrosa que puede llegar a medir hasta 3 m de largo (Lindsey y Hirt, 2000; Gakwavu, 2007).

Sin embargo, resulta la *E. Crassipes* se ha convertido en un problema en diversas partes del mundo (Malik, 2007), empeorando las condiciones de vida de la gente que vive en los alrededores de los cuerpos de agua invadidos, ya que las matas que flotan sobre el agua, al ser arrastradas por el viento pueden servir como vectores de transporte de los organismos causantes de enfermedades como la malaria además de volverse sitios de riesgo debido a animales como; serpientes y otros animales venenosos (Gunnarsson et col., 2007).

Debido a la mano del hombre, el lirio acuático se ha dispersado por todas las zonas tropicales del mundo (Gunnarsson et col., 2007) lo que ha provocado que actualmente se le considere como maleza nociva y esté atrayendo la atención global debido a que estas características provocan un fuerte impacto al ambiente, a la salud humana y al desarrollo económico (Malik, 2007). Pese a que el lirio pareciera ser el responsable de todos los problemas mencionados anteriormente, se debe de pensar positivamente en esta planta como una fuente de biomasa y proteína para muchos procesos actuales. Por su rápido crecimiento, que es una característica muy apreciada en cualquier cultivo, y su capacidad de remover contaminantes de los cuerpos acuíferos, la *E. Crassipes* puede ser considerada como una materia prima potencial para diferentes industrias como: la de los alimentos funcionales, la de biocombustibles (etanol y diésel) o en investigación para bio y fito – remediación (**Gunnarsson et col., 2007; Malik, 2007**).

Un documento importante en relación con el lirio acuático es un estudio de evaluación de remoción de indicadores fecales, donde se demostró que en aguas contaminadas por materia fecal sometidas a la presencia de la *E. Crassipes*, disminuyó hasta un 99% de la presencia de coliformes fecales. También es sabido que la *E. Crassipes*, es una de las plantas acuáticas con un gran potencial en la fitorremediación de metales pesados debido a su tolerancia y alta capacidad para acumularlos. Investigaciones documentadas han demostrado que la *E. Crassipes* puede ser útil para el tratamiento de aguas contaminadas con As, Be, Cd, Cr, Hg, Ni, Pb, Se y Zn.

Los estudios ya realizados en los lirios de fito y biorremediación estos son capaces de acumular los metales pesados y la presencia de éstos disminuyen de la siguiente manera: raíz> tallo> hojas> frutos> semillas (**Blum, 1997**).

Las pilas desde su descubrimiento a inicios del siglo XIX por el científico Alessandro Volta, que determino que existía un flujo continuo de fuerza eléctrica al usar ciertos líquidos como conductores, a través de una serie de discos metálicos, promoviendo así una reacción química que genera energía. (**Ortiz et col., 2008**). Estas han tenido grandes aplicaciones y modificaciones con el paso de los años ya que una pila eléctrica es un dispositivo capaz de convertir la energía química en eléctrica por medio de una reacción de Oxidación-Reducción, y que, gracias a este descubrimiento, se ha llegado a obtener pilas de todo tipo y tamaño.

La duración, voltaje y clasificación de una pila depende de los componentes de esta, entre los componentes más comunes se encuentran metales como, Cadmio (Cd), Litio (Li), Manganeseo (Mn), Mercurio (Hg), Níquel (Ni), Plata (Ag), Plomo (Pb) y Zinc (Zn) incluyendo un medio conductor de corriente eléctrica, que puede ser un electrodo de carbón o un electrolito a base de hidróxido (potasio o sodio) y cloruro de sodio, entre otros (AMEXPILAS, 2008).

Sin embargo, el uso indiscriminado de las pilas y baterías ha ocasionado una gran problemática a nivel ambiental y de salud por su alto nivel de contaminación en suelos, agua y aire, lo que ocasiona daños irreversibles al ecosistema, al igual que en la salud humana ya que algunos componentes de las pilas pueden ocasionar daños en el sistema respiratorio, riñones, cáncer de todo tipo, etc.

Por lo antes mencionado, en esta investigación se utilizó la biomasa del Lirio acuático (*Eichhornia Crassipes*) como agente biorreductor, con la finalidad de obtener un método ecológico y económico en la obtención de nanopartículas de ZnO y MnO utilizando pilas descartadas de Zinc-carbón tipo (AA) ya que existen pocos métodos de recuperación de residuos de pilas que sean ecológicos y que brinden un paso importante hacia la síntesis de éstas.

6.4 Metodología

Para esta investigación se utilizaron dos tipos de pilas alcalinas (AA) ya descartadas, las cuales fueron Sony Polad (SP1) y Pleomax (PLx), durante la recolección de pilas para la realización de la biosíntesis de nanopartículas se donaron una gran cantidad de pilas de diferentes marcas algunas ya se encontraban con un avance de deterioro grave estaban hinchadas, semi-abiertas, se encontraban oxidadas, etc; se eligieron las pilas antes mencionadas por ser éstas la que más demanda de adquisición presenta en la población del Oriente del Estado de México donde se realizó la colecta.

Para realizar la biosíntesis de ZnO y MnO de las pilas alcalinas (AA) Sony Polad (SP1) y Pleomax (PLx) se realizaron los siguientes pasos:

6.5 Extracción de muestra

Se emplearon unas pinzas especiales para cortar carcasa de las pilas, abriéndolas por la mitad con mucho cuidado para no dañar el ánodo y poder separar manualmente todos los componentes y recuperar la pasta interna donde se concentran todos los componentes químicos.

Posteriormente se separó el electrolito (pasta negra) y se dejó secar durante 24 horas a temperatura ambiente de 25°C, transcurrido ese tiempo se trituró en un mortero de ágata hasta obtener un material fino. Una vez obtenido el material se procedió a preparar las muestras colocándolas durante 36 horas en la mufla a 900°C con la finalidad de obtener fases bien definidas en los cristales característicos del electrolito.

Para la identificación de las muestras obtenidas se realizaron estudios espectroscópicos como difracción de Rayos X, TEM-EDX y TEM utilizando un microscopio HIRTEM y HRSEM con espectroscopia EDS. Para ello, se prepararon los lirios acuáticos de la siguiente manera

6.6 Preparación del lirio acuático (*Eichhoirnia Crassipies*)

a. Lavado con agua y detergente. El lirio fue lavado con la finalidad de quitar cualquier residuo de lodo con agua común y detergente. Posteriormente, los lirios fueron cortados en pequeños trozos para su facilitar el secado en el horno a 80 ± 5°C durante una semana.

b. Lavado del lirio con solución ácida

Una vez seco el lirio acuático se trituró en un mortero de ágata y se agregó HCl 0.01M a una relación 3g:100 mL, se agitó y se dejó en reposo durante 30 minutos. Finalmente, se filtró el lirio con una tela de algodón, recuperando el filtrado (lixiviado) y la biomasa la cual se lavó con agua desionizada a la misma relación sólido: líquido para remover el exceso de ácido y nuevamente se procedió a filtrar la mezcla para recuperar la biomasa y secarla a 80 ± 5°C durante una semana

6.7 Biosíntesis de nanopartículas metálicas

Se efectuó la síntesis de nanopartículas de Mn, del orden de 1 a 20 nm, por el método de bioreducción utilizando la biomasa de los lirios. Para determinar las condiciones óptimas de biosíntesis se efectuaron variaciones en cuanto a las variables de procesamiento del lirio acuático: ajuste de pH el cual se controló por medio de una solución de tampón a los valores de 3, 5, y 10, concentración de la suspensión de la biomasa, concentración de la solución metálica, principalmente. A continuación, se detalla el método implementado:

6.8 Preparación de nanopartículas

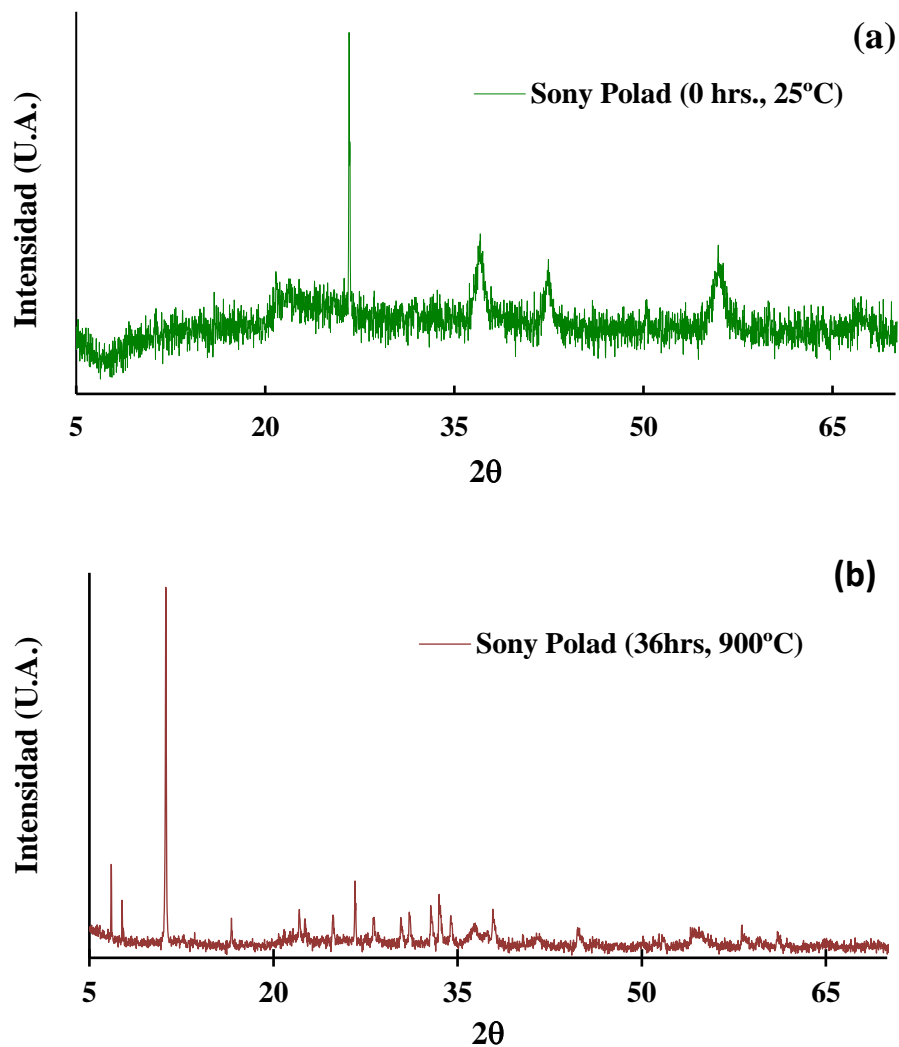
- Se prepara una solución del metal en estudio con agua des ionizada y se somete a baño ultrasónico 20min.
- Se preparó con una concentración de 5 mg de lirio/mL en agua destilada usando un tratamiento de ultrasonidos durante 15 min, la cual es vaciada en cada tubo de ensaye.
- Posteriormente, las muestras se centrifugan a 5000 rpm 15 min
- A cada muestra se le agrega 1mL de solución buffer en la solución de biomasa.
- Después se coloca la mezcla en un baño de ultrasonidos durante 15 min, Y se deja durante otros 10 minutos sin agitación y después se centrifuga a 5000 rpm durante 15 min.
- A continuación, a cada muestra se le adiciona 1mL de solución metálica/mL de solución de biomasa.
- Posteriormente, la solución mezcla se somete a baño ultrasónico durante 20 minutos y, una vez concluido, se centrifugan a 5000 rpm/20 min a 25°C.
- Teniendo cuidado de no mover las muestras, se separa el sobrenadante (solución coloidal) del precipitado (biomasa) por decantación, este último es desechado y la solución es analizada por Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM).

6.9 Resultados y discusiones

6.10 Estudio de Difracción de DRX

Una vez obtenido los electrolitos de las pilas Zinc-Carbón Sony Polad (SP1) y Pleomax (PLx), se realizó un estudio de difracción de Rayos X con la finalidad de identificar la composición elemental de los metales tóxicos presentes en las pilas analizadas, las cuales fueron secadas previamente en la mufla en tiempos de 0 a 36 horas a temperatura ambiente de 25°C y 900°C, en la figura 6.1, se muestran los espectros de DRX.

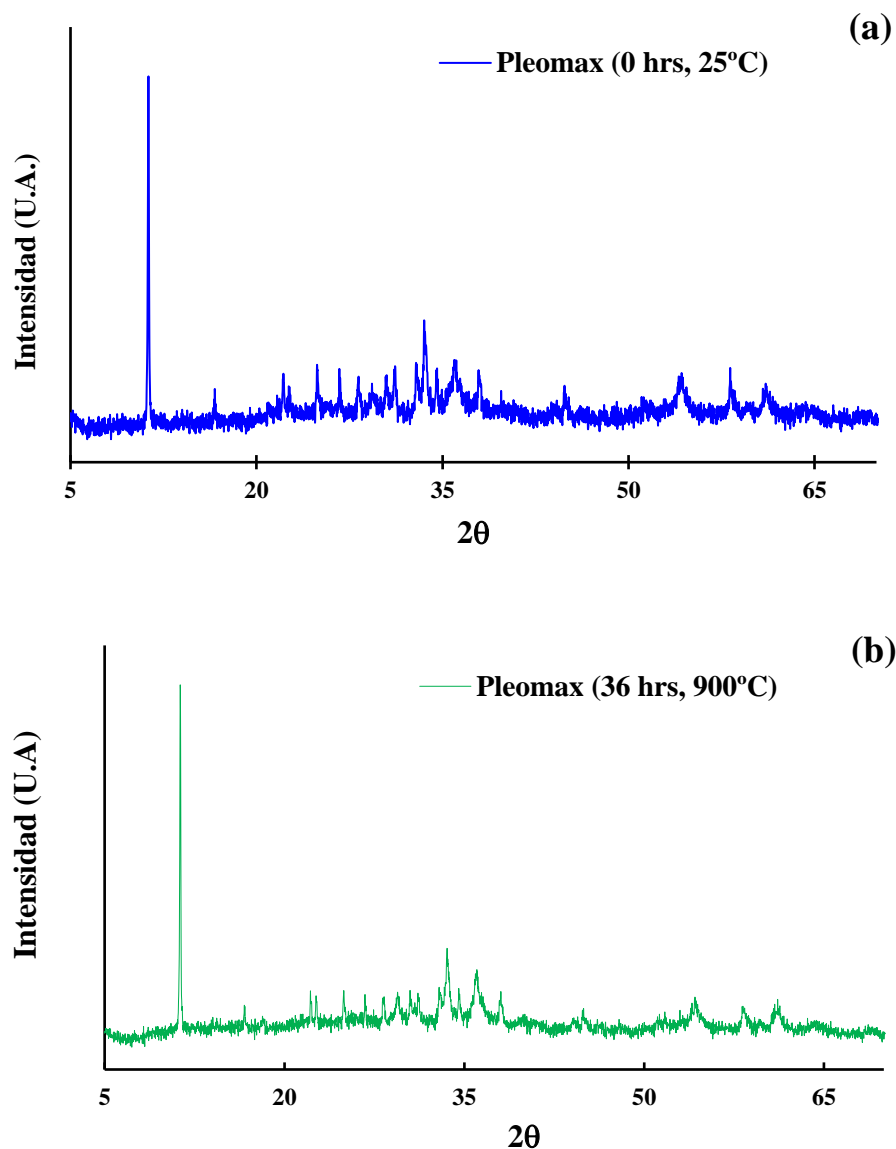
Figura 6.1 Espectros de difracción de Rayos X, obtenidos en la pila Sony Polad (SP1) a diferentes: a) $T= 25^{\circ}\text{C}$ y un $t=10$ hrs; b) $T= 900^{\circ}\text{C}$ y $t= 36$ hrs



En la figura 6.1, Se observa los cambios de cristalización en las dos temperaturas empleadas y los tiempos asignados, es importante resaltar que se emplearon otras temperaturas y tiempos para la obtención de los EDX sólo se muestran los dos espectros donde se observan con mayor claridad los cambios de cristalización e identificación de las fases presentes, MnO y ZnO figura 1.1 a) $T= 25^{\circ}\text{C}$, $t=10$ horas y figura 1.1 b) $T= 900^{\circ}\text{C}$, $t=36$ horas obtenidos de la muestra (SP1) en esta se define mejor la estructura cristalina.

En la figura 6.2, se muestran los espectros DRX de la pila Pleomax (PLx) en los cambios cristalinos en las mismas condiciones de análisis de la pila SP1.

Figura 6.2 Espectros de difracción de Rayos X, obtenidos en la pila Pleomax (PLx) a diferentes: a) T= 25°C y un t=0 hrs; b) T= 900 °C y t= 36 hrs

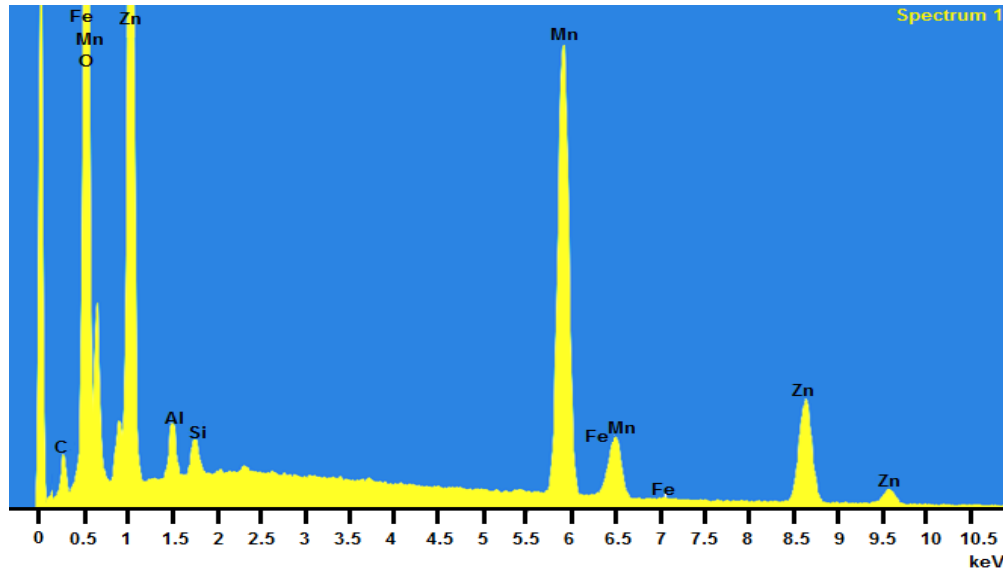


En la figura 6.2 a) y b), se observa que aún con los cambios de temperatura y tiempo, la cristalización es menor que en las muestras anteriores, es importante mencionar que las muestras presentaron un comportamiento higroscópico desde su extracción y aun cuando se secó a temperatura ambiente 25°C a 10 horas y en la mufla a 900°C durante 36 horas al momento de entrar en contacto con el medioambiente se humedecía, impidiendo una tener una buena lectura en la cristalización.

En general, se observa que a 900°C y después de haber transcurrido 36 horas las muestras mejoran la cristalización, definiéndose las fases esperadas de MnO y ZnO. Es importante mencionar que aun a esta temperatura las muestras no terminaron de cristalizar y definirse en su totalidad, ya que en cada intervalo de tiempos se observaban más señales, por su comportamiento higroscópico fue difícil tener una caracterización con el software del equipo, por lo que se realizó un estudio de Microscopia Electrónica a Trasmisión con microanálisis (TEM-EDS) con la finalidad de caracterizar los compuestos presentes en las muestras sometidas a 900°C y 36 horas.

6.11 Estudio de Microscopia electrónica a Trasmisión con microanálisis TEM- EDS

Se realizó un estudio de **TEM-EDS** a las muestras del electrolito de las pilas Zinc-carbón (SP1 y PLx) las cuales fueron sometidas a una T= 900°C y t= 36 horas. En la figura 3, Se muestran los espectros de los componentes químicos de la pila descartada Sony Polad (SP1), los cuales fueron obtenidos mediante la técnica **TEM-EDS**.

Figura 6.3 SEM-EDS de la muestra (SP1)

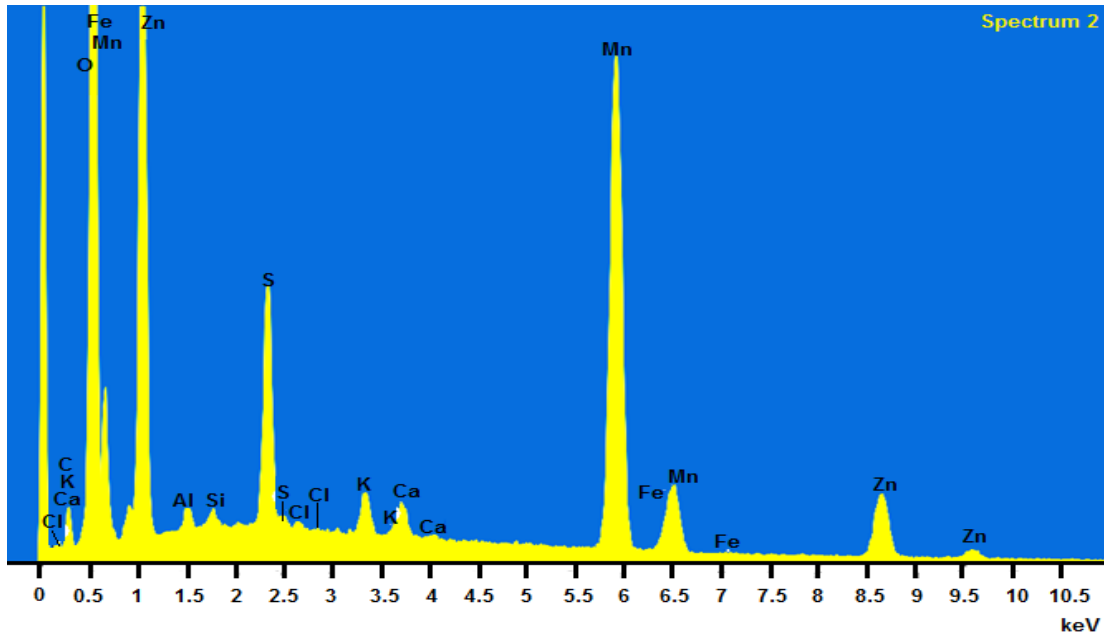
En la Figura 6.3, se observa que los óxidos de Manganeseo MnO están muy por encima de los límites permisibles, existe la presencia de Silicio (Si) que no es un componente común en las pilas la presencia de aluminio Al) y Hierro (Fe) se asume que se debe al material de la carcasa de éstas, dichos análisis corroboran que no cumplen con los estándares de calidad establecidos en la elaboración de éstas.

En la tabla 6.1, se muestran los resultados obtenidos de los componentes químicos presentes en la muestra **Sony Polad (SP1)**, donde se observa la presencia de óxidos de manganeseo (MnO), Zinc (Zn), Carbono (C), Silicio (Si), Oxígeno (O), etc.

Tabla 6.1 Composición Química de la pasta de la muestra (SP1)

Elemento	Peso%	Peso%	Atómico%
		Sigma	
C	3.16	0.15	8.22
O	28.16	0.14	54.95
Al	0.92	0.03	1.06
Si	0.58	0.03	0.64
Mn	32.48	0.15	18.46
Fe	1.19	0.10	0.66
Zn	33.52	0.16	16.01
Totales	100.00		

En la Figura 6.4, Se muestran los espectros de los componentes químicos de la pila descartada Pleomax (PLx) analizados mediante la técnica **TEM-EDS**.

Figura 6.4 TEM de la muestra (PLx)

En la Figura. 6.4, Se puede observar que predomina una cantidad mayor de MnO y ZnO que son los componentes principales de la reacción de oxidación de las pilas Zinc-carbón, se observa de nuevo la presencia de Si y otros componentes no comunes en las pilas. Los resultados obtenidos de la muestra PLx en los componentes de Manganeseo (Mn) están por encima de lo reportado por la Eurotech 1991 y al RIS Internacional 2007, los demás elementos se encuentran por debajo de lo establecido.

En la Tabla 6.2, se muestran los resultados obtenidos de los componentes químicos presentes en la muestra **Pleomax (PLx)**.

Tabla 6.2 Composición Química de la pasta de la muestra (PLx)

Elemento	Peso%	Peso% Sigma	Atómico%
C	3.11	0.24	7.54
O	31.55	0.17	57.50
Al	0.36	0.03	0.39
Si	0.21	0.03	0.22
S	3.93	0.05	3.58
Cl	0.16	0.03	0.13
K	0.92	0.03	0.68
Ca	0.77	0.03	0.56
Mn	35.41	0.18	18.79
Fe	1.07	0.10	0.56
Zn	22.51	0.17	10.04
Total	100.00		

En la tabla 6.2, Se observa que en la muestra PLX existe la presencia de compuestos químicos que no son muy comunes en otras pilas, tales como el Azufre (S), Cloruros (Cl) y el Silicio (Si), lo que nos confirma que existen pilas en el mercado que no cumplen con las medidas establecidas y no tienen un control de calidad.

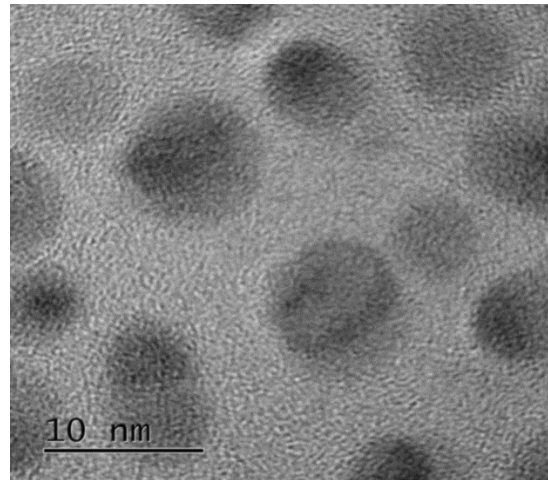
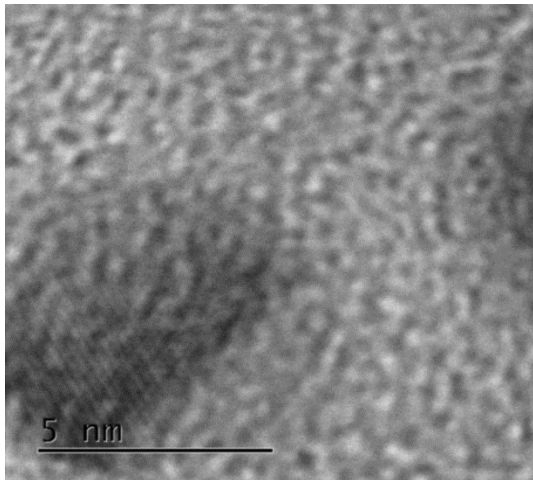
A continuación, se muestran los resultados de Microscopia Electrónica de Transmisión TEM de las muestras de la biosíntesis de nanometales utilizando el lirio acuático como agente biorreductor.

6.12 Resultados de la Biosíntesis de nanometales, empleando la técnica de Microscopia Electrónica de Transmisión (TEM)

Con la finalidad de caracterizar (estructura y distribución de tamaño) las nanopartículas de Mn y Zn sintetizadas por el método de biorreducción utilizando la biomasa de lirio acuático, se empleó la técnica **TEM** utilizando un microscopio HRTEM y HRSEM con espectroscopia EDS de la UAM- Iztapalapa, con este fin se extendió la muestra en papel filtro Whatman grado 3 y se dejó secar al ambiente.

En la figura 6.5, se muestran el mapeo obtenido mediante TEM de la muestra **SP1** a un valor de pH= 3 establecido para la bioreducción, a una escala de: a) 5nm y b) 10 nm.

Figura 6.5 a) pH=3, Escala: 5 nm Imagen 1.1. b) pH=3, Escala: 10 nm



En la Figura 6.5 se observa que en: 1.1a) en la escala de 5nm, se observan varias nanopartículas con una buena orientación en los planos cristalográficos, mientras que en 1.1b) escala de 10nm se aprecia una buena definición y distribución de las nanopartículas de Mn y Zn, así como planos cristalográficos bien definidos.

En la imagen 6.6, se muestran la imagen obtenida del mapeo realizado mediante TEM de la muestra **PLx** a un valor de pH= 3 establecido para la bioreducción, a una escala de: a) 5nm y b) 10 nm.

Figura 6.6 pH=3, Escala: 5nm

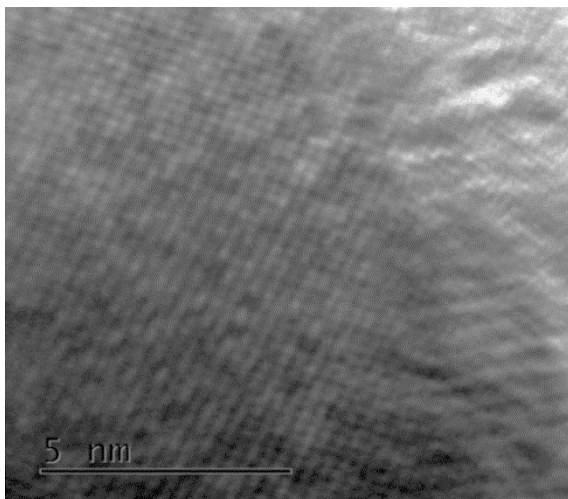
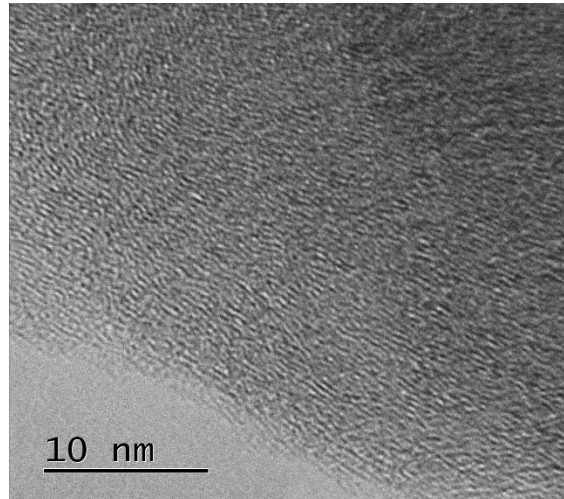


Figura 6.6 pH=3, Escala: 10nm



En la figura 6.6, se observa que en: 1.2a) en la escala de 5nm, y 1.2b) escala de 10nm, en ambas se aprecia una buena definición y distribución de las nanopartículas de Mn y Zn, así como planos cristalográficos bien definidos, y con un tamaño uniforme de las nanopartículas. Se observa la aglomeración de las nanopartículas y se aprecia una formación de cúmulos.

6.13 Agradecimientos

Al Tecnológico de Estudios Superiores del Oriente del Estado de México por brindar todas las facilidades para llevar a cabo esta investigación.

A la Universidad Autónoma Metropolitana por permitir que se llevará a cabo esta investigación en sus instalaciones en el Dpto. de Química área Electroquímica y Dpto. área de Ingeniería en Recursos Energéticos.

6.14 Conclusiones

Se obtuvieron reproducibles muestras de manera satisfactorias las nonopartículas metálicas de ZnO y MnO de las pilas descartadas de marca Sony Polad y Pleomax, empleando como bioreductor el lirio acuático.

Los estudios de difracción de Rayos X permitieron comprobar la presencia de las fases principales esperadas, MgO y ZnO y que se tiene una mejor cristalización de los componentes de las pilas empleadas cuando fueron sometidas a una temperatura de 900°C en un tiempo de 36 horas ya que muestran una mejor definición en las señales y disminución del ruido.

Mediante TEM fue posible identificar la composición de las pilas empleadas y se pudo observar que éstas muestran elementos que aún no son reportados en la literatura, lo que es claro que algunos fabricantes emplean catalizadores con la finalidad de tener un mejor rendimiento, sin considerar que al ser descartadas las pilas terminan en los basureros a cielo abierto y reaccionan los componentes, contaminando de una manera desmedida e irreversible el suelo, agua, animales, etc.

Es muy importante resaltar que en los resultados obtenidos en las dos muestras de pilas analizadas muestran límites superiores de los permisibles en los componentes superiores a los reportados por la Unión Europea. Aún falta mucho por realizar en relación con este trabajo ya que existen una gran variedad de marcas de pilas y en esta investigación solo se analizaron dos marcas ya antes mencionadas, es importante tomar conciencia sobre la disposición final de las pilas ya que están presentan límites de sus componentes por arriba de los permisibles en MnO y ZnO, sin cuantificar aún a detalle los componentes nuevos encontrados; por ello, es urgente que se establezca nuevas políticas de disposición final y se creen Normas Mexicanas para la disposición final de este tipos de residuos tóxicos.

6.15 Referencias

Amexpilas, (2018), Estudios <http://www.amexpilas.org/amexpilashtml/estudios.html>Realizados.

Ara, B. N., Mondal, S. Basu, S. Laskar, R.A. Mandal, D. (2009), Biogenic synthesis of Au and Ag nanoparticles using aqueous solutions of black Tea leaf extracts *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 71: 113-118

Ascencio Jorge A, Rodríguez-Monroy Ana C., Liu Hong Bo y Canizal Gerardo, (2004), *Chemistry Letters*, vol.33, No. 8

Baylon Palomino Maria Brenda Olivia, (2015), TESIS, Biosíntesis de nanopartículas Metálicas Utilizando Extracto Acuoso de *Opuntia spp* de Poblaciones silvestre y Cultivada. UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO, Saltillo Coahuila, agosto.

Blum, W.H., (1997), Cadmium uptake by higher plants. *Proceedings of extended abstracts from the fourth international conference on the biogeochemistry of trace elements*. Berkeley, USA: University of California, pp. 109-110.

Boldyrev, V. V. (2006). Mechanochemistry and mechanical activation of solids. *Russian Chemical Reviews*, 75:177-189.

Emil Roudner, (2006) *Chem. Soc. Rev.*, 35, 583.

Ershov, G. G. (1997). Metal ions in unusual and unstable oxidation states in aqueous solutions: Preparation and properties. *Russian Chemical Reviews*. 66:93-106.

Faraday. M. (1957). *Experimental Relations of gold (and other Metals) to light* *Philosophical Transactions of the royal Society Londres*.

Faraday, M., (1875), *Phil. Trans. R. Soc.*, 147, 145

- Frederix, F., J.M. Friedt, K. H. Choi, W. Laureyn, A. Campitelli, D. Mondelaers, G. Maes, G. Borghs., (2003). Biosensing based on light absorption of nanoscaled gold and silver particles *Analytical Chemistry*. 75(24):6894-6900.
- Gakwavu R. J. (2007). Zinc and chromium removal mechanisms from industrial wastewater by using water hyacinth, *Eichhornia crassipes* (mart.) Solms. *Lambert Academic Publishing*. pp 1 – 84.
- Gaviria Restrepo, J., Pavón Juan José, Abdul Villarraga Junes, Segura-Sánchez Freimar, Torres-Hernández Yadir, Rodríguez José Antonio, (2019). Síntesis e inmovilización de nanopartículas de plata sobre sustratos de titanio poroso con potencial uso en materiales implantables. *Revista médica Universidad de Antioquia*, IX Seminario Ciencias Básicas Biomédicas Latreria, vol. 32, pág. S-15
- Gunnarsson C. C. y Mattsson P. C. (2007), Water hyacinths as a resource in agriculture and energy production: A literature review. *Waste Management*, 27, 117 – 129.
- Jacquelyne Zarría-Romero, Ana Osorio, José Pino, Betty Shiga, Dan Vivas-Ruíz. (2017). Efecto de las Nanopartículas Industriales TiO₂, SiO₂y ZnO sobre la viabilidad celular y expresión génica en médula ósea de *Mus musculus*. *Rev Peru Med Exp SaludPublica*, 34 (3), 436-444
- Jiménez León E. del Carmen. (2020). Tesis "Fitonanopartículas de plantas nativas del Valle de Mexicali: Caracterización y evaluación de sus propiedades antimicrobianas e insecticidas". Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas- Instituto de Ciencias Biológicas, 1-89.
- Karuvath Yossaf, Binil Itty Ipe, Cherumuttathu H. Suresh, and K. George Thomas J. (2007), *Phys. Chem.* 111, 12839.
- Lindsey K. y Hirt H. M. (2000), "¡Usos del lirio acuático!! Un manual práctico para usos del lirio acuático alrededor del mundo". *Anamed International*. pp 2 -4, 5 -8, 21-30 y 31-32.
- Malik A. (2007). Environmental challenge vis a vis opportunity: The case of water hyacinth. *Environment International*, 33, 122 – 138.
- Muzafarov. A. M. Rebrov, E. A. (2000), *Current Trends in the Chemistry of Dendrimers*, *Polymer Science*. 42: 55-77.
- Taniguchi N., *Proc. Intl. Conf. Prod. Eng., Tokyo, Part II, 1974*
- Ortiz Sandoval Ana Elena, Karen Rocío Parada Arévalo, (2018), "propuesta para la gestión ambiental de pilas y baterías (dispositivos electroquímicos generadores de energía) fuera de uso en el salvador".
- P.S. Schabes-Retchkiman, G. Canizal, R. Herrera-Becerra, C. Zorrilla, H.B. Liu, J.A. Ascencio, (2006) *Optical Materials* 29, pp. 95.
- Perdigón P., (2010), "Síntesis y caracterización de nanopartículas de Gd y Sm por el método de biorreducción"- Tesis de Licenciatura. UNAM. Facultad de Ingeniería.
- Romero E. J. (2014), Comunicación personal. Departamento de Materiales Avanzados. Centro de investigación de Química Aplicada. Saltillo, Coahuila de Zaragoza, México.
- R. Herrera-Becerra, C. Zorrilla, G. Canizal, P.S. Schabes- Retchkiman, H.B. Liu, L. Tavera Davila, G. Rosano-Ortega, L. Rendón y J.A. Ascencio, (2008), *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 8, 1.
- Serrano-Niño J.C., Contreras-Martínez C.A., Solís Pacheco J.R., Zamudio Ojeda A., Aguilar Uscanga B.R., Cavazos-Garduño A. (2020). Optimization of the biosynthesis of gold nanoparticle using *Hypericum perforatum* and evaluation of their antimicrobial activity. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 19, No. 2, 889-902.

Seung H. K., Yeonho C., Hwang D.J., Grigoropouloa G., Jaewon Ch. Poulidakos D. P. (2006), Appl. Phys. Lett. 89, 141126

Wachs, I. E. (2001). Characterization of catalytic materials. Momentum Press. New York. United States of America.

Yu Y. Z., Qinhuai X. B., (2004), Shape2Controlled Syntheses of Metal Nanoparticles, (Department of Chemistry, Tsinghua University, Beijing 100084, China).

Jun Y.W., Jang J.T., (2007) J. Chem., Adv. Exp. Med. Biol., 620, 85

Zhu, H, Zhang, C., Yin, Y. (2004). Rapid Synthesis of copper nanoparticles by sodium hypophosphite reduction in ethylene glycol under microwave irradiation. Journal of Crystal Growth. 270: 722-728

Capítulo 7 Perfil lipídico en una cepa de la microalga *Dunaliella tertiolecta* y su potencial para producción de biodiesel

Chapter 7 Lipid profile in a strain of the *Dunaliella tertiolecta* microalgae and its potential for biodiesel production

MEJIAS-BRIZUELA, Nildia†*, PALOMARES-RUIZ, Irma, PANIAGUA-SOLAR, Laura y GOMEZ-CORDOBA, Fidel

*Universidad Politécnica de Sinaloa, Programa Académico de Ingeniería en Energía
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla*

ID 1^{er} Autor: *Nildia, Mejias-Brizuela* / **ORC ID:** 0000-0003-2973-473X, **CVU CONACYT ID:** 253092

ID 1^{er} Coautor: *Laura, Paniagua-Solar* / **ORC ID:** 0000-0001-8961-868, **CVU CONACYT ID:** 349858

ID 2^{do} Coautor: *Irma, Palomares-Ruiz* / **ORC ID:** 0000-0002-2577-1288

ID 3^{er} Coautor: *Fidel, Gomez-Cordoba* / **ORC ID:** 0000-0002-0218-7644, **CVU CONACYT ID:** 721578

DOI: 10.35429/H.2020.8.86.103

N. Mejias, L. Paniagua, I. Palomares, F. Cordoba

nmejias@upsin.edu.mx

A. Marroquín, J. Olivares, L. Cruz y A. Bautista. (Coord) Ciencias ambientales, uso de recursos. Handbooks-©ECORFAN-Mexico, Querétaro, 2020.

Resumen

La problemática atmosférica por uso de fósiles ha motivado en la comunidad científica la generación de proyectos que aporten fundamentalmente viabilidad económica al país aparte de beneficios ambientales y sociales, por ello las fuentes energéticas renovables están jugando un papel importante. En el área de los biocombustibles puros ha sido complicado alcanzar la meta, no por la disponibilidad de la biomasa sino por la producción que se logra después de su conversión, siendo aún el balance energético no competitivo. Muchas especies de microalgas están siendo los nuevos insumos con expectativas para una posible solución para la producción de combustibles como el biodiésel. En esta investigación se estudió el crecimiento celular de una cepa de la microalga *Dunaliella tertiolecta* en dos medios de cultivo para determinar el perfil de ácidos grasos contentivos en los lípidos de la microalga y poder evaluar el potencial de la microalga para la producción de biodiésel. El medio de cultivo más efectivo para el crecimiento fue el de Guillard en el que se alcanzó una concentración de la microalga de 2.1×10^6 cel/mL en 21 días de cultivo. La extracción de los lípidos producidos en la pared celular de la microalga se obtuvo en 20 minutos empleando sonicación y el método de Bligh & Dyer modificado previa recuperación de la biomasa por sedimentación-floculación con hidróxido de sodio como el mejor agente (98%). El perfil lipídico se compuso de 46% de ácidos grasos saturados y 54% de ácidos grasos insaturados, adecuados para la producción de biodiésel. Sin embargo, está presente el ácido linolénico lo cual pudiera afectar la estabilidad oxidativa del diésel.

Dunaliella tertiolecta, Ácidos Grasos, Lípidos, Biodiésel, Floculación

Abstract

The atmospheric problem due to the use of fossils has motivated in the scientific community the generation of projects that fundamentally contribute to economic viability to the country and environmental and social benefits, therefore renewable energy sources are playing an important role. In the area of pure biofuels, it has been difficult to reach the goal, not because of the availability of biomass but because of the production that is achieved after its conversion, the energy balance still being non-competitive. Many species of microalgae are being the new inputs with expectations for a possible solution to produce fuels such as biodiesel. In this research, the cell growth of a strain of the microalgae *Dunaliella tertiolecta* was studied in two culture media to determine the profile of fatty acids containing the lipids of the microalgae and to be able to evaluate the potential of the microalgae for the production of biodiesel. The most effective culture medium for growth was Guillard's, in which a microalgae concentration of 2.1×10^6 cells / mL was reached in 21 days of culture. The extraction of the lipids produced in the cell wall of the microalgae was obtained in 20 minutes using sonication and the modified Bligh & Dyer method after recovering the biomass by sedimentation-flocculation with sodium hydroxide as the best agent (98%). The lipid profile was composed of 46% saturated fatty acids and 54% unsaturated fatty acids, suitable to produce biodiesel. However, linolenic acid is present which could affect the oxidative stability of diesel.

Dunaliella tertiolecta, Fatty acids, Lipids, Biodiesel, Flocculation

7. Introducción

Las funciones fundamentales que permiten salvaguardar la vida de los seres vivos tales como la circulación de elementos químicos a través de los ciclos biogeoquímicos, la regulación de la temperatura y presión del planeta, la absorción y filtración de la radiación ultravioleta solar y la circulación de masas de aire frío y aire caliente suceden gracias a la atmósfera terrestre.

Esta permanencia del ser humano en la tierra y las actividades generadas por su evolución a partir de la revolución industrial han desgraciadamente forjado una serie de consecuencias, siendo una de las más graves la emisión y acumulación crónica de un gran número de sustancias químicas contaminantes a la atmósfera, debido a procesos de combustión incompleta generados tanto por fuentes fijas (industrias) como por fuentes móviles (vehículos de motor) dado el uso de recursos energéticos fósiles como el petróleo y sus derivados, el carbón y el gas natural.

De acuerdo a esto, la contaminación atmosférica es de tipo global pero también tiene carácter local, lo que provoca que la calidad del aire en zonas urbanas se afecte considerablemente y por ello se convierta de acuerdo a datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo (OCDE) en uno de los principales problemas de salud pública (INECC, 2018) por lo que es y será uno de los problemas ambientales con mayor relevancia a resolver por la humanidad en el siglo XXI, aún más si persisten los modelos energéticos actuales.

En México, a pesar de los esfuerzos para la reducción de emisiones atmosféricas contaminantes y el fomento de la sostenibilidad y sustentabilidad a través de la generación de energía por fuentes renovables, el balance nacional de energía publicado en 2019 por la Secretaría de Energía (SENER) reporta que el país ocupa el lugar 12 en importación de gasolina y diésel, lo que demuestra que cada año cuesta más alcanzar la independencia energética. En cuanto al consumo total, el sector más intensivo en el uso de la energía es el transporte seguido del industrial, residencial-comercial-público y finalmente el agropecuario, siendo el diésel el petrolífero que se consume en tres de los cuatro sectores (agropecuario, transporte e industrial, de acuerdo con orden de consumo).

El diésel, gasoil o gasóleo es un combustible líquido constituido principalmente por hidrocarburos saturados (por ello la composición química más común es $C_{12}H_{26}$ aunque puede ser de C_{10} a C_{15}) y en menor porcentaje por hidrocarburos aromáticos (SENER, 2015). Al igual que la gasolina, sufre hidrosulfuración para eliminar el contenido de azufre, pero aun la denominación más baja de diésel producida a nivel mundial (ultra bajo azufre) tiene 3.0 % de azufre o 10 ppm (equivalente a 10 miligramos de azufre/kilogramo de diésel) (Oficina de Eficiencia Energética y Energía Renovable USA, 2010) y esto es porque el azufre es un elemento presente en el petróleo desde su formación en el subsuelo.

México, produce y comercializa a través de Petróleos Mexicanos (Pemex) diésel automotriz, agrícola-marino de bajo azufre (DBA) con 500 ppm (máximo permitido de azufre en la NOM-016-CRE-2016) y se pretendía producir y comercializar a partir de julio 2019 diésel ultra bajo azufre (DUBA) de 15 ppm (NOM-016-CRE-2016) en todo el país a partir del Acuerdo A/065/2018 emitido por la Comisión Reguladora de la Energía (CRE, 2018) pero no fue posible debido a prórroga otorgada a Pemex hasta 2024 que le permite seguir comercializando DBA en todo el país y DUBA solo en las zonas metropolitanas del Valle de México, Guadalajara y Monterrey así como en la frontera norte (CRE, 2019).

El azufre como tal es un contaminante, mucho más si se encuentra combinado con el oxígeno como por ejemplo, el bióxido de azufre generado en la combustión que se da en los motores tipo diésel, por ello la estrategia mundial es lograr la reducción significativa de la contaminación del aire a partir de bajo contenido de azufre en los combustibles fósiles y a partir de allí, la disminución considerable de emisiones de los otros contaminantes (óxidos de carbono, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos no metano, partículas, etc.) y evitar no solo los daños a la salud sino también a ecosistemas terrestres y acuáticos por efectos de la acidificación del suelo y del agua.

Estas emisiones de azufre se logran disminuir al usar DUBA debido a las tecnologías de fabricación de los nuevos motores basadas en diseños más eficientes de filtros que permiten casi el control total de partículas de sulfatos y de absorbentes y hasta un 90% de control de óxidos de nitrógeno y carbono (INECC, 2019). También se recomienda usar DUBA en modelos automotrices fabricados a partir del año 2007 en adelante y en modelos anteriores siempre y cuando se realicen algunas modificaciones al motor (Oficina de Eficiencia Energética y Energía Renovable de los Estados Unidos).

La problemática de la contaminación del aire por la combustión del diésel en el sector automotriz de acuerdo a lo descrito puede resolverse con la producción de este petrolífero con contenido de azufre bastante reducido; la realidad es que para los países en desarrollo como México, esto cuesta mucho dinero debido a que las tecnologías se centran en la refinación y aun cuando el diésel es más sencillo de refinar y por tanto más económico de producir, Pemex no cuenta ni con recursos ni con infraestructura necesarios para producirlo y abastecer todo el país dado que no ha realizado la configuración necesaria de sus refinerías, optando por la construcción de algunas de estas, tampoco tiene capacidad para almacenarlo y transportarlo por ducto (Ramírez, 2019), le es menos rentable económicamente la refinación que la exploración y producción (Instituto Mexicano para la Competitividad, 2015) por ello el DUBA 15 ppm que se consume se suple con un 77% de importación (CRE, 2019) lo que ha traído problemas porque tampoco tiene una alta capacidad de servicios portuarios que de forma simultánea le permita recibir DUBA y desalojar DBA hacia los puertos para exportación.

Los retos ambientales actuales y a futuro con los que se ha comprometido el país ante instituciones como la Organización de las Naciones Unidas para alcanzar bajos niveles de contaminantes atmosféricos están impulsando en la comunidad científica la generación de proyectos que garanticen fundamentalmente viabilidad económica al país para su implementación y desarrollo tecnológico, siendo los recursos naturales renovables los que ofrecen un panorama importante para ello gracias a que se cuenta con un amplio potencial de radiación solar, de viento, de biomasa, de recurso geotérmico entre otros.

En el área de la bioenergía, México plantea la obtención de combustibles puros de biomasa como el biodiésel (conocido también como éster metílico de ácido graso, FAME por sus siglas en inglés) con lineamientos establecidos en el complemento a la Ley para la Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, por lo que existen muchos proyectos de laboratorio y pilotos, siendo complicado alcanzar la meta, no por la disponibilidad de la biomasa natural o residual sino por la producción que se logra a partir del proceso de conversión que se le aplique a la biomasa lo que hace que el balance masa-energía aun sea no competitivo frente a los combustibles fósiles.

En tal sentido, a partir de experiencias en laboratorios y pilotos muchas especies de microalgas como las del género *Chlorella*, *Nannochloropsis*, *Dunaliella*, entre otras se han convertido en las nuevas materias primas para la investigación en producción de biodiésel dadas las características que poseen en comparación con los cultivos energéticos y las grasas residuales animales tales como no depender de una estación del año para su producción, producción de biomasa en tiempo relativamente corto y la fracción lipídica contentiva en la pared celular que permiten un perfil de ácidos grasos del tipo monoinsaturados y poliinsaturados transesterificables para lograr así un combustible diésel con parámetros fisicoquímicos de alto impacto en un motor tales como la estabilidad oxidativa, punto de niebla, número de cetano, viscosidad (Moreira, 2015) y a partir de allí, entonces generar los proyectos pilotos para instalaciones a futuro que puedan establecerse en México a partir de microalgas. Sin embargo y no necesariamente el biodiésel debe ser usado en un motor diésel de forma pura, en muchos países se usa como un complemento al diésel fósil, esto porque al mezclar el biodiesel mejora algunas propiedades del diésel fósil, ya que juntos pueden brindar una mayor autonomía automotriz, además el biodiésel puede obtenerse mediante reacción química rápida y sencilla como la transesterificación que emplea compuestos químicos económicamente accesibles como el metanol e hidróxido de sodio como catalizador. Además, como se muestra en la Tabla 7.1 posee una serie de características físicas y químicas que lo hacen competitivo frente al diésel fósil tales como menor contenido de azufre, la nula presencia de compuestos aromáticos, mayor índice de cetano, alta biodegradabilidad, etc.

Tabla 7.1 Propiedades químicas y físicas del diésel derivado del petróleo y el biodiésel

Propiedad	Diésel	Biodiésel
Fórmula	C10-C15 HC	C12-C22
Composición (% peso)	C 85-88 % H 12-15 %	C 77% H 12 % O 11 %
Azufre (% peso)	< 0.05	< 0.002
Aromáticos (% peso)	30	0
Agua (ppm)	161	500 máx.
Poder calorífico inferior (MJ/l)	36,6	32,6
Viscosidad cinemática 40°C, cSt	1.3-4.1	1.9-6.0
Gravedad específica 15°C (Kg/l)	0.88	0.85
Punto de ebullición (°C)	188-343	182-338
Punto de inflamación (°C)	60-80	100-170
Punto de niebla (°C)	-15/5	-3/12
Punto de vertido (°C)	-35/-15	-15/10
Índice de cetano	40-55	48-65
Relación estequiométrica (aire/combustible en peso)	15	13.8

Fuente de consulta: Pinzi et al, 2009

En este trabajo se muestra el perfil de los ácidos grasos de una cepa de la microalga *Dunaliella tertiolecta* y a partir de allí se describe su potencial energético para la producción de biodiésel en la región de Mazatlán, Sinaloa, México, ya que dicha microalga presenta características como adaptación de crecimiento en ambientes salinos, dulces o salobres y alta adaptabilidad a temperaturas extremas que son características comunes en la región, además la mayoría de la literatura refiere su uso para el área de la biotecnología y pocos han realizado investigaciones para producción de biodiesel. Además, se tiene el propósito de establecer proyectos piloto bajo las condiciones ambientales de la región (sistema outdoor) aprovechando el recurso solar con el que se cuenta y el calor interno de la tierra (geotermia) para sistemas de acondicionamiento de aire para su crecimiento.

El capítulo se estructura en una sección metodológica que describe los ensayos realizados para el crecimiento celular de la microalga, la extracción de la biomasa, la extracción de lípidos y ácidos grasos. Continúa la sección de resultados y discusión, conclusiones, recomendaciones y referencias bibliográficas que soportan la investigación presentada.

7.1 Metodología experimental

La investigación está basada en el método indirecto para obtención de biodiésel bajo condiciones de laboratorio (Sánchez-Bayo 2019) que consiste primero en el crecimiento de la microalga para la producción de la biomasa empleando en nuestro caso dos medios de cultivo enriquecidos con nutrientes y luego en la recuperación de la biomasa, que en el caso particular se emplearon tres agentes químicos floculantes. Esto porque el crecimiento celular de la microalga, la producción de biomasa y su recuperación son los ejes fundamentales para la obtención de los lípidos y ácidos grasos que genera la microalga y a partir de allí evaluar su potencial para obtención de biodiésel. Finalmente, después de los ensayos experimentales realizados, se aplicó la metodología de enfoque escalonado para determinar el proceso experimental (los dos medios de cultivo y los tres agentes floculantes) con el mejor rendimiento en función del tiempo empleado y a partir de allí evaluar la factibilidad para escalar la investigación a nivel piloto.

Todos los ensayos experimentales descritos se realizaron por triplicado. Todos los resultados fueron procesados mediante estadística descriptiva utilizando medidas de tendencia central (media) y dispersión (desviación estándar).

7.2 Microalga de trabajo

Para llevar a cabo los ensayos se empleó un inóculo tomado de una cepa de la microalga *Dunaliella tertiolecta* proporcionada por el Laboratorio de Alimento Vivo del Acuario Mazatlán, Sinaloa, México.

7.3 Medios de cultivo (nutrientes)

Los medios de cultivo para el crecimiento de la microalga fueron el medio de Guillard (F/2) y el medio de Erdschreiber preparados de forma artificial en una disolución concentrada de cloruro de sodio (agua salada) a la que se añadió macronutrientes y elementos trazas (conocidos también como micronutrientes). La diferencia entre ambos medios radica en que el medio de Guillard contiene silicato aparte de los macronutrientes comunes (nitrógeno y fósforo) y también micronutrientes orgánicos como las vitaminas (cianocobalamina o B12, biotina o H y tiamina HCl o B1) (Canadian Phycological Culture Centre y University of Texas).

La preparación del medio de cultivo de Guillard consistió primero en preparar 1.0 L de las soluciones stock o soluciones madres de los macronutrientes, de los metales trazas y de las vitaminas (solo B12 y H) en agua destilada (dH₂O) descrita en la columna cuatro de la Tabla 7.2. Luego se preparó una solución compuesta por la mezcla de los metales trazas para lo cual a 950 mL de dH₂O se le agregó la cantidad indicada en la columna cinco de la Tabla 7.2 de cada una las soluciones stock de estos metales y se aforo a un volumen de 1.0 L, de igual manera se preparó la solución de las dos vitaminas. Finalmente, el medio de cultivo se preparó agregando a un volumen inicial de 950 mL de agua salada 1.0 mL de cada una de las soluciones de los macronutrientes, 1.0 mL de la solución compuesta por la mezcla de los metales trazas y 1.0 mL de la solución de vitaminas con ajuste del pH a 8.0 y aforando a un volumen de 1.0 L. El medio de cultivo de Erdschreiber se preparó bajo la misma metodología descrita para medio de Guillard agregando las cantidades indicadas en la Tabla 7.2.

Todas las soluciones fueron esterilizadas en autoclave y tanto las soluciones madres como el medio de cultivo fueron envueltas en Parafilm y congeladas para evitar su desnaturalización y su uso en el tiempo.

Tabla 7.2 Composición de los medios usados para los cultivos de *Dunaliella tertiolecta*

N°	Soluciones stock	Medio de cultivo	Solución stock (g/L)	Cantidad agregada para 1.0 L de solución substock	Volumen agregado al medio de cultivo (mL)
1	Agua salada	Guillard-Erdschreiber	34.0	-----	1000
Macronutrientes				-----	
2	NaNO ₃	Guillard	75.0	-----	1.0
		Erdschreiber	59.5	-----	3.3
3	NaH ₂ PO ₄ •H ₂ O	Guillard	5.0	-----	1.0
	Na ₂ HPO ₄ •7H ₂ O	Erdschreiber	5.4	-----	3.3
4	Na ₂ SiO ₃ •9H ₂ O	Guillard	30.0	-----	1.0
Metales trazas		Guillard			1.0
		Erdschreiber			12.0
5	Na ₂ EDTA•2H ₂ O	Guillard	-----	4.36 g	
		Erdschreiber	0.750	2.0 mL	
6	FeCl ₃ •6H ₂ O	Guillard	-----	3.15 g	
		Erdschreiber	0.097	2.0 mL	
7	MnCl ₂ •4H ₂ O	Guillard	180.0	1.0 mL	
		Erdschreiber	0.041	2.0 mL	
8	ZnSO ₄ •7H ₂ O	Guillard	22.0	1.0 mL	
	ZnCl ₂	Erdschreiber	0.005	2.0 mL	
9	CoCl ₂ •6H ₂ O	Guillard	10.0	1.0 mL	
		Erdschreiber	0.002	2.0 mL	
10	CUSO ₄ •5H ₂ O	Guillard	9.8	1.0 mL	
11	Na ₂ MoO ₄ •2H ₂ O	Guillard	6.3	1.0 mL	
		Erdschreiber	0.004	2.0 mL	
Vitaminas		Guillard			1.0
		Erdschreiber			1.0
12	B ₁₂	Guillard-Erdschreiber	1.0	1.0 mL	
13	H	Guillard	1.0	1.0 mL	
14	B ₁	Guillard	-----	200 mg	

Fuente de consulta: Elaboración propia con datos tomados de Canadian Phycological Culture Centre y University of Texas

7.4 Parámetros fisicoquímicos para crecimiento microalgal

El crecimiento celular de la cepa de microalga en los medios de cultivo descritos se llevó a cabo en el Laboratorio de Bioenergía de la UPSIN México, en un espacio físico de 1.80 m² en el que se dispuso una estructura metálica de 4 compartimientos (Figura 7.1) con la adaptación de los parámetros descritos en la Tabla 7.3.

Tabla 7.3 Parámetros para el crecimiento celular de la microalga *Dunaliella tertiolecta*

Luz	Intensidad lumínica de 6,000-7,000 lux suministrada por lámparas fluorescentes (30 W) dispuestas permanentemente durante 24 h frente a los fotorreactores
Temperatura	23±1 °C
Fuente de carbono	CO ₂ atmosférico suministrado por una bomba de aireación que permitió también agitación continua
pH	7.8

Fuente de consulta: Elaboración propia

7.5 Propagación microalgal

La propagación de la microalga *Dunaliella tertiolecta* se realizó mediante un sistema de cultivo tipo batch alimentado, es decir, una vez iniciado el crecimiento celular se realizaron diluciones a través de una transferencia volumétrica del medio de nutrientes preparado con la intención de conservar las cepas en fase de crecimiento y alcanzar alta concentración de biomasa (Coutteau, 2013).

Bajo las condiciones descritas en la Tabla 7.3, los cultivos iniciaron en tubos de ensayo con 30 mL del medio de nutriente (medio de Guillard o medio de Erdschreiber), cuando se alcanzó una densidad celular promedio de 1.5×10^6 Cel/mL se escaló a un volumen de 120 mL (lo que implicó agregar 90 mL del medio de nutrientes a la muestra inicial de 30 mL). Así sucesivamente se realizó la transferencia volumétrica del medio de cultivo a las muestras microalgales hasta alcanzar un volumen final de trabajo de 16 L. El acoplamiento al sistema de aireación constante se introdujo alcanzados los 800 mL de cultivo microalgal.

Los fotorreactores utilizados fueron inicialmente matraces Erlenmeyer (125, 500, 1000, 3000 mL), luego contenedores cilíndricos estériles de vidrio transparente de 4 L y finalmente contenedores cilíndricos estériles de plástico azul de 19 L. En todas las diluciones realizadas se hizo ajuste de pH. La Figura 7.1 muestra la estructura metálica donde se llevó a cabo el cultivo microalgal empleando los dos medios de cultivos enriquecidos con los nutrientes descritos.

La transferencia volumétrica del medio de cultivo se calculó mediante la ecuación 1 (Arana, Orruño, Barcina, 2012) en la que V_i representa el volumen de inóculo que se necesita para el próximo cultivo, V_f el volumen final que se tendrá al hacer la dilución y NC_i , NC_f representan el número de células presentes en el inóculo y las que finalmente se desean tener en el cultivo después de la dilución.

$$V_i = \frac{NC_f V_f}{NC_i} \quad (1)$$

Figura 7.1 Fotorreactores utilizados para crecimiento de una cepa de la microalga *Dunaliella tertiolecta*



Fuente de consulta: Elaboración propia

7.6 Evaluación de la propagación microalgal

La propagación de la microalga en los medios de cultivo descritos se evaluó a partir de las cinéticas de crecimiento celular que se construyeron realizando por triplicado un recuento celular cada 24 horas de las muestras microalgales que se tenían, tomando para ello 1.0 mL de esa muestra que se fijó con 50 μ L de solución Lugol al 10 % que se colocó sobre una cámara de conteo de Neubauer (hemocitómetro) de doble línea brillante 0,1 mm de profundidad y para su observación se empleó microscopía óptica a 10 X y 40 X.

Para cuantificar la eficiencia de la propagación microalgal se determinó la tasa específica de crecimiento (μ) donde X_i representa la concentración inicial de la biomasa y X_f la respectiva concentración final de la biomasa respecto al tiempo y a partir de allí se determinó el tiempo de duplicación promedio (t_d) de crecimiento de la microalga (Godoy-Hernández, Vázquez-Flota, 2006).

$$\mu = \frac{\ln X_f - \ln X_i}{t}; \quad t_d = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (2)$$

7.7 Extracción de biomasa

La producción de la biomasa se logra a partir de la propagación de la microalga en los medios de cultivo enriquecidos, debe estar lo más deshidratada que se pueda para poder llevar a cabo los ensayos experimentales siguientes y posteriormente la producción de los biocombustibles como el biodiésel. Sin embargo, su concentración se ve afectada por efectos de la dilución sucesiva que se realice, lo que hace que la extracción de la biomasa de microalga en muchas ocasiones también se dificulte.

Los métodos de extracción mecánicos, químicos o biológicos y sus combinaciones, siguen siendo a la fecha los más reportados en la literatura ya que brindan porcentajes óptimos de biomasa en laboratorio y de biomasa de valor comercial, sabiendo que depende mucho de la cepa de microalga que se estudie.

En este trabajo al término del periodo de crecimiento celular de *Dunaliella tertiolecta* en los dos medios de cultivo descritos, la recuperación de la biomasa dispersa en todo el volumen de trabajo se realizó mediante sedimentación-floculación seguido de centrifugación y liofilización.

El proceso de sedimentación-floculación se realizó como se mencionó en el apartado de metodología experimental, comparando tres agentes floculantes (básico, ácido y salino) agregados bajo concentración química fija (1.0 mol/L), variación de pH de la biomasa microalgal ($4.0 < \text{pH} < 11.0$) y tiempo fijo de reposo (24 h) con la intención de promover la auto floculación de la biomasa (conocido como test de jarra). Se empleó una disolución de hidróxido de sodio (NaOH) para incrementar el pH inicial de la biomasa húmeda microalgal de 7.8 a valores entre 10.0-11.0 (Ummalyma, Mathew, Pandey, Sukumaran, 2016), una disolución de ácido sulfúrico (H₂SO₄) para disminuir el pH inicial de la biomasa húmeda microalgal de 7.8 a valores de pH entre 4.0-5.0 (Liu y colaboradores, 2014) y por último, una disolución de sulfato de aluminio [Al₂(SO₄)₃] en cuyo caso no funcionó la concentración química establecida y se decidió un barrido con disoluciones de 0.25, 0.50 y 0.75 mol/L bajo el mismo tiempo de reposo (Andía-Cárdenas, 2000).

Para estimar la eficiencia de floculación mediante la ecuación 3 (Harith y colaboradores, 2009) se determinó antes y después de la agregación del agente floculante la densidad celular representadas por D_i y D_f respectivamente en la ecuación.

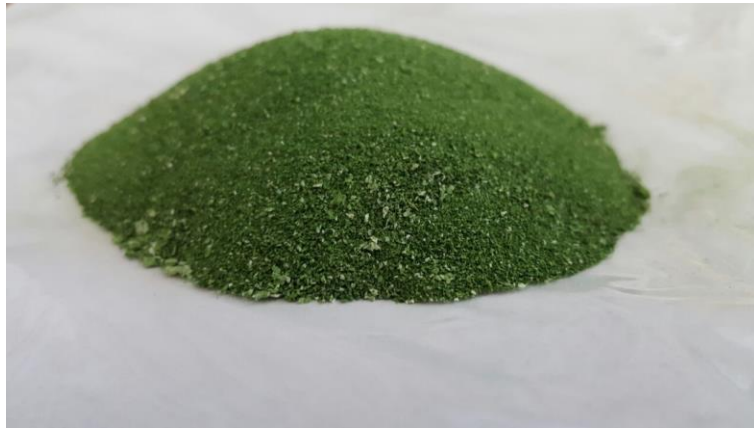
$$E_{floc} = \left[\frac{D_i - D_f}{D_i} \right] \times 100 \quad (3)$$

La centrifugación se llevó a cabo con el fin de obtener la mayor separación de biomasa microalgal del medio acuoso en el que se encontraba. Se emplearon tubos de centrifugación de 50 mL de capacidad, utilizando un campo centrifugo a 5000 rpm de velocidad y 5 min de centrifugación (Chen y colaboradores, 2011). La biomasa obtenida se resguardó en un congelador a -20°C.

Consecutivamente, se realizó la liofilización para lograr la mayor deshidratación de la biomasa centrifugada, para ello se utilizó un liofilizador conectado a una bomba de vacío cuya primera etapa (deseccación primaria) se llevó a cabo a -50 °C de temperatura y 53 KPa (Kilopascal) de presión, para posteriormente someter la muestra a la segunda etapa de secado con una temperatura de 39 °C y 39 KPa (SP industries, 2009). Finalizado el proceso, la biomasa seca reposó por espacio de 1 h bajo condiciones ambientales de laboratorio (± 25 °C), se pesó y se resguardó en el congelador en bolsas estériles identificadas (cepa de microalga, peso y día de obtención de biomasa).

Al término de los métodos realizados, la biomasa microalgal obtenida quedó en forma de sólido pulverulento, color verde y olor característico marino, tal como se muestra en la Figura 7.2.

Figura 7.2 Biomasa seca de una cepa de la microalga *Dunaliella tertiolecta*



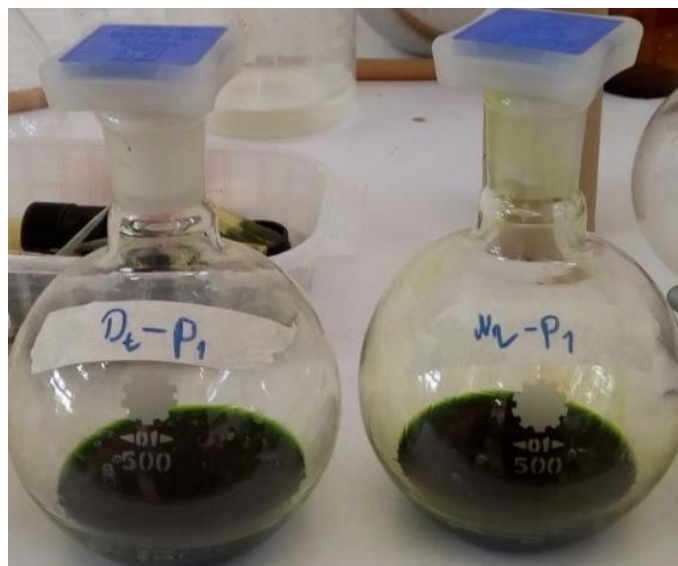
Fuente de consulta: Elaboración propia

7.8 Extracción y caracterización de lípidos

Para la extracción de los lípidos presentes en la biomasa seca obtenida de la microalga *Dunaliella tertiolecta* se realizó la disrupción celular empleando extracción con ultrasonido (sonicación) debido a que es uno de los métodos físicos eficientes porque emplea menor tiempo de extracción, con muy buen rendimiento de extracción y menos residuos si se compara con los métodos químicos de extracción por solventes mediante soxhlet (Suarsini, 2011; King, 2014).

Para llevar a cabo la sonicación se empleó el método modificado de Bligh & Dyer que consistió como primer paso en la homogeneización de toda la biomasa seca en una mezcla cloroformo-metanol y agua (Archanaa, Moise, Suraishkumar, 2012). Luego se tomaron 20 g de esta muestra y se les agregó una mezcla cloroformo-metanol (2:1) se agitó durante 15 min y 200 rpm (Soto y colaboradores, 2014). Seguido, la muestra fue colocada en un baño ultrasónico a una frecuencia fija de 40 KHz (Kilo Hertz) durante 20 min, finalizando el proceso con la adición de cloroformo-metanol-agua (2:2:1.8) a 5000 rpm por 5 min (El Arroussi, Benhima, Bennis, El Mernissi, Wahby, 2015) con el objetivo de mejorar la formación de las dos fases (superior: metanol-agua e inferior: biomasa-lípidos-cloroformo). La recuperación de los lípidos se hizo mediante decantación de las fases removiendo los solventes por evaporación al vacío a 60 rpm y 10 min. La Figura 7.3 muestra el producto final obtenido. Las muestras fueron resguardadas en frascos ámbar refrigerados a 5 °C para posterior caracterización del perfil de ácidos grasos.

Figura 7.3 Lípidos extraídos con ultrasonido en una cepa de la microalga *Dunaliella tertiolecta*



Fuente de consulta: Elaboración propia

El contenido porcentual de lípidos extraídos se determinó a partir de la ecuación 4, la cual toma en cuenta la cantidad de biomasa microalgal antes de ser sometida a la extracción (B_i) y la cantidad de biomasa microalgal después de la extracción (B_f) (Shuping y colaboradores, 2010).

$$L (\%) = \frac{B_f}{B_i} \times 100 \quad (4)$$

La producción volumétrica lipídica por día (P_v) también se determinó ya que es directamente proporcional a la concentración de la biomasa (C_B) y al contenido de lípidos extraídos (L) de acuerdo con la ecuación 5 (Talebi y colaboradores, 2013).

$$P_v = C_B \times L \quad (5)$$

La caracterización del perfil de los ácidos grasos contentivos en los lípidos de la microalga se realizó en el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD) Culiacán, Sinaloa, México inyectando 1.0 mL de muestra a un cromatógrafo de gases acoplado a una columna Agilent DB-5ms con temperatura programada entre 50-180 C, 300 °C para el inyector y 320 C para el detector FID. Dicho perfil se caracterizó solo en la biomasa microalgal cultivada en el medio de nutrientes de Guillard.

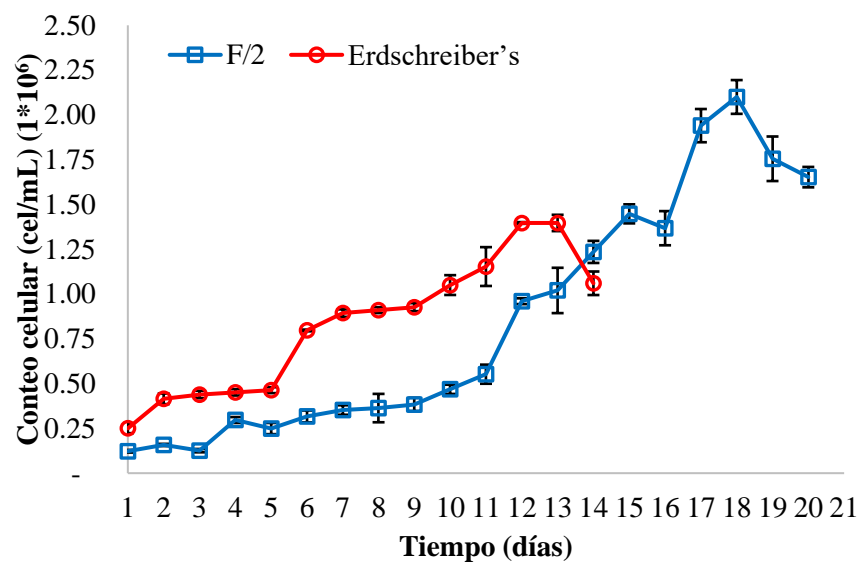
Los metil esteres de los ácidos grasos se identificaron mediante la comparación de sus tiempos de retención con estándar de ácidos grasos (37 FAME compounds, Supelco™ Mix C4- C24; trophic markers). La cuantificación se realizó mediante la integración del área bajo la curva en los trazos cromatográficos utilizando el software CHROMQUEST 4.1 con calibraciones derivadas de los ácidos grasos estándar.

7.9 Resultados

7.10 Evaluación de la propagación microalgal: Cinética de crecimiento celular

El crecimiento celular de la cepa de la microalga *Dunaliella tertiolecta* a través de su propagación en los dos medios de cultivo (Guillard y Erdschreiber) y los conteos diarios se presenta en el Grafico 7.1. La cinética de crecimiento celular muestra que para el medio de cultivo de Guillard (F/2) se alcanzó una densidad celular máxima de $2.10 \pm 0.12 \times 10^6$ cel/mL en el día 18, mientras que, para el medio de cultivo Erdschreiber se alcanzó en el día 12 con un número total de $1.40 \pm 0.05 \times 10^6$ cel/mL.

Gráfico 7.1 Cinética de crecimiento celular de una cepa de la microalga *Dunaliella tertiolecta* en los medios de cultivo de Guillard y de Erdschreiber



Fuente: Elaboración propia

El comportamiento de la microalga muestra que el medio de nutrientes de Erdschreiber permitió mayor número de células por cada mililitro de cultivo los primeros 12 días, pero a partir de ese tiempo decae frente al medio de nutrientes F/2.

En cuanto a la densidad celular máxima obtenida en el medio de cultivo F/2 (2.10×10^6 cel/mL) se observa una tendencia similar a los resultados obtenidos por Neto y colaboradores en 2012 que lograron en 18 días la máxima densidad celular de *Dunaliella tertiolecta*. La densidad celular obtenida es más alta que la obtenida por López-Elías y colaboradores en 2013, que obtuvieron 1.28×10^6 cel/mL en 09 días de crecimiento en laboratorio y es menor que la obtenida por Calderón y Serpa en 2003, que en un máximo de 11 días de crecimiento en condiciones de laboratorio reportaron una densidad celular de 3.0×10^6 cel/mL.

Para el medio de cultivo Erdschreiber, solo se pudo realizar comparativa con los resultados obtenidos por Tang y colaboradores en 2011, que reportaron 1.2×10^7 cel/mL como densidad celular máxima para *Dunaliella tertiolecta*, mayor a la obtenida en este trabajo. Existen reportes relacionados con el medio de nutrientes, pero en otras especies de microalgas como *Dunaliella salina*, por ejemplo, Mishra, Mandoly y Jha en 2008 reportaron una densidad celular máxima de 5.0×10^5 cel/mL.

La Tabla 7.4 resume los resultados obtenidos en cuanto a la tasa específica de crecimiento celular (μ) y el tiempo de duplicación (td) para la cepa de *Dunaliella tertiolecta* que se obtuvieron a partir de la ecuación matemática (2).

Tabla 7.4 Eficiencia del crecimiento celular de *Dunaliella tertiolecta* empleando dos medios de cultivo

Parámetro determinado	Medio de cultivo Guillard	Medio de cultivo Erdschreiber
μ (d ⁻¹)	0.21 ± 0.02	0.15 ± 0.01
td (d)	3.34 ± 0.29	4.60 ± 0.33

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con ello, la mayor μ y el menor td (lo ideal en cultivos de microalgas con fines energéticos) se obtuvo con el medio de cultivo de Guillard lo que podría implicar que es más eficiente que el medio de cultivo Erdschreiber. Para corroborarlo se realizó un análisis de varianza ANOVA de factor 1 basado en la densidad celular, que con un nivel de confianza de 95% confirmó que no hubo relación en el crecimiento celular de la microalga empleando los medios de cultivo seleccionados y permitió confirmar que efectivamente el medio de cultivo F/2 es más eficiente, adaptable y el recomendado para proseguir los trabajos de investigación donde la prevalencia sea mayor densidad celular para mayor concentración de biomasa en el menor tiempo de duplicación de células de la microalga. Baldiris y colaboradores en 2017 también realizaron un análisis de varianza para determinar la eficiencia de crecimiento de dos microalgas diferentes en un mismo medio de cultivo enriquecido con nutrientes y concluyeron que una de ellas creció de forma más efectiva en el medio de cultivo que la otra microalga, lo que se corroboraba a través de μ y td con los resultados obtenidos en la cinética de crecimiento por conteo diario realizado.

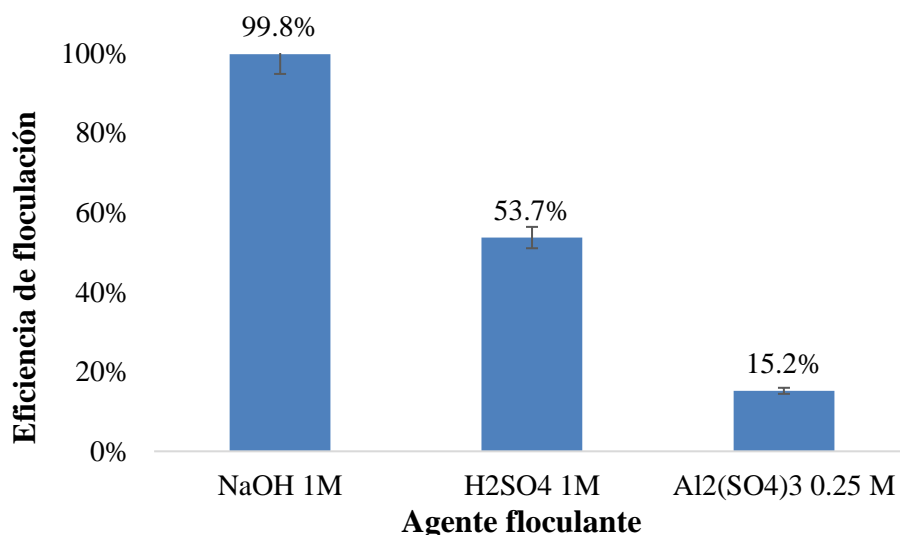
La concentración de los nutrientes en un medio líquido salobre o no es un parámetro que influye considerablemente en la producción de biomasa, principalmente los nutrientes inorgánicos nitrogenados fundamentales para el crecimiento y mantenimiento celular, los fosforados porque limitan significativamente el crecimiento de las microalgas y los silicatos porque contribuyen a funciones de la estructura celular de algunas microalgas por lo que el agregarlos depende de que la especie de microalga a trabajar lo requiera, otros como los micronutrientes orgánicos como las vitaminas también contribuyen ampliamente al crecimiento microalga y producción de lípidos, aun cuando su ausencia no limita el crecimiento de las microalgas.

Por ello, lo que pudo marcar la diferencia de crecimiento de la microalga de trabajo en el medio de cultivo de Guillard respecto al medio de cultivo de Erdschreiber es que, en el primero aun cuando las cantidades agregadas de los nutrientes inorgánicos (macronutrientes) es menor que las agregadas en el segundo medio de cultivo, la concentración de las soluciones stock es mayor para el medio de Guillard lo que permite que sea un medio más enriquecido en nutrientes, además posee silicatos en muy buena proporción lo que contribuye a funciones estructurales de la célula y las tres vitaminas donde la biotina y la tiamina contribuyen mucho a la biosíntesis de los lípidos que se requieren, por lo tanto, el medio Erdschreiber es un medio enriquecido pero más diluido respecto a los nutrientes, es decir deficiente, lo que impacta desfavorablemente en el crecimiento de la microalga, como lo expone López-Elías y colaboradores en 2013 al realizar investigación con *Dunaliella tertiolecta* en medio F/2 con y sin limitación de nitrógeno.

7.11 Extracción de biomasa

La recuperación o extracción de la biomasa se hizo por adición de agentes químicos flocculantes a la suspensión de microalgas provocando cambios en el pH a dicha suspensión, siendo el hidróxido de sodio el agente químico de mayor eficiencia porcentual (99.8 ± 0.3 %) en un tiempo de 24 h, seguido del ácido sulfúrico (53.7 ± 1.2 %) y el de menor eficiencia para la formación de flóculos algales en el mismo tiempo de 24 h, fue el sulfato de aluminio (15.2 ± 3.2 %) pero a concentración molar menor, tal como se representa en el Gráfico 7.2.

Gráfico 7.2 Eficiencia de la floculación para la obtención de la biomasa de la microalga *Dunaliella tertiolecta*



Fuente: Elaboración propia

Lo correcto es: la bibliografía consultada sobre recuperación de biomasa de la microalga *Dunaliella tertiolecta* no establece fines biológicos ni energéticos, esto porque depende del propósito que se persiga en la investigación, por la posibilidad de contaminar la biomasa y por posibles modificaciones en las características de la biomasa, por ello se reportan métodos gravimétricos y otros reportan métodos físicos como filtración y secado. Sin embargo, hay reportes respecto al uso de la floculación con los agentes químicos empleados en este trabajo en otros géneros y especies de microalgas como *Nannochloropsis sp.* que tiene similitud con el género *Dunaliella*. En este sentido, Rojo-Cebreros y colaboradores en 2016 recuperaron la biomasa de una cepa de *Nannochloropsis sp.* para fines acuícolas empleando NaOH 0,5 eq/L (0,5 mol/L) alcanzando una eficiencia de floculación de 94,9 % a pH básico y en menos de 1 h. En otra investigación, Unmalyma en 2016 determinó que el NaOH en un tiempo de 10 min fue el agente químico de mayor floculación (94%) con cambios en el pH de *Chlorococcum sp.* en comparación con el Al₂SO₄ que fue de 87%.

Como se aprecia en el Grafico 7.2 el agregar un agente floculante básico-fuerte como el NaOH no afectara la extracción de los lípidos en la microalga *Dunaliella tertiolecta* ya que la recuperación de la biomasa fue excelente en contraste con la adición del agente floculante ácido que resulto en una reducción de recolección de biomasa de más de 40% y mucho más la sal agregada que presento una nula recuperación a la misma concentración de los dos floculantes anteriores. Esto indica que el hidróxido de sodio es más efectivo en generar flóculos en tiempos de sedimentación cortos debido a que logra rápidamente el rompimiento de las fuerzas de atracción de Van der Waals y las fuerzas de repulsión electrostática que existen en la pared celular, mientras que el sulfato de aluminio puede adherirse a las células de la microalga y sedimentarse con los flóculos que se forman provocando una mayor afinidad electrostática intermolecular.

7.12 Extracción de lípidos y perfil de ácidos grasos

La extracción de lípidos intracelular asistida por sonicación y método Bligh & Dyer arrojó un porcentaje de 33.5 ± 1.1 % una vez alcanzada la disrupción de la pared celular en 20 min y 40Hz de potencia y la cantidad de biomasa generada por unidad de volumen de cultivo fue de 7.813 mg/Ld. En 2012, Nowotarski y colaboradores usaron solo sonicación para la disrupción celular de *Dunaliella salina* lograda en un tiempo de 16 min, similar a lo obtenido en este trabajo. En el caso del método de Bligh & Dyer, Araujo y colaboradores en 2013 determinaron de seis métodos ensayados que sonicación con Bligh & Dyer es el de mayor eficiencia (52,5 %) para la extracción de lípidos en *Chlorella vulgaris*.

La cromatografía de gases realizada arrojo nueve ácidos grasos distribuidos en: cinco ácidos grasos saturados constituidos por cadenas carbonadas de C12 a C18 y cuatro ácidos grasos insaturados conformados por dos monoinsaturados (C17:1, C18:1) y dos poliinsaturados (C18:2, C18:3) como se muestra en la Tabla 7.5, en la cual están ordenados en función de su concentración porcentual decreciente y su nomenclatura abreviada.

Tabla 7.5 Perfil de ácidos grasos presente en la cepa de la microalga *Dunaliella tertiolecta*

Ácido graso	Nomenclatura	% presente
SATURADOS		
Hexadecanoico (Palmítico)	C16:0	21.2 ± 0.3
Octadecanoico (Esteárico)	C18:0	11.2 ± 0.1
Heptadecanoico	C17:0	8.9 ± 1.7
Pentadecanoico	C15:0	2.9 ± 0.9
Dodecanoico (Láurico)	C12:0	1.6 ± 0.2
Total:	45.8 ± 0.6	
INSATURADOS		
9,12,15-octadecatrienoico (Linolénico)	C18:3 ^{9,12,15}	37.2 ± 1.1
9,12-octadecadienoico (Linoleico)	C18:2 ^{9,12}	8.0 ± 0.1
9-octadecenoico (Oleico)	C18:1 ⁹	6.6 ± 0.1
Cis-10-Heptadecenoico	C17:1	2.4 ± 0.0
Total:	54.2 ± 0.3	

Fuente: Elaboración propia

Se aprecia que, hay una mayor composición porcentual de ácidos grasos insaturados siendo el ácido linolénico el de mayor contribución, mientras que en los ácidos grasos saturados lo es el ácido palmítico, lo cual es similar al perfil de ácidos grasos reportado por Hoekman y colaboradores en 2012 y Tang y colaboradores en 2011 para la misma microalga cultivada en medio de nutrientes de Guillard pero con condiciones de laboratorio diferentes a las realizadas en este trabajo y con fines biotecnológicos.

Es nula la información que existe acerca de la producción de biodiesel a partir de *Dunaliella tertiolecta* y de otras especies de microalgas que pueden ser de interés para tal fin, solo se hacen inferencias de la influencia de los ácidos grasos obtenidos sobre las propiedades fundamentales de dicho combustible tal como la estabilidad oxidativa.

Bajo esa temática, el perfil de ácidos grasos de *Dunaliella tertiolecta* obtenido con las condiciones de crecimiento y extracción de biomasa y lípidos establecidas en este trabajo puede considerarse con potencial para la producción de biodiesel ya que contiene los principales ácidos grasos utilizados como insumos: palmítico, esteárico como parte de los saturados, oleico, linoleico como insaturados, los cuales no cambiarán una vez obtenido el biodiesel por transesterificación química, pero sí influirán en propiedades específicas del combustible como la estabilidad oxidativa, punto de niebla, número de cetano, viscosidad y calor de combustión y por consecuencia en el desempeño en un motor diésel (Moreira, 2012).

Tejada y colaboradores en 2015 analizaron la influencia del perfil lipídico de la microalga *Dunaliella salina* y *Chlorella sp.* sobre propiedades del biodiesel, donde el ácido linolénico es el de mayor porcentaje y concluyeron que la estabilidad oxidativa se afectaría principalmente cuando el combustible se almacene por tiempo prolongado, lo cual se corrige agregando compuestos antioxidante sintéticos o resguardarlo en ambientes con poca luz y corrientes de aire. También indican que un mayor porcentaje de ácidos grasos insaturados favorece la operatividad del biodiésel como combustible a bajas temperaturas ya que este tipo de ácidos grasos presentan menor punto de fusión lo que brinda mayor fluidez del biodiésel en el motor.

Es aceptable efectuar comparativa del perfil de ácidos grasos obtenido de microalgas con perfil de ácidos grasos obtenidos a partir de aceites vegetales puros y/o grasas animales, porque finalmente la estructura química de los ácidos grasos se mantiene. Moreira en 2012 reporta que el biodiésel a partir del aceite vegetal de soja el cual tiene contenido significativo de ácido linolénico cumple con el valor mínimo de estabilidad oxidativa (3 h) establecido en la norma de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM por sus siglas en inglés) por las cuales también se rige México en los lineamientos para la obtención de etanol anhidro, biodiésel y bioturbosina puros a partir de 2018. El biodiésel obtenido presenta propiedades excelentes de baja temperatura como punto de niebla.

Otro parámetro importante que por consecuencia de la estabilidad oxidativa se afecta, es el número de cetano (C₁₆H₃₄), que se evalúa mediante dos valores, el de alto estándar de calidad (no ramificado, con valor máximo de número de cetano (NC) de 100, 47 como valor mínimo) y el de baja calidad de ignición (ramificado, NC 15) de acuerdo con normas ASTM. Moreira reporta que el biodiesel de aceite de soja presenta un NC por encima del valor mínimo establecido (51). Tejada en 2013 analizó el perfil lipídico del biodiesel a partir de residuos grasos de pollo que presentó mayor concentración de ácidos grasos insaturados describiendo lo mismo, baja estabilidad oxidativa pero buena fluidez a baja temperatura.

Aun cuando se describe que el perfil lipídico de una microalga del mismo género o de otro, de un cultivo vegetal o de una grasa animal pueden coincidir, es también cierto que en las microalgas, éste siempre será afectado por las condiciones nutrimentales (como el déficit de nitrógeno y/o fósforo), condiciones de cultivo (como estrés salino) y ambientales (temperatura, pH) por ello, Arias y colaboradores en 2013 propusieron que para garantizar los parámetros fundamentales exigidos para biodiésel de calidad o puro, lo más conveniente sería una mezcla de aceites producidos por diferentes géneros de microalgas ya que el objetivo de la bioenergía es poder desarrollar un proceso viable y factible en lo económico y energético que pueda ser competitivo con los combustibles fósiles.

Pinzi y colaboradores en 2009 concluyeron que la composición óptima para biodiésel con los parámetros ideales que eviten daños a un motor sería aquella especie de microalga que pueda proporcionar bajo contenido de ácidos grasos saturados para lograr mayor densidad (lo cual se obtuvo en este trabajo), altos porcentajes de ácidos grasos monoinsaturados para estabilidad oxidativa ideal lo cual implicaría bajos niveles de ácidos grasos poliinsaturados. Hoekman en su investigación en 2012 concluye que es imposible definir un perfil de ácidos grasos ideal en un ser vivo como las microalgas que cumpla con parámetros definidos, establecidos y deseables en el biodiésel, siendo lo más recomendable una estabilidad proporcionada entre ácidos grasos saturados e insaturados minimizando los poliinsaturados. Lo más recomendable finalmente, es caracterizar los lípidos para determinar grado de acidez y porcentaje de humedad, producir el biodiésel y determinar los parámetros fisicoquímicos de alto impacto bien para uso único como combustible o bien mezclado con diésel de petróleo.

7.13 Agradecimientos

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por apoyo de beca otorgado a uno de los integrantes para realizar estudios de posgrado (Maestría), al Programa para el Desarrollo Profesional Docente para el tipo Superior (PRODEP) por apoyo a proyecto Nuevo PTC y a Laboratorios de la U.A. de Ingeniería en Biotecnología UPSIN, México por préstamo de equipos y materiales para la realización de varios ensayos necesarios en este trabajo.

7.14 Conclusiones

Se determinó que el medio de nutrientes de Guillard es el ideal para la cepa de microalga *Dunaliella tertiolecta* ya que presentó densidad celular, absorbancia, tasa de crecimiento y tiempo de duplicación dentro de los rangos publicados en investigaciones referentes, además de proporcionar una muy buena cantidad de biomasa. El medio Erdschreiber también es recomendable de acuerdo con los resultados obtenidos, pero posiblemente brinde una mayor tasa de crecimiento en función del tiempo modificando algunos parámetros fundamentales como la intensidad de luz y el fotoperiodo de forma tal de estudiar el comportamiento de propagación de la microalga más allá del día once o que en ese tiempo mejore la densidad celular promedio.

La floculación con hidróxido de sodio resultó ser un agente químico excelente para la extracción de la biomasa microalgal, lo que representa un aporte de esta investigación, ya que la literatura solo la reporta para microalgas del género *Nannochloropsis* y los métodos de recuperación de la biomasa generada por *Dunaliella* y otros géneros requieren de mayor tiempo lo que hace que el gasto energético se incremente. A partir de la metodología implementada se logró un alto porcentaje de recuperación de biomasa microalgal en un tiempo bastante corto, además el hidróxido de sodio es un compuesto químico bastante económico y de fácil adquisición.

La obtención de la biomasa microalgal conllevó a la extracción de la fracción lipídica celular empleando la sonicación combinada con una extracción con solventes a partir del método Bligh & Dyer y lograr en un tiempo de veinte minutos que toda la biomasa expuesta quedara completamente seca.

El perfil de la fracción lipídica obtenida estuvo compensado por la presencia de ácidos grasos saturados y en mayor proporción por los ácidos grasos insaturados lo cual coincide con pocas investigaciones referentes a la misma especie de microalga de este trabajo (*Dunaliella tertiolecta*), de otras especies del mismo género como *Dunaliella salina*, de otros géneros de microalgas y de cultivos vegetales como la soja y grasas animales residuales. El perfil obtenido contiene porcentajes muy aceptables de los ácidos grasos idóneos (C12 a C18) para la transesterificación y obtención de biodiésel, en cuyo caso el paso siguiente es llevar a cabo dicha producción y caracterizar el producto a través de los parámetros fisicoquímicos fundamentales establecidos en los lineamientos mexicanos anexos a la Ley para la promoción y desarrollo de los bioenergéticos para entonces conocer la influencia del ácido linolénico (el de mayor proporción en el perfil obtenido) sobre la estabilidad oxidativa que es la de mayor impacto en el uso del combustible bien sea puro o mediante compensación si se mezclara con el diésel fósil.

A partir de los resultados, la cepa de la microalga *Dunaliella tertiolecta* analizada tiene potencial energético para la producción de biodiésel de tercera generación bajo las condiciones de trabajo descritas, sin embargo, esto quedaría totalmente establecido una vez analizada la estabilidad oxidativa bien sea a partir de la caracterización de los lípidos o la producción de biodiésel. Finalmente, y con base en el análisis se puede determinar la viabilidad de la escala piloto bajo condiciones ambientales y el aprovechamiento de la energía solar de la región de Sinaloa para aminorar costos en producción masiva.

7.15 Referencias

Andía-Cárdenas, Y. (2000). Tratamiento de agua. Coagulación y floculación. SEDAPAL S.A. Lima, Perú. Recuperado de: <http://www.sedapal.com.pe>.

Arana, I., Orruño M., Barcia I. (2012). Diluciones y concentraciones. Muestras líquidas y sólidas en Cómo abordar y resolver aspectos prácticos de microbiología. Departamento de inmunología.

Microbiología y parasitología, Universidad del País Vasco. ISSN: 2255-2316. Recuperado de: <https://ocw.ehu.eus/course>.

Araujo, G. S., Matos, L., Fernandes, J., Cartaxo S., Gonçalves L. R.B., Fernandes F., Farias, W. (2013). Extraction of lipids from microalgae by ultrasound application: Prospection of the optimal extraction method. *Ultrason Sonochem*, 20(1) 95-99. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2012.07.027.

Archanaa, S., Moise, S., Suraishkumar, G. K. (2012). Chlorophyll interference in microalgal lipid quantification through the Bligh and Dyer method. *Biomass and Bioenergy*, 46, 805-808. DOI: 10.1016/j.biombioe.2012.07.002.

Arias, M. T., Martínez, A.J., Cañizares, R. O. (2013). Producción de biodiesel a partir de microalgas: Parámetros del cultivo que afectan la producción de lípidos. *Acta Biol. Colomb*, 18(1), 43-68. ISSN: 1900-1649.

Baldiris-Navarro, I., Sanchez Aponte, J. H., Torres Virviescas, M. (2017). Validation, characterization and comparison of microalgae *Chlorella vulgaris* and *Chlamydomona reinhardtii* growth kinetics. *International. Journal. of Chem Tech Research*. 10(15), 411-420. ISSN: 2455-9555.

Calderón, A., Serpa, F. (2003). Efectos del paraquat sobre el crecimiento y la morfología de la microalga *Dunaliella tertiolecta*. *Ecol. Apl.*, 2(1), 99-102. ISSN: 1726-2216.

Chen, M., Tang, H., Ma H., Holland, T., Simon, K., Salley, S. (2011). Effect of nutrients on growth and lipid accumulation in the green algae *Dunaliella tertiolecta*. *Bioresource Technology*, 102(2), 1649-1655. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.09.062.

Comisión Reguladora de Energía. (18/12/2019). Resolución Núm. RES/1817/2019: resolución de la comisión reguladora de energía que otorga a Pemex transformación industrial una ampliación al plazo para el cumplimiento de la especificación de contenido de azufre en el diésel automotriz, previsto en la norma oficial mexicana NOM-016-CRE-2016, especificaciones de calidad de los petrolíferos. Recuperado de: <http://drive.cre.gob.mx>.

Comisión Reguladora de Energía, (2018). Acuerdo A/065/2018. Recuperado de: <https://www.gob.mx/cre/prensa>.

Coutteau, P. (2013). *Algal production in Micro-Algae*. Food and Agriculture Organization.

Diario Oficial de la Federación. (29/08/2016). Acuerdo por el que la CRE expide la Norma Oficial Mexicana NOM-016-CRE-2016, Especificaciones de calidad de los petrolíferos. Recuperado de: <https://www.dof.gob.mx>.

Diario Oficial de la Federación. (22/10/2018). Lineamientos por los que se establecen las especificaciones de calidad y características para etanol anhidro (bioetanol), biodiésel y bioturbosina puros. Recuperado de: <https://www.dof.gob.mx>.

El Arroussi, H., Benhima, R., Bennis, I., El Mernissi, N., Wahby, I. (2015). Improvement of the potential of *Dunaliella tertiolecta* as a source of biodiesel by auxin treatment coupled to salt stress. *Renewable energy*. 77, 15-19. DOI: 10.1016/j.renene.2014.12.010.

Estrada, G. (2013). Evaluación del potencial uso de biomasa de las diferentes cepas de microalgas del Atlántico de Guatemala en diferentes áreas de la industria (Tesis de Maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala) Repositorio institucional Universidad de San Carlos de Guatemala. Disponible en: <http://www.repositorio.usac.edu.gt/7782/1>.

Godoy-Hernández, G., Vázquez-Flota, F.A. (2006). Growth measurements. En Loyola-Vargas V.M., Vázquez-Flota F. (Eds) *Plant Cell Culture Protocols*. Methods Mol Biol. 318. Pp. 51-58. Humana Press. ISBN: 978-1-59259-959-2.

Harith, Z.T., Yusoff, F.M., Mohamed, M. S., Shariff, M., Din, M., Ariff, A. B. (2009). Effect of different flocculants on the flocculation performance of microalgae, *Chaetoceros calcitrans*, cells. *African J. of Biotechnology*, 8 (21), 5971-5978. DOI: 10.5897/AJB09.1396.

Hoekman, K. S., Broch A., Robbins, C., Cenicerros, E., Natarajan, M. (2011). Review de biodiesel composition, properties, and specifications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16(1), 143-169. DOI: 10.1016/j.rser.2011.07.143.

Instituto Mexicano para la Competitividad A.C. (IMCO). (2015). La NOM 044: retos y oportunidades para su cumplimiento. Recuperado de: <https://imco.org.mx>.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2018). Informe Nacional de Calidad del Aire 2017, México. Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación de Calidad del Aire y Contaminantes Climáticos. Ciudad de México, México. Recuperado de: <https://sinaica.inecc.gob.mx>.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2019). Impacto ambiental del contenido de azufre en el diésel vehicular comercializado en México. Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación de Calidad del Aire y Contaminantes Climáticos. Ciudad de México, México. Recuperado de: <https://www.gob.mx>.

King, P.M. (2014). The use of ultrasound on the extraction of microalgal lipids. Tesis de Coventry University, Coventry: Disponible en: <https://curve.coventry.ac.uk>.

Liu, J., Tao, Y., Wu, J., Zhu, Y., Gao, B., Tang, Y., Li, A., Zhang, C., Zhang, Y. (2014). Effective flocculation of target microalgae with self-flocculation microalgae induced by pH decrease. *Bioresource Technol*, 167, 367-375. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.06.036.

López-Elías J.A., Fimbres-Olivarría, D., Medina-Juárez, L.A., Miranda-Baeza, A., Martínez-Córdova, L.R., Molina-Quijada, D.M.A. (2013). Producción de biomasa y carotenoides de *Dunaliella tertiolecta* en medios limitados en nitrógeno. *PHYTON Int. J. of Exp. Botany*, 82, 23-30. ISSN: 0031 9457.

Melgar México. Datos del parque vehicular en México, septiembre 30 de 2019, 9:05 AM <https://www.portalautomotriz.com>.

Moreira, E. (2012). Principales características de las materias primas utilizadas en la producción de biodiesel: la influencia del contenido y la concentración de los ácidos grasos. *Ingenium Rev. Fac. Ing.* 13(25), 53-61- DOI: 10.21500/01247492.1307.

Neto, C.R.L.A.L., Silva, P.E.C., Bezerra, R.P., Marques, D.A.V., Neves, A.L.S., Neto, N.S.O., Carvalho, J.C.M., Porto, A.L.F. (2012). Effects of different cultures medium on *Dunaliella tertiolecta* Growth. 52 Congreso Brasileiro de Química. Recuperado de: <http://www.abq.org.br>.

Nowotarski, K., King, P.M, Joyce E.M., Mason T.J. (2012). Ultrasonic disruption of algae cells. *AP Conference Proceedings*. 1433.

Oficina de Eficiencia Energética y Energía Renovable USA (2010) Ultra-Low Sulfur Diesel. Recuperado de: <https://www.fueleconomy.gov>.

Pinzi, S., García, I.L., López-Gimenez, F. J., Luque, M.D., Dorado G., Dorado, M.P. (2009). The ideal vegetable oil-based biodiesel composition: A review of social, economic and technical implications. *Energy Fuels*, 23(5), 2325-2341. DOI: 10.1021/ef801098a.

Ramírez, G. (18/12/2019). CRE permite a Pemex seguir produciendo diésel sucio por cinco años más. *El Sol de México*. Recuperado de: <https://www.elsoldemexico.com.mx>.

Rojo-Cebreros, A.H., Morales-Plascencia, M. E., Ibarra-Castro, L., Martínez-Brown, J.M, Medina-Jasso, M.A. (2016). Floculación de *Nannochloropsis* sp. inducida por hidróxido de sodio: eficiencia de floculación, efecto sobre la viabilidad microalgal y su uso como alimento para rotíferos. *Lat. Am. J. Aquat. Res.* 44(4), 662-670. DOI: 10.3856/vol44-issue4-fulltext-1.

Sánchez-Bayo, A. (2019). Biorrefinería de microalgas para la producción de biocombustibles (Tesis de Doctorado, Universidad Rey Juan Carlos). Repositorio institucional Universidad Rey Juan Carlos. Disponible en: <https://ciencia.urjc.es/handle/10115/16209>.

Secretaría de Energía (2015). Refinación. Recuperado de: <https://www.gob.mx/sener>.

Secretaría de Energía. (2019). Balance Nacional de Energía 2018. Subsecretaría de Planeación y Transición Energética, Dirección General de Planeación e Información Energéticas. Ciudad de México, México. Recuperado de: <https://www.gob.mx>.

Shuping, Z., Yulong, W., Mingde, Y., Kaleem, I., Chun, L., Tong, J. (2010). Production and characterization of bio-oil from hydrothermal liquefaction of microalgae *Dunaliella tertiolecta* cake. *Energy*, 35 (12), 5406-5411. DOI: 10.1016/j.energy.2010.07.013.

Soto-León. S., Zazueta-Patrón, I. E., Piña-Valdez, P., Nieves-Soto, M., Reyes-Moreno, C. y Contreras-Andrade I. (2014). Extracción de lípido de *Tetraselmis suecica*: proceso asistido por ultrasonido y solventes. *Rev Mex Ing Quím*, 13(3), 723-737. ISSN: 1665-2738.

SP Industries Inc. (2009). Freeze dryer operator's manual. Recuperado de: <https://www.americaninstrument.com>.

State Key Laboratory of Marine Environmental Science (MEL), Xiamen University. 2015. f/2 Medium (Guillard and Ryther 1962, Guillard 1975). Recuperado de: <https://mel.xmu.edu.cn>

Suarsini, E., Sunbandi. (2011). Utilization ultrasonic to increase the efficiency of oil extraction for microalgae indigenous isolates from pond Gresik, east Java. Proceedings of the 2011 IEEE Conference on Clean Energy and Technology (CET).

Talebi, A. F., Mohtashami, S. K., Tabatabaei, M., Tohidfar, M., Bagheri, A., Zeinalabedini, M., Mirzaei, H. H., Mirzajanzadeh, M., Shafaroudi S. M., Bakhtiari, S. (2013). Fatty acids profiling: A selective criterion for screening microalgae strains for biodiesel production. *Algal Research*, 2(3), 258-267. DOI: 0.1016/j.algal.2013.04.003.

Tang, H., Abunasser, N., Garcia, M. E. D., Chen, M., Simon Ng, K. Y. y Salley, S. O. (2011). Potential of microalgae oil from *Dunaliella tertiolecta* as a feedstock for biodiesel. *Applied Energy*, 88(10), 3324-3330. DOI: 10.1016/j.apenergy.2010.09.013.

Tejada, C., Tejada-Benítez, L., Villanova A., Monroy, L. (2013). Obtención de biodiesel a partir de diferentes tipos de grasa residual de origen animal. *Rev. Luna Azul* (36).10-25. ISSN: 1909-2474.

Tejada-Benítez, L. Henao-Argumedo D., Alvear-Alayón M., Castillo-Saldarriaga C. R. (2015). Caracterización y perfil lipídico de aceites de microalgas. *Rev. Fac. Ing.* 24(39), 43-54. ISSN 0121-1129.

Ummalyma S.B., Matthew, A. K. Pandey, A. Sukumaran, K. (2016). Harvesting of microalgal biomass: Efficient method flocculation through pH modulation. *Bioresource Technology*. 213, 216-221. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.03.114.

Universidad de Texas. Culture Collection of Algae at the University of Texas at Austin, USA. Recuperado de: <https://utex.org/product>.

Universidad de Waterloo. Canadian Phycological Culture Centre for algae, cyanobacteria and lemma. Recuperado de: <https://uwaterloo.ca/canadian-phycological-culture-centre/cultures>.

Capítulo 8 El comportamiento del consumidor ante la oferta de productos ecológicos en bebidas embotelladas en el sur de Tamaulipas

Chapter 8 Consumer behavior when faced with the offer of organic products in bottled beverages in southern Tamaulipas

GONZALEZ-DURAN, Nora Hilda†*, MARTINEZ-GARCIA , María Elena y GUZMAN-GARCIA, Juan Carlos

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Departamento de Arquitectura.

ID 1^{er} Autor: *Nora Hilda, González-Duran* / **ORC ID:** 0000 0002 6139 3958, **CVU CONACYT ID:** 504760

ID 1^{er} Coautor: *María Elena, Martínez-García* / **ORC ID:** 0000 0001 5869 0444, **CVU CONACYT ID:** 250048

ID 2^{do} Coautor: *Juan Carlos, Guzman-García* / **ORC ID:** 0000 0003 2284 0716, **CVU CONACYT ID:** 617925

DOI: 10.35429/H.2020.5.3.104.114

N. Gonzalez, M. Martinez y J. Guzman

nhgonzaleocentes.uat.edu.mx

A. Marroquín, J. Olivares, L. Cruz y A. Bautista. (Coord) Ciencias ambientales, uso de recursos. Handbooks-©ECORFAN-Mexico, Querétaro, 2020.

Resumen

Este trabajo de investigación nos permite el ofrecimiento de información respecto al mercado actual condicionado a la oferta de bienes sustentables en el mercado. Esta investigación fomenta dirigir la atención hacia a los nuevos comportamientos de los consumidores de una manera óptima para la mejora del entorno social y comercial. Los consumidores verdes como se les conoce a este tipo de mercado brindan nuevos patrones conductuales para la implementación de nuevas estrategias comerciales, en tanto a la sociedad este sector consigue ser un ideal a seguir por parte de los otros consumidores, aunque estos no pertenezcan a este mismo segmento, dado que este mercado representa una gran oportunidad para modificar los modelos de conducta de este segmento meta y de la sociedad en general. En tal investigación se exponen las características psicográficas que los consumidores poseen, mismas que consiguen influenciar en las decisiones de compra en el momento de la consecución de adquirir un producto. El comportamiento de un mercado en específico representa la base del movimiento del comercio, es por ello por lo que se le sugiere a cada uno de los lectores de esta información recordar constantemente que el recurso principal en la cadena comercial es el consumidor y como tal es de suma importancia siempre estar en función a lo que el mercado demande.

Comportamiento, Consumidor, Productos ecológicos

Abstract

This research work allows us to offer information regarding the current market conditioned on the supply of sustainable goods in the market. This research encourages directing attention to new consumer behaviors in an optimal way to improve the social and business environment. Green consumers as they are known to this type of market provide new behavioral patterns for the implementation of new commercial strategies, while in society this sector manages to be an ideal to be followed by other consumers, even if they do not belong to this same segment, given that this market represents a great opportunity to modify the behavior models of this target segment and of society in general. In such research, the psychographic characteristics that consumers possess are exposed, which manage to influence purchasing decisions at the time of purchasing a product. The behavior of a specific market represents the basis of the movement of trade, which is why it is suggested to each of the readers of this information to constantly remember that the main resource in the commercial chain is the consumer and as such is of most important always be in function of what the market demands.

Behavior, consumer, organic products

8. Introducción

El consumo de productos embotellados tiene un gran significado en el ámbito ambiental y empresarial pues de ello se despliegan elementos influyentes en los indicadores de índice de ventas e índices de contaminación.

Para la producción de botellas recicladas es necesario el uso de un plástico en específico denominado PET (tereftalato de polietileno) por sus siglas en inglés.

El PET ha constituido un gran competidor frente al uso de botellas de vidrio respecto a la oferta de bebidas embotelladas dado que es más factible tratar este tipo de material y es más fácil de comercializar en el mercado incluso a nivel mundial.

Mansilla L. y Ruíz M. (2009) mencionan respecto al sector de Lima en Perú que “los últimos años se caracterizaron por una atractiva demanda interna, que benefició a la industria de bebidas gaseosas” misma demanda se ha podido observar a nivel mundial incluyendo en ella los mercados de agua y jugos embotellados.

Por su parte Takahashi H. (2017) columnista de la revista Forbes México señala que:

“una de las grandes preocupaciones que tienen los países desarrollados es la cantidad de productos PET que se elaboran y no se reciclan, así como la contaminación que provocan y los riesgos a la flora y fauna de todo el planeta”.

Para que una botella de plástico se considere como una botella PET debe pasar por un proceso de producción en especial.

Mansilla L. y Ruíz M. (2009) mencionan que dicho proceso es el siguiente:

- Inspección

Revisión de la materia prima de calidad.

- Lavado
- Secado

Las empresas a nivel mundial han optado por invertir en este tipo de producción pues para ellos representa una iniciativa para ayudar al medio ambiente portando una imagen de Empresa Socialmente Responsable (ESR) y sobre todo la gran oportunidad para acrecentar los segmentos de mercado a los cuales están dirigidos obteniendo mayor ganancia y participación de mercado.

Como tal el uso de PET en la industria de bebidas embotelladas ha tenido una favorable aceptación en el mercado, con ello incrementando el uso de este tipo de material para la fabricación de los envases, es por ello que se busca disminuir los daños que se pudieran generar al medio ambiente al utilizar este agente (PET) en la industria de las bebidas atendiendo de la mano la demanda que los consumidores hacen a las empresas fabricantes de estos productos.

8.1 Definición del Problema

Existe una gran preocupación acerca del cuidado del medio ambiente la cual trata de ser solucionada desde diversas áreas, uno de los grandes factores por los cuales se afecta al entorno ambiental es debido a la excedente cantidad de residuos plásticos que produce la sociedad (consumidores) agentes tóxicos que alarmantemente cada vez son más empleados en el uso cotidiano. Dicho problema no solamente se genera ante el uso de dichos productos, sino que también se deben a las malas prácticas que se emplean para deshacerse de los residuos de PET y los procesos de fabricación de dichas botellas.

Por otra parte, los factores que contribuyen a dicha situación es la falta de difusión de actividades a través de campañas que remuevan el interés del cuidado ambiente desde la perspectiva de adquirir productos que contribuyan a eliminar esta problemática.

8.2 Objetivos de la investigación

8.3 Objetivo general

- Analizar el comportamiento del consumidor en base a la oferta en el mercado de bebidas embotelladas ecológicamente.

8.4 Objetivos específicos

- Generar un perfil del consumidor actual de productos sustentables (PET).
- Determinar el factor principal en el proceso de compra del consumidor, respecto a este tipo de oferta ecológica.
- Identificar el nivel de conocimiento que el consumidor presenta ante los productos ecológicos y su contribución al cuidado del medio ambiente.

8.5 Supuesto

Los consumidores presentan una baja percepción acerca de los productos producidos ecológicamente, por ende, el mercado verde no cuenta con respaldo que le permita crecer en esta forma de comercio.

Basado en ello al identificar las características que tiene este ejemplo de consumidor, el nivel de percepción con el que él cuentan respecto a los productos ecológicos, se puede difundir la información adecuada acerca de este tipo de productos, las empresas pueden partir de este punto para lograr incursionar en este nuevo mercado o mejorar las estrategias de venta a dicho segmento

8.6 Justificación

La contaminación ambiental es una trágica realidad no solamente en nuestra zona sur de Tamaulipas también se puede ver reflejada a nivel mundial.

Para hacer frente a tal alarmante escenario diversas empresas se han visto interesadas ante tan inquietante contexto por ello han tratado de implementar técnicas, así como ofertar productos que sean eco amigables con el entorno ambiental.

Es aquí donde la mercadotecnia tiene un papel importante en este ciclo de venta al consumidor, por lo tanto, con esta investigación se logra identificar cuáles son las variables que interfieren el proceso de compra de los productos que son ofertados en el mercado como sustentables. Como tal el presente estudio de investigación permitirá identificar los factores que influyen en la decisión de compra de productos conocidos como verdes (ecológicamente sustentables).

8.7 Delimitaciones

La presente investigación se desarrolló en el Sur de Tamaulipas en la Ciudad de Tampico, específicamente en la zona centro en el periodo de agosto 2018-2019 dicha información se recabo aplicando el uso de un instrumento de medición (encuesta).

8.8 Enfoque Teórico

8.9 Teoría del comportamiento del consumidor

Kotler P. y Armstrong G. (2012) proponen una clasificación de los factores que influyen en el comportamiento del consumidor:

8.10 Factores culturales

En el cual la cultura se entiende como el conjunto de valores, percepciones, deseos y comportamientos básicos que un miembro de la sociedad aprende de su familia y otras instituciones significativas.

8.11 Factores sociales

El consumidor se ve influenciado por parte de los grupos sociales que le rodean como lo pueden ser: familia, amistades inclusive la postura que tiene ante la sociedad basada en el status.

8.12 Factores personales

La decisión de compra se genera a partir de la edad, ocupación, estilo de vida, personalidad y poder de adquisición.

8.13 Factores psicológicos

Las elecciones de compra de una persona también reciben la influencia de cuatro factores psicológicos fundamentales: motivación, percepción, aprendizaje, y creencias-actitudes.

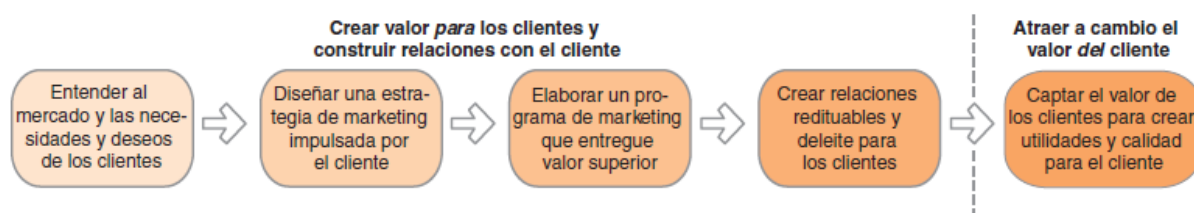
Desde esta perspectiva, el consumidor actual ha tomado una nueva dirección respecto a la adquisición de productos, interfiriendo en dicha compra factores además del precio: diseño del producto, ergonomía, accesibilidad de compra, tipo de empaque y tiempo de vida del producto estos dos últimos factores relacionados a la calidad del material e implícitamente los procesos de fabricación.

Por ende, se analizan las diversas ofertas existentes en el mercado las cuales son acorde a las necesidades de los consumidores y nuevas tendencias que se generan en el entorno como en el plano actual, lo es la oferta de bienes ecológicamente sustentables para beneficiar al consumidor con productos que empleen en su cotidianidad como lo son las bebidas embotelladas las cuales cubren una necesidad básica del ser humano pero que de igual manera pueden llegar a generar un status social para el consumidor.

8.14 Mercadotecnia Sustentable (Verde)

Para Kotler P. y Armstrong G. (2008) la mercadotecnia se define como un proceso que permite a la empresa crear valor con los clientes los cual les permitirá a los consumidores generar lealtad hacia ellos tal como se muestra a continuación en la figura 8.1.

Figura 8.1 Modelo simple del proceso de marketing Kotler P. y Armstrong G. (2008), Fundamentos de Mercadotecnia, Cap.5, pág. 5.



Comprender las necesidades y demandas del mercado es primordial pues de ahí partirán las diversas estrategias de mercadotecnia que se emplearán para ofrecer productos y servicios existentes al mercado. En dicho modelo se presentan cinco etapas de las cuales la última es de gran significancia pues el generar valor para los clientes para las empresas es traducido como ventas de importancia, imagen corporativa óptima para la sociedad y principalmente la consolidación de una estrecha relación con los clientes y fidelidad por parte de los mismos. Atendiendo las necesidades del mercado e identificando los cambios climáticos es cómo surge la mercadotecnia sustentable.

Peattie K. (1995) define como mercadotecnia verde como:

“Un proceso de gestión integral, responsable de la identificación, anticipación y satisfacción de las demandas de los clientes y de la sociedad de una forma rentable y sostenible”. Por su parte Elkington J. (1997) propone el Triple Bottom Line (Triple resultado final) el cual surge de las siguientes variables:

People (Personas)

Planet (Planeta)

Profit (Lucro)

El Triple Bottom Line es un concepto que pretende establecer la relación que existe de la perspectiva financiera de la empresa, el proceso de inclusión de la sociedad y el cuidado ambiental por el cual se trata de cumplir con los objetivos financieros de la organización y cubrir las necesidades y deseos de los consumidores de un mercado en específico. Como tal la mercadotecnia sustentable es la satisfacción que se les da a los consumidores al ofertarles bienes y servicios que sean amigables con el entorno ambiental.

8.15 Metodología

8.16 Enfoque de investigación

La presente investigación se hará uso del método mixto el cual consta de los aspectos cuantitativos y cualitativos.

Puesto que la información se obtendrá basada en elementos perceptibles por el sujeto de investigación, los cuales serán recolectados de un instrumento de medición que permita su interpretación, así como su análisis por medio de una ponderación establecida previamente a dicho instrumento.

8.17 Tipo de investigación

De acuerdo con R. Jiménez (1998) existen tres tipos de investigación basados en el alcance de resultados que estos tengan, las cuales son:

Exploratoria: En la cual se indaga sobre temas de los cuales se desconoce el surgimiento del problema.

Descriptiva: En este tipo de investigación se tiene una base previa sobre la generación del problema a investigar, pese a ello se necesita esclarecer aún más el núcleo del problema.

Explicativa: Este tipo de estudio se basa en la identificación total de la problemática en la que se busca determinar la relación existente entre la causa y el efecto que esto pudiera tener.

8.18 Población y muestra

En primera instancia y de acuerdo con M. Triola (2014), la “población es la colección completa de todos los elementos (puntuaciones, personas, mediciones, etcétera) a estudiar”.

Para efectos de esta investigación la población a estudiar será la perteneciente a la ciudad de Tampico, Tamaulipas, México.

Partiendo de este punto, se tomará una muestra significativa concerniente a la población antes mencionada.

Para ser efectiva esta investigación, se seleccionó una muestra perteneciente a la zona centro de la ciudad de Tampico, Tamaulipas por así convenir al presente trabajo.

Los sujetos de investigación fueron seleccionados por un muestreo a conveniencia.

Para obtener la muestra para estudiar se aplicó la fórmula de muestreo para población infinita establecida por A. Del Cid, R. Méndez y F. Sandoval (2011):

$$n = \frac{Z^2 P Q}{e^2} \tag{1}$$

En donde:

$$n = \frac{(1.96)^2 (0.50) (0.50)}{(0.05)^2} = 384.16$$

8.19 Tipo de Muestreo

Para efectos de la presente investigación se hizo uso del muestreo por conveniencia, que de acuerdo con Enric M. y Jordi C. (2003) “Consiste en la elección por métodos no aleatorios de una muestra cuyas características sean similares a las de la población objetivo”.

8.19 Técnicas de recolección de datos

El propósito del presente es detallar el instrumento aplicado a la comunidad correspondiente a la zona centro de ciudad Tampico para la recolección de datos para efecto de la investigación.

8.20 Método de análisis de datos

Para fines de esta investigación al ser del ámbito de estadística descriptiva se empleará la distribución de frecuencias para el análisis de los datos pertinentes de la presente investigación.

8.21 Resultados de la investigación

Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla de acuerdo al orden cronológico de la encuesta.

8.22 Tabla de Análisis de los Resultados

Características	% porcentaje mas alto de acuerdo a la encuesta	
Segmento de edad	22- 25 años	38%
Genero	femenino	58.1%
Ocupacion	estudiantes	42.2%
Tipo de envase	plastico	68.5%
Razon de compra al tipo de envase	Por facilidad de uso y transporte 30%	
Preferencia para el uso de embotellado en bebidas	Vidrio	44%
Actividad posterior con el envase	Desecharlo	51%
Precio dispuesto a pagar por producto ecologico	11-15 pesos	40.9%
Frecuencia de consumo del producto	1-3 veces por semana	52.9%
Racon para adquirir un envase ecologico	Para cpntribuir al cuidado del medio ambiente	78.3%
Lugar donde compran el producto	Supertiendas,miscelaneas, autoservicio. 57.9%	
Conocimiento sobre el impacto ambiental	Si tienen el conocimiento de la problamtica	91.7%
Medio con mayor informacion sobre el tema	Redes sociales	68.5%

Fuente: elaboración propia

En esta tabla de acuerdo con los resultados nos podemos dar cuenta sobre que si hay conciencia sobre la problemática del impacto ambiental sobre los productos que generan esta problemática

8.23 Conclusiones y Recomendaciones

El comportamiento de los consumidores varía de acuerdo a los factores que se le presenten en el ciclo de compra, como tal el mercado constantemente cambiará acerca de las decisiones que estos elijan viéndose influidos por todo aquello que les rodea.

Un tema realmente alarmante en la actualidad es la contaminación a nivel mundial, uno de los principales factores a los que le atribuye el daño ecológico es el exceso de desechos de productos que se producen cada día por parte de los consumidores.

Como tal uno de los agentes principales con los que se elaboran dichos productos es el material denominado como Pet, material que es derivado del plástico.

En la actualidad es común adquirir productos fabricados a base de este derivado, un sector importante en el mercado dedicado a ofertas este tipo de bienes a base de este material es la industria de bebidas embotelladas tales como: agua, jugos, lácteos, refrescos entre otros alimentos para consumo humano.

El consumidor vigente ha optado por demandar productos que les sean fáciles de manipular partiendo de los diseños ergonómicos que se ofrecen en el mercado y principalmente que dichos bienes estén en un punto de venta de fácil acceso.

Retomando estos dos puntos importantes acerca del comportamiento del consumidor y el cuidado hacía el medio ambiente, en el mercado se genera un nuevo segmento de consumidores meta al cual se denomina como mercado verde o consumidores verdes.

En la época actual los consumidores verdes han acrecentado la cuantía de productos que sean amigables con el entorno ambiental, es por esta causa que las empresas se han preocupado por ofrecer bienes que cumplan con estas características tan específicas de este segmento.

En este momento el mercado verde está latente en la sociedad, lo cual representa una gran oportunidad para que las empresas oferten este tipo de bienes, como se pudo observar anteriormente en los resultados, el mercado está dispuesto a contribuir a la preservación del medio ambiente a través de productos que le brinden este tipo de seguridad.

En base a los objetivos previos se reafirma el perfil del consumidor verde y se aporta una nueva característica de nivel psicográfico, el cual es correspondiente al rango de edad de este mercado meta. Así mismo de incorpora un intervalo de precios para este tipo de bienes. Por ende, los precios que están dispuestos a pagar los consumidores por estos productos están en relación con el precio que los oferentes establecen, lo cual permite que el mercado se encuentre en una posición favorable para la adquisición de los productos anteriormente mencionados.

Los consumidores cautivos de este segmento evidentemente conocen acerca de los beneficios que tiene el adquirir estos bienes, ciertamente la razón principal para decidir cuales productos comprar se basa en la ventaja que tienen de aporte respecto al entorno ambiental.

Este punto puede llegar a ser clave para que nuevos consumidores se incorporen a este segmento, el cual relativamente ha generado un alto impacto en la sociedad.

Tomando en cuenta el punto anterior, es indispensable que las empresas presten atención acerca de la importancia que esto puede llegar representar en el incremento de ventas. Una opción viable que deben de considerar los representantes de una marca es el reafirmar la información a los clientes fieles acerca de lo que se puede lograr adquirir más allá del bien tangible, así como informar a los posibles clientes cuales son las ventajas de llevar consigo tales productos.

Para las empresas es importante mantenerse latentes con cada uno de los consumidores lo que a su vez les permite generar un posicionamiento en el mercado que se dirigen de manera directa e indirectamente.

Provechosamente las empresas pueden tomar como respaldo las conductas actuales que presenta el mercado para incrementar la participación de mercado por medio de los bienes ecológicos, en demasía de esta demanda se pueden llegar a establecer pautas para una nueva incorporación de procesos en las instituciones comerciales, las cuales pueden ir desde los departamentos de producción, relaciones internas entre otras áreas, principalmente desde el área de mercadotecnia se logra hacer difusión de las actividades comerciales y sociales que una empresa realiza dentro del entorno comercial.

El dar a conocer a la comunidad en general acerca de las actividades en pro de una contribución al cuidado del medio ambiente puede llegar a favorecer la percepción que la sociedad tenga respecto a una empresa en específico, increíblemente este es un factor que logra influir en la decisión de adquirir un producto que se oferte en el mercado.

El comportamiento de los consumidores es cambiante principalmente en base a la percepción que estos tienen de una marca o una empresa debido a la información que reciben a través de los medios de comunicación externos a estas empresas, por ello es importante manejar una imagen congruente entre lo que la empresa realiza en relación con aquello que ejecuta laboral y comercialmente. Un claro ejemplo de la información desfavorable que reciben los consumidores respecto de algún producto que se comercializa es el anterior hallazgo que se dio a conocer acerca del fallecimiento de un mamífero marino en las costas de Indonesia, en el cual se encontraron cantidades exuberantes de residuos de plástico, indiscutiblemente dicho fenómeno pudiera llegar a repercutir en el concepto que la sociedad tenga respecto a una empresa, principalmente de aquellas que se dedican a comercializar productos envasados en este tipo de material aun cuando dichas empresas no sean responsables del manejo incorrecto que los consumidores hagan al finalizar el ciclo de vida útil de los productos.

El comportamiento del consumidor siempre representará para las empresas el punto de partida para establecer las diversas estrategias de venta, de comunicación y diversas estrategias de mercadotecnia, es por ello que constantemente se deben de analizar los patrones de conducta que el mercado presente ante cada una de las introducciones de bienes e incluso modificaciones de estos.

La mercadotecnia y el comportamiento del consumidor indudablemente siempre estarán relacionados, por tal razón se recomienda actualizar la información con la que se cuenta de un segmento de mercado.

El comportamiento de los consumidores representa una importante oportunidad para entender que sucede en el mercado y simboliza una perfecta ocasión para llevar una importante ventaja de competitividad con respecto a las otras empresas que ofrecen productos similares e incluso bienes exactamente iguales.

8.24 Recomendaciones

Derivado de los resultados de la investigación se propone a las empresas dedicadas al sector que oferta productos de bebidas embotelladas, aplicar nuevas condicionales en el comportamiento de los consumidores tales como: estrategias de atracción de mercado con un enfoque social, no tanto en el producto que se oferta sino en los beneficios que estos brindan al medio ambiente al ser adquiridos debido a que los consumidores han generado una inclinación hacia las repercusiones que tiene el hacer uso de un bien de cualquier índole.

De igual manera se recomienda crear estrategias de fidelización de cada uno de los pertenecientes a este segmento de mercado ya que ellos son la principal fuente publicitaria respecto a lo que realiza una marca en el entorno comercial.

El mercado verde representa una gran oportunidad en el área de comercio es por ello que se sugiere emprender tácticas y una gran atención hacia este mercado tan potencial.

8.25 Referencias

Aguilar, L. (2006). Gobernanza y gestión pública. México: FONDO DE CULTURA ECONÓMICA (FCE). Marzo 10, 2018, Sitio web: https://books.google.com.mx/books?id=WfKWDQAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

Cajiga, J. (s.f). Responsabilidad social empresarial. abril 7,2018, de Cemefi Sitio web: https://www.cemefi.org/esr/images/stories/pdf/esr/concepto_esr.pdf

Calomarde, J. (2005). Marketing ecológico. marzo 9,2018, de Universidad de Cádiz Sitio web: http://www.relec.es/archivos/sostenibilidad/Jose_V_Calomarde_W.pdf

Casal, J. & Mateu E. (2003). Tipos de Muestreo. España. Universidad Autónoma de Barcelona. [http://www.mat.uson.mx/~ftapia/Lecturas%20Adicionales%20\(C%20B3mo%20dise%C20B1ar%20una%20encuesta\)/TiposMuestreo1.pdf](http://www.mat.uson.mx/~ftapia/Lecturas%20Adicionales%20(C%20B3mo%20dise%C20B1ar%20una%20encuesta)/TiposMuestreo1.pdf)

- Chamorro, A. (2001): El Marketing Ecológico, [en línea] 5campus.org, Medio Ambiente. Marzo 9,2018, Sitio web: <http://www.5campus.org/leccion/ecomarketing>
- Del Cid, A., Méndez R. & Sandoval, F. (2011). Investigación. Fundamentos y metodología. México: Pearson Educación. Sitio web: <https://josedominguezblog.files.wordpress.com/2015/06/investigacion-fundamentos-y-metodologia.pdf>
- ECoticias.com/Red/Agencias. (2009). El marketing mix ecológico. marzo 13,2018, de ecoticias.com Sitio web: <https://www.ecoticias.com/sostenibilidad/18951/noticias-de-medio-medio-ambiente-medioambiente-medioambiental-energias-energias-renovables>
- Espintia, I., Martínez, J. & Galeana, E. (2012). Gestión de productos sustentables y el impacto que genera en el comportamiento del consumidor. marzo 7,2018, de UNAM Sitio web: <http://congreso.investigafca.unam.mx/docs/xvii/docs/N06.pdf>
- Estrada, M. & Hernández, X. (2015). Probabilidad y Estadística I. México. Secretaría de Educación Pública. Sitio web: <https://www.dgb.sep.gob.mx/servicios-educativos/telebachillerato/LIBROS/5-semester-2016/Probabilidad-y-Estadistica-I.pdf>
- Formularios Google. Recuperado. n/a. 19 junio,2019 de https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSetO7rVrF0tKQbsi9cShqSPgerSC0dEsPKdUh4Oqh9vQb45sg/viewform?usp=sf_link
- Franco, C. (s.f). Responsabilidad social empresarial. abril 21,2018, de United States InterAmerican Affairs Sitio web: [http://interamerican-usa.com/articulos/Gob-Corp-Adm/Responsabilidad%20Social%20Carolina%20Franco\[1\].pdf](http://interamerican-usa.com/articulos/Gob-Corp-Adm/Responsabilidad%20Social%20Carolina%20Franco[1].pdf)
- Gomez, S. (2012). Metodología de la investigación. México. Red Tercer Milenio. http://www.aliat.org.mx/BibliotecasDigitales/Axiologicas/Metodologia_de_la_investigacion.pdf
- Jiménez R. (1998). Metodología de la Investigación. Elementos básicos para la investigación. Cuba: Ciencias Médicas. Sitio web: http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/bioestadistica/metodologia_de_la_investigacion_1998.pdf
- Kotler, P. & Armstrong, G. (2008). Fundamentos de marketing. México: PEARSON EDUCACIÓN
- Kotler, P. & Armstrong, G. (2012). Marketing. México: PEARSON EDUCACIÓN.
- Lorenzo Díaz, M. (2002). Marketing ecológico y sistemas de gestión ambiental: conceptos y estrategias empresariales. Revista Galega de Economía, marzo 11,2018, Sitio web: <http://www.redalyc.org/pdf/391/39111213.pdf>
- Mansilla Pérez, L., & Ruiz, M. (2009). Reciclaje de botellas de PET para obtener fibra de poliéster. Ingeniería Industrial, (27), 123-137.
- n/a. (2010). ISO 2600 visión general del proyecto. abril 21,2018, de Organización Internacional de Estandarización Sitio web: https://www.iso.org/files/live/sites/isoorg/files/archive/pdf/en/iso_26000_project_overview-es.pdf
- n/a. (2016). ¿Qué es la segmentación psicográfica? abril 30,2018, de EmprendePyme.net Sitio web: <https://www.emprendepyme.net/que-es-la-segmentacion-psicografica.html>
- Oteo, J., Celis, P., Fernández-Villarán A. & De la Rica A. (s.f). Marketing mix y yield management: Similitud de objetivos y factores. marzo 11, 2018, de Asociación Española de Expertos Científicos en Turismo Sitio web: <https://www.aecit.org/files/congress/19/papers/161.pdf>

Parkin, M. & Loría E. (2010). Microeconomía, Versión para Latinoamérica. México: Pearson Educación. Sitio web: <https://economia-aplicada.wikispaces.com/file/view/Michael+Parkin+MICRO.pdf>

Takahashi, H. (2017). México, en vía de ser referente en reciclaje de PET. marzo 6,2018, de Forbes México Sitio web: <https://www.forbes.com.mx/mexico-via-referente-reciclaje-pet/>

Tema 8: Marketing ecológico. (s.f.). Recuperado 6 abril, 2018, de [https://www.uv.es/villalba/politicamed/Tema%2008%20\(Marketing%20ecologico\)](https://www.uv.es/villalba/politicamed/Tema%2008%20(Marketing%20ecologico)).

Capítulo 9 Codigestión anaerobia como alternativa para el tratamiento de aguas residuales lácteas y la generación de biogás y biosólidos

Chapter 9 Codigestión anaerobia como alternativa para el tratamiento de aguas residuales lácteas y la generación de biogás y biosólidos

BERNAL-MARTINEZ, Arodí†*, GONZÁLEZ-LÓPEZ, Gloria Inés y CUEVAS-RODRIGUEZ, Germán

División de Ingenierías, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad de Guanajuato, Av. Juárez #77. Col. Centro CP. 36000. Guanajuato, Guanajuato

ID 1^{er} Autor: Arodí, Bernal-Martinez **ORC ID:** 0000-0002-7339-590X, **CVU CONACYT ID:** 35506

ID 1^{er} Coautor: Gloria Inés, González-López / **ORC ID:** 0000-0002-8763-2128, **CVU CONACYT ID:** 65908

ID 2^{do} Coautor: Germán, Cuevas-Rodriguez / **ORC ID:** 0000-0002-2541-220X, **CVU CONACYT ID:** 121523

DOI: 10.35429/H.2020.8.115.141

A. Bernal, G. González y G. Cuevas

arodiberna@ugto.mx

A. Marroquín, J. Olivares, L. Cruz y A. Bautista. (Coord) Ciencias ambientales, uso de recursos. Handbooks-©ECORFAN-Mexico, Querétaro, 2020.

Resumen

Anaerobic digestion of dairy wastewater is an economical and viable option for its treatment, however this type of substrate can be a problem for the optimal development of a digester. Anaerobic co-digestion is the treatment of a set of organic residues of different origins and composition, where the balance of nutrients and the physicochemical characteristics of the substrate are improved, helping to better stabilize the system and increase the production of biogas. This would favor the cogeneration of electrical energy and, consequently, would reduce the use of fossil fuels by the use of clean, renewable and low-cost energy. The objective of this work was to develop an anaerobic co-digestion bioprocess, in order to treat the wastewater from the dairy industry and residual sludge, as well as to evaluate the production of biogas and the obtaining of biosolids. This process is visualized with a feasible treatment. Regarding the generated sludge, it was found that it does not have toxic characteristics, concluding that the co-digestion used is an alternative for the recovery and reuse of wastewater, as well as the generation of biogas and biosolids.

Codigestion, anaerobic, biogas, biosolids, dairy wastewater

Abstract

La digestión anaerobia de aguas residuales lácteas es una opción económica y viable para su tratamiento, sin embargo este tipo de sustrato puede ser un problema para el desarrollo óptimo de un digester. La codigestión anaerobia, es el tratamiento de un conjunto de residuos orgánicos de diferente origen y composición, donde se mejora el balance de nutrientes y características fisicoquímicas del sustrato, ayudando a una mejor estabilización del sistema y a una mayor producción de biogás. Lo anterior favorecería la cogeneración de energía eléctrica y en consecuencia, reduciría la utilización de combustibles fósiles por el empleo de una energía limpia, renovable y de bajo costo. El objetivo de este trabajo fue desarrollar un bioproceso de codigestión anaerobia, con la finalidad de tratar las aguas residuales de la industria láctea y lodos residuales, así como evaluar la producción de biogás y la obtención de biosólidos. Este proceso se visualiza con un tratamiento factible. En cuanto al lodo generado, se encontró que no posee características tóxicas, concluyendo que la codigestión empleada es una alternativa para la recuperación y reutilización de aguas residuales, así como la generación de biogás y biosólidos.

Codigestión, anaerobio, biogás, biosólidos, aguas residuales lácteas

9. Introducción

En México se ha progresado poco en la tarea de reducir la generación de contaminantes en el agua y en la búsqueda de energías limpias, es por ello que se requiere de nuevas tecnologías para lograr una mayor protección al ambiente en estos temas de gran importancia.

En el caso del tratamiento de Aguas Residuales Industriales (ARI) para el año 2018, había 3144 plantas instaladas en el país. La industria para ese periodo generó 218.1 m³/s de AR y de éstos, se trató el 40% del volumen generado (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2018), el restante era descargado de manera directa a los cuerpos de agua y en el mejor de los casos fue vertido al sistema de alcantarillado municipal. Hace aproximadamente 3 años, algunos estados del País han implementado más infraestructura en plantas de tratamiento en las industrias para sus AR, sin embargo, mantener una instalación de este tipo suele resultar costoso para las empresas e incluso difícil de mantener en funcionamiento.

Los efluentes de la industria láctea forman parte de los contaminantes más severos que existen, debido a las características que posee y el desorden ecológico que puede ocasionar al descargarse a los cuerpos receptores, dañando a los elementos de los ecosistemas acuáticos principalmente. Por ejemplo el suero de leche, un subproducto de la producción de quesos, caseína, caseinatos y mantequilla, que representa del 80 al 90% del volumen del lácteo transformado por esta industria, y que para su tratamiento biológico, demanda una elevada cantidad de oxígeno (Carrillo, 2002).

Con la finalidad de disminuir el problema de contaminación que genera este tipo de efluentes, se han implementado sistemas convencionales que resultan ser relativamente costosos, sin embargo, hasta hace poco tiempo, se consideró como una alternativa más económica: los tratamientos biológicos anaerobios.

La digestión anaerobia (DA) puede aplicarse, entre otros, a residuos ganaderos, agrícolas, así como a los residuos de la industria de transformación de dichos productos. También es un proceso adecuado para el tratamiento de AR de alta carga orgánica (CO), como las producidas en muchas industrias de alimentos. Por ejemplo la industria láctea (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía [IDAE], 2007). Sin embargo, debido a las características que éstas poseen, tienden a volverse ácidas muy rápidamente, ocasionando la inestabilidad del sistema, es por ello que la codigestión anaerobia (CoDA) es el tratamiento que puede solucionar este tipo de problemas, donde la carencia de un sustrato puede ser compensada por las características de otro.

La CoDA permite aprovechar de una mejor manera cada uno de los sustratos para mejorar el proceso, y por lo tanto aumentar la producción de biogás, además de que contribuye a amortiguar las variaciones temporales en cuanto a composición y producción de cada residuo por separado, ya que brinda un ambiente más estable. Así mismo, la CoDA permite integrar la valorización de subproductos orgánicos como son los biosólidos (Agrowaste, 2013).

El desarrollo de métodos anaerobios para el tratamiento de estas AR con altas CO, requieren de poca energía en el proceso, tienen una menor producción de lodos y generan un combustible en forma de metano (Pandian et al., 2012). Además de ofrecer ventajas desde el punto de vista ambiental, tecnológico y económico (Mata et al., 2011).

9.1 La industria láctea

La agroindustria lechera en México es una de la más importante del sector de alimentos con un 10 % del Producto Interno Bruto (PIB), y representa el tercer lugar en el PIB del país. También es uno de los sectores más dinámicos de la Industria Mexicana (Del Valle, 2007), ya que la industria de la leche y sus derivados ofrecen al mercado productos muy diversos que reúnen los requisitos nutrimentales y de inocuidad para su comercialización. Uno de estos productos obtenidos mediante la fermentación son los quesos y como subproducto, el suero lácteo.

La agroindustria quesera mexicana se enfoca a la producción de quesos frescos, siendo las empresas queseras más importantes en México, aquellas que se ubican en el norte y en los estados de Jalisco y Guanajuato. Alrededor del 40% de estas empresas cuentan con procesos artesanales (Poméon & Cervantes, 2010).

9.2 Agua residual láctea y su impacto en el ambiente

Dentro del proceso de elaboración del queso se generan subproductos (residuos), algunos de ellos pueden ser recuperados y reincorporados al proceso, o bien, se les puede dar algún otro uso como el caso del suero de leche. Dentro de estos residuos, se encuentran cantidades significativas de residuos líquidos, como son: la leche diluida, leche separada, crema y suero. Dentro de su composición incluyen las grasas, aceites, sólidos suspendidos, nitrógeno y ácido láctico (Valencia & Ramírez, 2009).

Las Aguas Residuales Lácteas (ARL) se conforman por la mezcla de varios residuos; el suero lácteo es el que mayor presencia tiene durante el proceso, este se define como el líquido resultante de la coagulación de la leche en la fabricación del queso, después de la separación de la caseína y de la grasa (NTE-INEN 2594, 2011) y constituye el 90% de la leche y contiene compuestos hidrosolubles, de acuerdo a la investigación de Spreer (1975), retiene aproximadamente el 55% de los nutrientes de la leche.

Valencia y Ramírez (2009), mencionan que el suero producido en México es de 1 millón de toneladas, con un contenido de 50 mil toneladas de lactosa y 5 mil toneladas de proteína, por lo que este líquido es producido en grandes cantidades por las industrias que se dedican a la fabricación de dicho alimento, sin embargo, a pesar de la riqueza nutricional que posee, el 47% de este suero es descargado sin tratamiento previo al drenaje, llegando de este modo a ríos y suelos, convirtiéndose en un serio problema de contaminación al ambiente, ya que la descarga continúa en estos ecosistemas altera las propiedades fisicoquímicas.

Carrillo (2002), en su trabajo de investigación menciona que, cuando un compuesto con una alta Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), como el suero de leche, se vierte a un sistema acuático como un río o un lago, los microorganismos que lo degradan necesitan una gran cantidad de oxígeno disuelto en el agua, y si la cantidad baja significativamente, se producen olores fétidos por putrefacción, y provoca la muerte de flora y fauna de estos ecosistemas. Si el suero es descargado en suelos, puede filtrarse hasta las aguas subterráneas, convirtiéndose de esa manera en una amenaza para la salud. Por otro lado, cuando se descarga en las plantas de tratamiento de AR, los procesos biológicos que se llevan a cabo en dichas plantas se perturban significativamente.

9.3 Características de las Aguas Residuales Lácteas

Las AR suelen clasificarse en dos tipos: industriales y municipales, y en la mayoría de los casos las ARI requieren de un tratamiento antes de ser descargadas al sistema de alcantarillado municipal. Las características de estas aguas cambian de una industria a otra, por lo que el tratamiento que requieren también es muy variable.

Las ARL y en general de las industrias que procesan alimentos, se caracterizan por ser de tipo orgánico y biodegradables, con cargas ácidas y/o alcalinas por el uso de productos de limpieza de las líneas y estanques (tabla 9.1). Estas descargas presentan una tendencia a la acidificación y fermentación rápida (Seba, 2013).

Tabla 9.2 Características fisicoquímicas de las Aguas Residuales Lácteas.

Parámetro	Valores
pH	5.87
Conductividad mS cm ⁻¹	3.20
Turbidez UNT	617
Sólidos totales g L ⁻¹	6.12
Sólidos disueltos g L ⁻¹	1.59
Sólidos suspendidos g L ⁻¹	4.53
Cloruros mg L ⁻¹	654.8
Sulfatos mg L ⁻¹	385.71
Nitratos mg L ⁻¹	616.14
Fosfatos totales mg L ⁻¹	389.57
DBO mg L ⁻¹	4480
DQO mg L ⁻¹	5600
COT mg L ⁻¹	2464.2

Fuente: Akansha et al., (2020).

Las ARL presentan una alta calidad nutrimental, ya que contiene grasas, minerales, proteínas, vitaminas y una cantidad importante de aminoácidos. Contiene cerca de un 90% de agua, por lo que Valencia y Ramírez (2009) indican que es una mezcla muy compleja y heterogénea, en la que los minerales y los carbohidratos se encuentran disueltos, las proteínas en forma de suspensión y las grasas como pequeñas partículas insolubles en agua.

Los carbohidratos son considerados como compuestos fácilmente biodegradables, las proteínas pueden tender a precipitar si el pH es demasiado bajo, haciendo más difícil la biodegradación, mientras que los lípidos son considerados como un problema debido a su acumulación y difícil degradación (Coelho et al., 2007). El suero lácteo en conjunto con otras sustancias provenientes del proceso de producción y limpieza de maquinaria y equipo, conforman las ARL. En la tabla 9.2 se muestra la caracterización fisicoquímica del suero lácteo.

Tabla 9.2 Características del suero dulce y ácido.

Parámetro (g/L)	Suero dulce	Suero ácido
pH	6.45	< 5.0
ST	63.0-70.0	63.0-70.0
STV	58	21
DBO ₅		30.0-50.0
DQO		60.0-80.0
Lactosa	46.0-52.0	44.0-46.0
Grasa	0.0-5.0	0.0-5.0
Proteína	6.0-10.0	6.0-8.0
Calcio	0.4-0.6	1.2-1.6
Fosfatos	1.0-3.0	2.0-4.5
Lactato	2.0	6.4
Cloruros	1.1	1.1

Fuente: Hernández y Vélez, (2014); Kennedy et al., (2007)

9.4 Digestión anaerobia

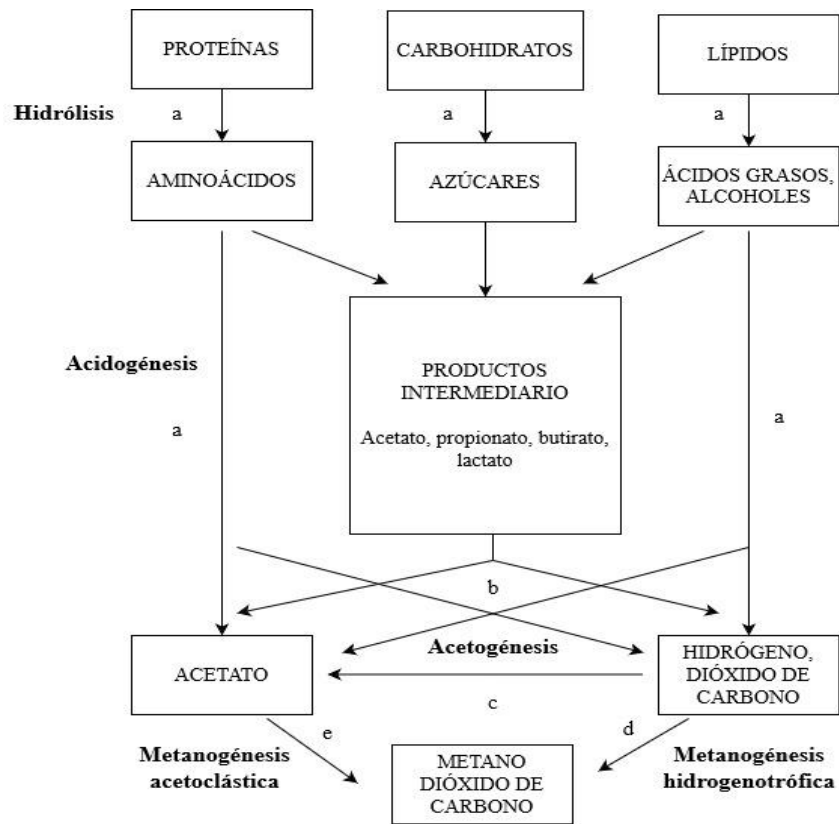
Los tratamientos aerobios y anaerobios constituyen dos grandes alternativas de depuración biológica de AR y residuos orgánicos fermentables (Ruiz et al., 2002). Sin embargo, la DA resulta ser una opción atractiva y económicamente viable, ya que permite en muchos casos la autonomía o autosuficiencia de las plantas de tratamiento.

El principal objetivo de la DA es la transformación de los contaminantes a una forma más estable para evitar riesgos al ambiente y a los seres vivos al momento de su disposición final. Además, pretende convertirlos en materiales estabilizados no putrescibles, originando a la vez otro producto de utilidad como lo es el biogás (Tchobanoglous & Crites, 2000).

La DA es un proceso muy complejo, tanto por el número de reacciones bioquímicas que tienen lugar, como por la cantidad de grupos de bacterias involucradas en ella. La actividad de cada grupo de bacterias resulta interdependiente de las del resto de los grupos, de modo que conforman un ecosistema microbiano, en el que el papel de cada grupo influye en la actividad del resto (Agrowaste, 2014).

De hecho, muchas de estas reacciones ocurren de forma simultánea, y cada una de ellas depende de las reacciones que se llevan a cabo, en la figura 9.1 se describe la ruta de la DA. El proceso de degradación de la materia orgánica se caracteriza por la existencia de cuatro fases consecutivas diferenciadas, donde intervienen cinco poblaciones de microorganismos, estas fases se describen a continuación:

Figura 9.1 Etapas de la digestión anaerobia. a) Bacterias hidrolíticas, b) Bacterias acetogénicas productoras de hidrógeno, c) Bacterias acetogénicas consumidoras de hidrógeno, d) Bacterias metanogénicas reductoras de CO₂ y e) Bacterias metanogénicas acetoclásticas.



Fuente: Durán et al., (2014)

a) *Hidrólisis:*

La materia orgánica puede estar compuesta de tres tipos básicos de macromoléculas: carbohidratos, proteínas y lípidos; por lo que la hidrólisis de estos materiales orgánicos complejos es llevada a cabo por diferentes grupos enzimáticos extracelulares, dando lugar a compuestos de menor peso molecular. La etapa hidrolítica es la limitante de la velocidad del proceso, sobre todo cuando se tratan residuos con alto contenido de sólidos (Pavlostathis & Giraldo, 1991), además esta etapa depende de la temperatura del proceso, Tiempo de Retención Hidráulico (TRH), la composición del sustrato, el tamaño de partículas, pH, concentración de NH₄ y concentración de los productos de la hidrólisis (Speece, 1983).

b) *Etapa fermentativa o acidogénica:*

Durante esta etapa, tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser utilizados directamente por los microorganismos metanogénicos (acético, fórmico, hidrógeno), y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, láctico y etanol) que tienen que ser oxidados por bacterias acetogénicas a sustratos que puedan ser utilizados por los microorganismos metanogénicos (Gerardi, 2003). Las proporciones entre los productos de la fermentación varían en función del consumo de H₂ por parte de los microorganismos que lo utilizan. En esta etapa se generan productos intermedios como el hidrógeno y los ácidos orgánicos, en la tabla 9.3 se observan los diferentes tipos de ácidos que se obtienen en la etapa de fermentación.

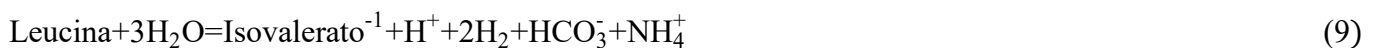
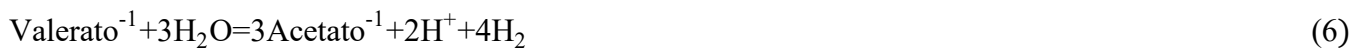
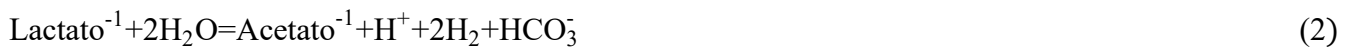
Tabla 9.3 Ácidos orgánicos relevantes durante la DA.

Ácidos volátiles	Ácidos no volátiles
Acético	Láctico
Propiónico	Pirúvico
n- Butírico	Valérico
Isobutírico	Succínico

Fuente: Cortez, (2003)

c) *Etapa acetogénica:*

Mientras que algunos productos de la fermentación, como el H₂ y el ácido acético pueden ser metabolizados directamente por los microorganismos metanogénicos, otros (etanol, AGV y algunos compuestos aromáticos) deben ser transformados en productos más sencillos, como el acetato e H₂, a través de las bacterias acetogénicas (Martí, 2006). La degradación de estos compuestos resulta en la producción de dióxido de carbono, hidrógeno gas, alcoholes, ácidos orgánicos, algunos compuestos de nitrógeno orgánico y algunos compuestos de azufre orgánico. El más importante de los ácidos es el acetato, el cual puede ser producido no solo en la fermentación, sino también a través de la acetogénesis. Algunas de las reacciones acetogénicas que se llevan a cabo durante esta etapa, se encuentran representadas en las ecuaciones siguientes:



d) *Etapa metanogénica:*

La etapa metanogénica es el final del proceso de la DA, en la cual se obtiene biogás como producto final a partir de los compuestos formados en las etapas anteriores. Las bacterias metanogénicas son muy específicas con el tipo de sustrato que requieren para la formación de metano, y hasta ahora sólo se conocen algunos sustratos que emplean para este fin: Dióxido de carbono con hidrógeno, formiato, acetato, metanol, metilaminas y monóxido de carbono. Gerardi (2003) en su trabajo de investigación menciona que el acetato es el principal ácido orgánico o ácido volátil usado como un sustrato por las bacterias metanogénicas.

Las bacterias que degradan el ácido acético y propiónico presentan bajas tasas de crecimiento, por lo que su metabolismo se considera como otro factor limitante para el proceso anaerobio (Metcalf & Eddy, 2003).

Existen dos vías principales para llegar a la formación de metano. La primera es la reacción de dióxido de carbono e hidrógeno para formar metano y agua (Ecuación 10) y la segunda es la transformación de formiato y acetato para producir metano, dióxido de carbono y agua (Ecuaciones 11 y 12).



El 70% del gas producido en los reactores anaerobios se forma a partir de acetato (Ferguson & Mah, 1987) y se ha reportado que se producen de 0.6 a 1 m³ de gas por cada Kilogramo de Sólidos Volátiles (SV) metabolizados (Tchobanoglous et al., 1994).

9.5 Productos obtenidos a partir del proceso de DA: Biogás

Los productos de la DA son el biogás y los lodos digeridos, también conocidos como biosólidos (BS), la calidad de éstos va a depender de la CO, el tipo de sustrato, el proceso de operación, los tiempos de retención y la eficiencia de contacto de la materia orgánica del influente con los microorganismos que se encuentran dentro del reactor. Generalmente, los procesos de DA consisten en introducir el lodo a tratar en un reactor de forma continua o intermitente, permaneciendo en él por periodos de tiempo variable (Metcalf & Eddy, 2003).

El biogás es el producto gaseoso de la DA de la materia orgánica. De acuerdo a Metcalf y Eddy (2003), la composición del biogás depende del sustrato digerido y del tipo de tecnología implementada y puede ser la siguiente: 50-70% de metano (CH₄), 30-40% de anhídrido carbónico (CO₂), 5-10% de hidrógeno (H₂), nitrógeno 1-2% (N₂), monóxido de carbono 0-1% (CO), ácido sulfhídrico 0-1% (H₂S).

De acuerdo al IDAE (2007), debido a su alto contenido de metano, el biogás tiene un poder calorífico de 22.400 KJ/m³ que en comparación con el poder calorífico del gas natural (37.300 KJ/m³) es mayor, considerando que éste último es una mezcla de metano, propano y butano. Por lo anterior se concluye que el biogás es un combustible ideal en comparación con otros, como se muestra en la [figura 9.2](#).

Figura 9.2 Equivalencias de biogás con otras fuentes de energía.



Fuente: Centro de Investigaciones Energéticas, Mediambientales y Tecnológicas. (1995)

Por otro lado, los BS se componen de aquellos sólidos inorgánicos y volátiles que son de difícil degradación. Sin embargo, un lodo bien digerido debe tener ciertas características (Morales, 2005), como son:

- La cantidad de sólidos digeridos del efluente deben ser mucho menor que la que entró en el influente.
- Debe tener una apariencia aterronada y un color oscuro
- No debe presentar mal olor

- Los SV presentes en el efluente deben presentar entre el 40-60% menor que lo representado en el influente.

9.6 Parámetros fisicoquímicos que controlan la digestión anaerobia

Para que pueda desarrollarse el proceso de la DA se deben mantener condiciones ambientales y operacionales adecuadas, para ello se controlan diversos parámetros ambientales:

pH y alcalinidad

Son variables muy utilizadas para la verificación del buen funcionamiento del proceso. Márquez (2005) indica que el pH del medio debe encontrarse entre 6.6 y 7.6 y la alcalinidad entre 1000 y 5000 mgCaCO₃/L, lo cual es suficiente para evitar la acidificación del medio después de pasar por la etapa acidogénica, donde se tiende a sufrir una disminución del pH de la solución. Un pH bajo en el proceso, significa un exceso de AGV's, los cuales deben encontrarse en un rango de 250 mg/L y una disminución de la alcalinidad, lo cual origina una baja producción de metano con una pobre capacidad energética. Por otro lado, al elevarse el pH se favorece la formación de amoníaco, el cual en altas concentraciones es un inhibidor del crecimiento de microorganismos.

Potencial redox

De acuerdo a Martí (2006), el potencial de óxido-reducción indica el tipo de ambiente que se está generando dentro del reactor, las reacciones tienden a la donación o aceptación de electrones. Las bacterias anaerobias requieren de un ambiente reductor para su óptimo desempeño que va de -300 a -330 mV.

Nutrientes

El influente debe contener ciertos elementos y compuestos necesarios para que las bacterias los utilice para su crecimiento y reproducción (Metcalf & Eddy, 2003), tales como el carbono, nitrógeno, fósforo y algunos elementos traza como azufre, potasio, calcio, sodio, magnesio y hierro. Todas estas sustancias se pueden encontrar en los lodos residuales. Speece (1983), ha estudiado diversas proporciones de nutrientes mayoritarios requeridos para llevar a cabo el proceso de DA: la relación carbono-nitrógeno (C:N) oscila entre 15-30:1 y la relación carbono-fósforo (C:P) entre 75-113:1, lo cual se basa en la escasa necesidad de nutrientes requeridos por los microorganismos anaerobios, debido a los bajos índices de producción de biomasa.

Tóxicos e inhibidores

Muchas sustancias tóxicas que se encuentran en el proceso anaerobio pueden formar parte de las materias primas que entran al digestor o pueden ser subproductos del metabolismo de los microorganismos presentes, muchas de éstas pueden desarrollar una actividad inhibitoria y afectar a las bacterias, por lo que, cualquier compuesto por encima de cierta concentración, es inhibitorio para los microorganismos dentro del proceso (Durán et al., 2014). Por otra parte, muchas de estas sustancias a bajas concentraciones pueden ser estimuladoras.

Por citar algunos ejemplos, el nitrógeno amoniacal es un importante nutriente pero puede provocar toxicidad si se encuentra en elevada concentración (Angelidaki y Ahring, 1993). Otros tóxicos son los sulfuros (Hulshoff et al., 1998), los ácidos grasos de cadena larga (Hwu y Lettinga, 1997), los metales pesados y los metales alcalinotérreos (Schürer & Jarvis, 2010), etc. La influencia de la composición del sustrato es clave pero influyen también otros factores como el pH y la temperatura que pueden potenciar la formación de sustancias tóxicas.

Entre los parámetros operacionales que hacen referencia a las condiciones de trabajo de los digestores se encuentran:

Temperatura

La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados que a su vez, dependen de la temperatura. En la [tabla 9.4](#) se encuentran tres rangos de temperatura en los que pueden trabajar los microorganismos anaeróbicos y dentro de cada rango de temperatura (psicrófilo, mesófilo y termófilo), existe un intervalo para el cual este parámetro se hace máximo, determinando así la temperatura de trabajo óptima en cada uno de los rangos posibles de operación.

Tabla 9.4 Intervalos de temperatura considerados para la DA.

Digestión	Van Lier (1993) °C	Martí (2006) °C	Hernández (1998) °C	Metcalf y Eddy (1995) °C
Psicrofílica	>25	>25	0-20	12-18
Mesofílica	25-45	25-45	20-40	25-40
Termofílica	45-65	45-65	50-60	55-65

La velocidad de crecimiento de los microorganismos es óptima conforme aumenta la temperatura, sin embargo, conforme esto pasa la estabilidad disminuye (Van Lier, 1993). Asimismo, la temperatura del proceso también actúa sobre aspectos fisicoquímicos ya que, al aumentar ésta, la solubilidad de las sales también aumenta, acelerando la velocidad de crecimiento de los microorganismos y disminuyendo la solubilidad de los gases de formación (metano) y la viscosidad del líquido, por lo que la necesidad de agitación es menor.

Agitación

La agitación tiene objetivos específicos como son: remoción de los metabolitos producidos por las bacterias metanogénicas, mantener en contacto el sustrato con la población bacteriana, evitar la formación de una capa seca dentro del digestor, homogenizar la densidad bacteriana y evitar la formación de espacios “muertos” sin actividad biológica, que reducirían el volumen efectivo del reactor y prevenir la formación de espumas que dificultaría la salida del biogás y la sedimentación del reactor. Así como también aumenta la producción de gas y disminuye el TRH (Varnero, 2011).

Tiempo de Retención Hidráulico (TRH)

El TRH debe ser suficiente para lograr la digestión completa del lodo, por lo tanto se calcula como el cociente del volumen del digestor y el volumen alimentado. El Tiempo de Retención Celular (TRC) es el tiempo que permanecen los microorganismos dentro del reactor antes de ser eliminado como BS (Martí, 2006; Metcalf & Eddy, 2003). Para mantener las condiciones estables en el proceso, se debe tener en cuenta el control de la CO (Campos et al., 2001). En la [tabla 9.5](#) se observan los tiempos de retención dentro de un proceso anaerobio de acuerdo a la CO.

Tabla 9.5 Tiempos de retención en un proceso anaerobio.

Proceso anaerobio	TRH (d)	TRC (d)
De baja carga	2	24
Convencional	8-10	3-4
De alta carga	0.08	0.5

Fuente: Metcalf y Eddy, (1995)

Carga Orgánica

La CO es la cantidad de materia orgánica introducida por unidad de volumen y tiempo, y depende de la composición del sustrato y el TRH. En la [tabla 9.6](#) se observan que los valores bajos implican baja concentración en el influente y/o elevado tiempo de retención, por otro lado, un aumento repentino de ésta, puede provocar una sobrecarga y la desestabilización del sistema de DA (Campos et al., 2001).

Tabla 9.6 Carga orgánica en un proceso anaerobio.

Proceso anaerobio	CO (Kg DBO/Kg SSV•d)	COV (Kg DBO/m ³)
De baja carga	0.03-0.1	0.24
Convencional	0.2-0.6	0.5-1.5
De alta carga	1-5	1.5-3.5

Fuente: Metcalf y Eddy, (1995)

9.7 Ventajas y desventajas

La razón de ser y el interés en el uso de procesos de tratamiento anaerobios, pueden explicarse teniendo en cuenta las ventajas y desventajas de este proceso. En la tabla 9.7 se muestran éstas, tomando como referencia las mostradas por Metcalf y Eddy, (2003):

Tabla 9.7 Ventajas y desventajas de la DA.

Ventajas	Desventajas
Requiere poca energía	Mayor tiempo de arranque para desarrollar la biomasa necesaria
Menor producción de lodos biológicos	Puede requerir la adición de alcalinidad y/o iones específicos
Requiere pocos nutrientes	Puede requerir tratamiento adicional con un proceso aerobio para cumplir con los requisitos de descarga
Es una fuente potencial de energía, producción de metano	La eliminación del nitrógeno y el fósforo biológicos no es posible
Requiere un reactor de volumen pequeño	Es mucho más sensible a los efectos adversos de las temperaturas bajas en la velocidad de reacción
Con aclimatación la mayoría de los compuestos orgánicos pueden ser transformados	Puede ser más susceptible a la alteración debido a sustancias tóxicas
Respuesta rápida a la adición de sustrato, después de largos periodos de tiempo sin alimento.	Potencial para la producción de olores y gases corrosivos.

Fuente: Metcalf y Eddy, (1995)

9.8 Codigestión anaerobia

La falta de estabilidad en los factores que influyen en el proceso de digestión, pueden provocar su colapso. Frecuentemente, la problemática reside en un inadecuado balance de nutrientes y las características fisicoquímicas del sustrato empleado. Para solucionar este problema, una diversidad de autores ha propuesto la codigestión de diferentes sustratos (Varnero, 2011; Devesa et al., 2014; Sosnowski et al., 2003).

9.9 Objetivos de la Codigestión anaerobia

La codigestión consiste en el tratamiento conjunto de residuos orgánicos diferentes con los objetivos de:

- Aprovechar la complementariedad de la composición de los residuos, logrando de este modo que la mezcla de ambos tipos de residuos dé lugar a procesos más estables y ocurra un incremento considerable en la producción de biogás;
- Compartir instalaciones de tratamiento y unificar metodologías de gestión, ya que permite integrar en una sola instalación, el tratamiento de dos o más residuos con una metodología que ha resultado exitosa, la cual amortigua las variaciones temporales en producción y composición de cada residuo por separado;

- Reducir costos de inversión y explotación, permite integrar la valorización de los residuos orgánicos, consiguiendo de este modo una fuente de energía de carácter renovable en forma de biogás, y un subproducto resultante de la DA, denominado digestato con características de fertilizante orgánico.

9.10 La codigestión en los procesos anaerobios

Dentro de los residuos orgánicos que pueden ser utilizados en el proceso de DA, se encuentran aquellos de origen ganadero y Residuos Sólidos Urbanos (RSU) e industriales. Pese a que es mucha la variedad de posibles sustratos, algunos de estos pueden presentar problemas, como son la deficiencia de nutrientes, baja alcalinidad o excesivo contenido de sólidos. La Co-DA se puede llevar a cabo con uno o más residuos orgánicos (sustratos) de origen diferente, con las únicas premisas de que sean líquidos, contengan material fermentable y tengan una composición y concentración relativamente estable, mediante la codigestión. Durante el desarrollo de este proceso se aprovecha la sinergia de esta mezcla para compensar las carencias que cada uno de los sustratos tengan por separado.

De acuerdo con Montes (2008), se han conseguido buenos resultados para mezclas de residuos ganaderos con varios tipos de residuos de la industria. Así como también buenos resultados con la codigestión de lodos de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) y la fracción orgánica de residuos municipales, la mezcla de estos últimos con AR urbanas.

9.11 Influencia de la codigestión en la producción de biogás

Aprovechando la complementariedad de la composición de los residuos, la mezcla de ambos tipos de residuos da lugar a procesos más estables y con un incremento considerable de la producción de biogás. Por ejemplo, la producción de 10-20 m³biogás/T en una DA de un solo sustrato con residuos ganaderos se podría duplicar incorporando un 20-30% de residuos alimentarios. Sin embargo, los RSU e industriales suelen contener altas concentraciones de materia orgánica fácilmente degradable, por lo que presentan un mayor potencial de producción de biogás que los residuos ganaderos.

9.12 Sustratos

Pese a que se han obtenido buenos resultados con la implementación de la codigestión como alternativa, es importante determinar la viabilidad de las mezclas antes de montar un sistema de tratamiento de DA, puesto que pueden existir tóxicos o inhibidores que invaliden el nuevo producto (mezcla) como un adecuado co-sustrato para la codigestión. Asimismo, previo a la operación de este sistema, se debe analizar la proporción de cada residuo con el fin de evitar sobrecargas orgánicas en el digestor (Devesa et al., 2014). Existe una amplia variedad de residuos que pueden ser sometidos al tratamiento anaerobio, sin embargo algunos de ellos presentan problemas para mantener la estabilidad de dicho proceso. En la [tabla 9.8](#) se muestran las características de algunos residuos orgánicos agroindustriales que se usan más comúnmente en la codigestión.

Tabla 9.8 Características y producción de biogás de algunos residuos orgánicos agroindustriales

Residuo	Producción de biogás (m ³ /Kg SV)	TRH (d)	% CH ₄	Sustancias inhibidoras	Problemas frecuentes
Purín de cerdo	0.25-0.50	20-40	70-80	Antibióticos, desinfectantes	Espumas, sedimentos
Estiércol	0.20-0.30	20-30	55-75	Antibióticos, desinfectantes	Espumas
Gallinaza	0.35-0.60	>30	60-80	NH ₄ ⁺ , antibióticos, desinfectantes	Inhibición por NH ₄ ⁺ , espumas
Residuos de frutas	0.25-0.50	8-20	ND	AGV, pesticidas	Acidificación
Restos de alimentos	0.50-0.60	10-20	70-80	AGV, desinfectantes	Acidificación, sedimentos, mecánicos
Lactosuero	0.80-0.95	3-10	60-80	-	Acidificación
Vinaza	0.35-0.55	3-10	55-75	AGV	Acidificación
Lodos residuales	0.43	30-60	62	ND	ND

ND: No Disponible.

Fuente: Steffen et al., (1998)

9.13 Biosólidos

De acuerdo a la norma oficial mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, un biosólido proviene de “aquellos lodos que han sido sometidos a procesos de estabilización y que por su contenido de materia orgánica, nutrientes y características adquiridas después de su estabilización, puedan ser susceptibles de aprovechamiento”.

9.14 Generación

La generación de lodos a partir del tratamiento de AR es una consecuencia intrínseca del funcionamiento del mismo. Por otro lado, el uso del término biosólido, como ya se mencionó anteriormente se encuentra ligado a su contenido de nutrientes, los cuales son susceptibles de ser reintegrados a la cadena trófica. Cabe mencionar que las características del biosólido obtenido, están condicionadas por el origen de las AR y el proceso de tratamiento de éstas.

9.15 Lineamientos normativos para un biosólido

Los lodos generados en el tratamiento de AR para ser clasificados como un biosólido en muchas ocasiones se someten a un tren de tratamiento y la definición de las operaciones unitarias que comprenderá este tratamiento está condicionada por el destino final de este lodo, ya que se exigen características adecuadas del biosólido resultante.

En México la norma que regula estas características es la norma oficial mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, para la protección ambiental, lodos y biosólidos, especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.

9.16 Tratamiento y recuperación de aguas residuales lácteas

La industria láctea genera gran cantidad de AR, concentrando en éstas la mayor cantidad de contaminantes originados en sus procesos. Las AR de la industria láctea se caracterizan por poseer una gran cantidad de materia orgánica, especialmente grasas y aceites, además de sólidos suspendidos y valores de pH que se salen de los rangos aceptables para su vertimiento (Arango & Sánchez, 2009).

Tradicionalmente el suero lácteo solía ser empleado para fabricar alimentos para el ganado y de no ser así, simplemente era eliminado. En la última década, el desecharlo al sistema alcantarillado o aguas superficiales resulta ser un problema por la alta concentración de materia orgánica y el bajo pH que posee, es por ello que se ha intentado recuperar el suero mediante tecnologías aplicadas, como son la desmineralización o separación cromatográfica y la DA (RWL WATER, 2019), con el fin de emplearlo como materia prima en numerosos productos alimenticios para consumo humano o animal, o bien para la industria farmacéutica e incluso en la fabricación de algunos fertilizantes o abonos. La descripción de estas tecnologías se resume en la [tabla 9.9](#).

Tabla 9.9 Tratamiento de Aguas Residuales Lacteas y sus características.

Tratamiento de ARL	Descripción	Uso del ARL después del tratamiento
Desmineralización	Consiste en la eliminación de los minerales del suero pasteurizado, mediante separación física como la precipitación, filtración o diálisis.	El suero desmineralizado se puede utilizar como materia prima en numerosos productos alimenticios, alimento para animales y la industria farmacéutica.
Separación cromatografica	Es una técnica utilizada para separar los diversos componentes de una mezcla, basada en un proceso físico y por lo tanto no utiliza reactivos químicos.	Se separan las proteínas que se encuentran en el ARL y éstas se obtienen con un alto grado de pureza.
Digestión anaerobia	Es un proceso que se lleva a cabo en ausencia de oxígeno, donde la fracción orgánica de la materia biodegradable se convierte en una mezcla de gases.	Generación de biogás y nutrientes que pueden ser reciclados para ser utilizados en la agricultura como bio-fertilizantes.

Fuente: Kai Pan et al., (2011); Jauregui et al., (2004); Pandian et al., (2012)

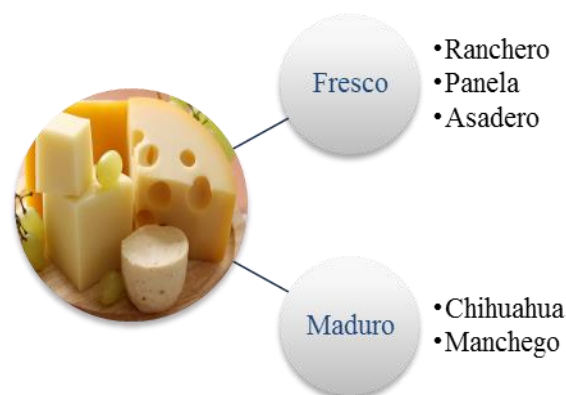
9.17 Caso de estudio: Cremería de un municipio de Guanajuato”

La Cremería del municipio de Guanajuato, es una pequeña empresa 100% mexicana, que abre sus puertas al público desde 1985 para brindar sus servicios en la venta de queso y crema. Esta pequeña empresa cuenta con 20 trabajadores responsables del proceso, entre ellos 2 inspectores de calidad, los cuales se encargan de verificar que el proceso se lleve de manera adecuada, así como de que se utilice la maquinaria correspondiente en cada etapa del proceso para la producción de los productos lácteos.

9.18 Proceso de fabricación de queso

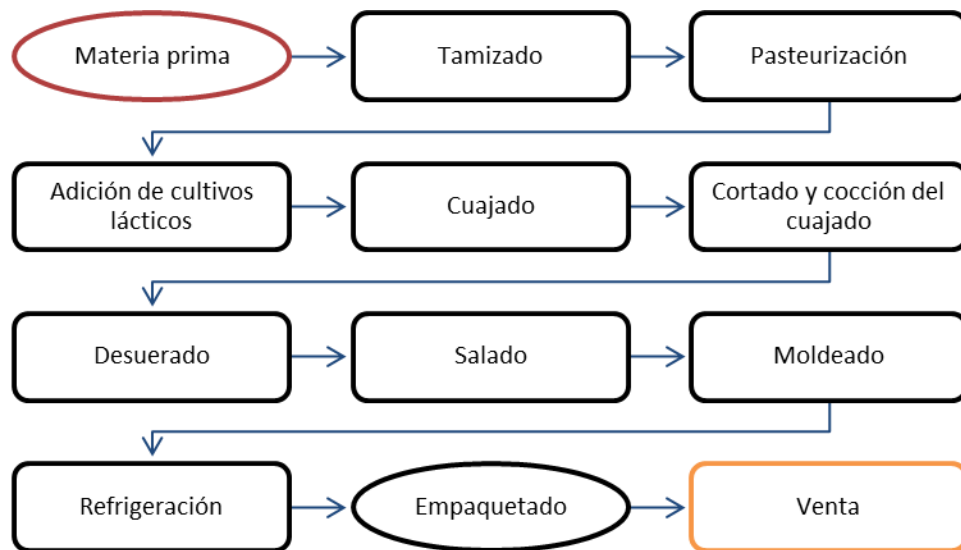
El proceso de producción varía de una empresa a otra, dependiendo de los productos que ofrece. En la Cremería del municipio de Silao, Guanajuato, la producción se modifica en función de la demanda del consumidor, sus principales productos queseros se muestran en la [figura 9.3](#).

Figura 9.3 Variedad de productos queseros en la “Cremería del municipio de Silao, Guanajuato”.



Fuente: “Elaboración propia”

El proceso de elaboración del queso depende del producto final deseado, por ejemplo para la obtención del queso fresco se sigue el proceso presentado en la [figura 9.4](#), el cual muestra las operaciones unitarias necesarias para elaborar este producto.

Figura 9.4 Proceso de elaboración de queso fresco.

Fuente: "Elaboración propia"

Este proceso comienza cuando la leche es clarificada mediante el uso de un filtro de horganza, tipo centrifuga. Una parte del líquido procesado es enviado a los enfriadores para su almacenamiento a una temperatura de 5-7 °C, mientras que la otra parte ingresa al proceso.

Una vez que la leche ha sido clarificada, entra al área de pasteurización donde es calentada a 65°C por media hora, posteriormente se lleva a cabo la adición de cultivos lácticos iniciadores (productores de ácido láctico y responsables del aroma) para que se forme el cuajado, éste se escalda mediante calentamiento y se prosigue a realizar la desuerado y la remoción de grasa, es en este punto donde se obtiene la crema ácida. Dependiendo del producto final, se funde o se procede a moldear, después se empaqueta y se colocan en cámaras de maduración donde se almacena para posteriormente llevarlo a su distribución y venta. Es importante mencionar que los insumos que se utilizan en estos procesos, son un factor determinante en la elaboración de productos de alta calidad. Los principales componentes son: leche entera de vaca 100% natural, cuajo, sal y agua.

Finalmente, cabe mencionar que al término de la jornada de trabajo se lleva a cabo la limpieza de tuberías, equipos del proceso y en general de toda el área de producción, para ello se emplea el uso de detergentes capaces de remover las impurezas generadas.

Asimismo, dentro de las etapas que integran el proceso como lo son el cuajado y desuerado, se generan efluentes que son descargados al sistema de alcantarillado municipal, y que por sus características contaminantes es necesario realizarle un tratamiento, debido a que contienen altos niveles de carga contaminante. El residuo que se genera a lo largo del proceso se utilizó para realizar esta investigación, puesto que dentro de esta empresa no se tiene un sistema de tratamiento de AR, por lo que se tiene la necesidad de tratar sus residuos, ya que no recupera el suero generado. Por lo tanto, es necesario desarrollar un sistema que permita aprovechar sus residuos y de este modo disminuir los impactos ambientales.

9.19 Desarrollo de la codigestión anaerobia de Aguas Residuales Lácteas y Lodos Residuales

En este apartado se presentan los resultados obtenidos del desarrollo de la Co-DA con dos cargas orgánicas (CO) diferentes (1.3 y 2.0 gDQO/L•d), con la finalidad de evaluar la capacidad de remoción de contaminantes, así como la generación de biogás en cada una y de este modo determinar la más eficiente.

El ARL fue colectado en una Cremería ubicada en la ciudad de Silao, Gto. Esta empresa se dedica a la elaboración de derivados y fermentos lácteos. Por otro lado, los lodos residuales primarios (LP) provienen de la PTAR de la ciudad de Irapuato, Gto. Éstos sustratos fueron caracterizados fisicoquímicamente de acuerdo a los métodos estándar (APHA, AWWA y WPCF, 2005), y los parámetros determinados para cada uno de los sustratos fueron los siguientes: DQO, Sólidos totales, disueltos y suspendidos (ST, SD, SS), Conductividad eléctrica, pH, potencial redox, alcalinidad, AGV.

El codigestor anaerobio se operó a nivel laboratorio, de manera discontinua, teniendo un volumen útil de 3 L, previsto de un agitador magnético y un termómetro de vidrio. Este reactor fue operado con dos CO como ya se mencionó anteriormente, y alimentado con una mezcla 1:1 de los sustratos (ARL:LP) bajo condiciones mesofílicas (37 °C) y mezcla completa. Semanalmente se determinaron la DQO, SS, CE, pH, potencial redox, alcalinidad, AGV y COT tanto para el influente como para el efluente del reactor, empleando los mismos métodos y técnicas mencionados en la parte de arriba.

Una vez que se determinó la mejor CO en el codigestor, se realizaron bioensayos para evaluar el potencial de germinación de semillas de lechuga (*Lactuca sativa*) con los biosólidos. Se realizaron 3 mezclas biosólidos y suelo con sus respectivos controles.

La [tabla 9.10](#) muestra la caracterización fisicoquímica del co sustrato, es decir la mezcla 1:1 de los LP y ARL, utilizados en este sistema.

Tabla 9.30 Caracterización fisicoquímica del co sustrato.

Parámetro	Co sustrato
DQO _T g L ⁻¹	51.31 ± 0.29
DQO _S g L ⁻¹	8.09 ± 0.02
STT g L ⁻¹	70.05 ± 1.39
SDT g L ⁻¹	9.01 ± 1.50
SST g L ⁻¹	61.04 ± 10.38
Conductividad mS cm ⁻¹	9.19 ± 0.71
pH	6.86 ± 0.01
Alcalinidad mg CaCO ₃ L ⁻¹	2835.17 ± 230.46
AGV mg L ⁻¹	1823.28 ± 487.65
Proteínas mg L ⁻¹	20.47 ± 0.70
Azúcares mg L ⁻¹	4870.15 ± 51.65
Sulfatos mg L ⁻¹	41.32 ± 2.29

Fuente: Elaboración propia

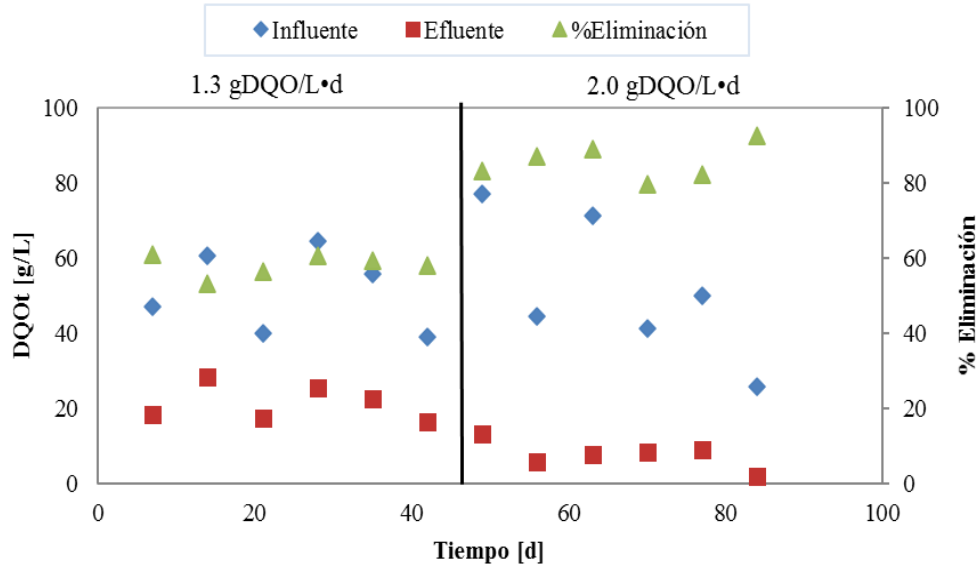
El pH del co-sustrato se encuentra en un valor propicio para el bioproceso, siendo este de 6.86, pese a que se podría clasificar como un pH ligeramente bajo, mantiene una alcalinidad de 2835 mg CaCO₃/L, suficiente para amortiguar los posibles cambios de pH generados durante el proceso, impidiendo de este modo la acidificación del medio por la acumulación de ácidos orgánicos (Pérez & Torres, 2008).

En cuanto a la DQO_T y DQO_S, el co-sustrato presentó valores de 51.31 y 8.09 g/L respectivamente, con una concentración de 23.96 g/L de SSV, lo cual indica que hay una porción importante de materia orgánica que puede ser aprovechada por los microorganismos que llevan a cabo la ruta de la Co-DA.

9.20 Demanda Química de Oxígeno total y soluble (DQO_T, DQO_S) y Carbón Orgánico Total (COT)

La eliminación de materia orgánica expresada como DQO se evaluó para ambas CO, 1.3 y 2.0 gDQO/L•d. En la [gráfica 9.1](#), se observa que a medida que el TRH disminuye y la CO aumenta y se genera una mayor eliminación de la DQO_T.

Gráfica 9.1 Evaluación del comportamiento de la DQO total.



Fuente: "Elaboración propia"

Al evaluar una CO de 1.3 gDQO/L·d con un TRH de 37.5 d, se observó un porcentaje de eliminación de DQO_T promedio de 58.04%, teniendo una concentración en la entrada de 51.08 g/L y en la salida 21.43 g/L. Mientras que para la CO de 2.0 gDQO/L·d con un TRH de 25 d, el porcentaje de eliminación obtenido fue de 85.19%, con 51.55 y 7.54 g/L de DQO en el influente y efluente respectivamente, como se muestra en la [tabla 9.11](#).

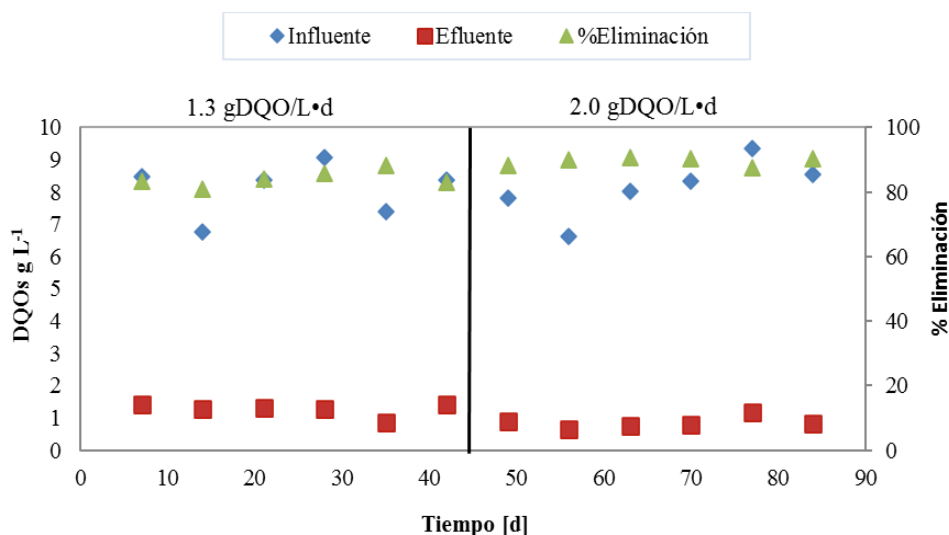
Tabla 9.41 DQO en el influente y efluente del codigestor.

CO [gDQO/L·d]	Influente [g/L]	Efluente [g/L]	% Eliminación
1.3	51.08 ± 9.79	21.43 ± 4.39	58.04
2.0	51.55 ± 7.62	7.64 ± 3.34	85.19

Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de eliminación de DQO_T reportado por Kavacic y Topaloglu (2010) para una DA, se encuentra en un rango de 50 al 70%, encontrándose el valor de ambas CO en este trabajo dentro de este rango e incluso sobrepasándolo, como lo es el caso de la CO de 2.0 gDQO/L·d. En la [gráfica 9.2](#) se muestra el comportamiento de la DQO_S para ambas CO. A diferencia de los resultados obtenidos para la DQO_T, en el caso de la DQO_S, se observa que la dispersión entre los resultados de una carga a otra, son poco variables, pese a las diferencias entre los parámetros de operación, como son el TRH y el caudal.

Gráfico 9.2 Comportamiento de la DQO soluble para dos CO.



Fuente: "Elaboración propia"

En cuanto a la DQOs, con la CO de 1.3 gDQO/L•d se obtuvieron valores de 8.08 y 1.27 g/L para la entrada y salida del reactor respectivamente, lo que equivale a un 84.25% de eliminación con un TRH de 37.5 d, mientras que para la CO de 2.0 gDQO/L•d, se reportaron valores promedio de 8.11 g/L para el influente y 0.86 g/L para el efluente, con un 89.46% de eliminación con un TRH de 25 d como se muestra en la [tabla 9.12](#).

Tabla 9.12 Efecto de la CO sobre la DQOs en el influente y efluente en el codigestor.

CO [gDQO/L•d]	Influente [g/L]	Efluente [g/L]	% Eliminación
1.3	8.07 ± 0.77	1.27 ± 0.19	84.25
2.0	8.11 ± 0.83	0.86 ± 0.16	89.46

Fuente: Elaboración propia

Para ambas CO los porcentajes de eliminación para la DQOs, estuvieron por encima del 80%, lo que indica que la Co-DA estuvo funcionando correctamente en cuanto a la transformación de la materia orgánica soluble.

Por otro lado, en el valor del COT contribuyen distintas sustancias, que van desde compuestos de origen natural, como son los ácidos húmicos y urea entre otros, hasta compuestos sintéticos como detergentes, pesticidas y fertilizantes. En el desarrollo de este trabajo se obtuvieron porcentajes de eliminación del 13 y 47% de COT, para la CO de 1.3 y 2.0 gDQO/L•d respectivamente, como se observa en la [tabla 9.13](#).

Tabla 13 COT en el influente y efluente del codigestor anaerobio.

CO [gDQO/L•d]	Influente [g/L]	Efluente [g/L]	% Eliminación
1.3	1.56	1.35	13
2.0	2.02	1.08	47

Fuente: Elaboración propia

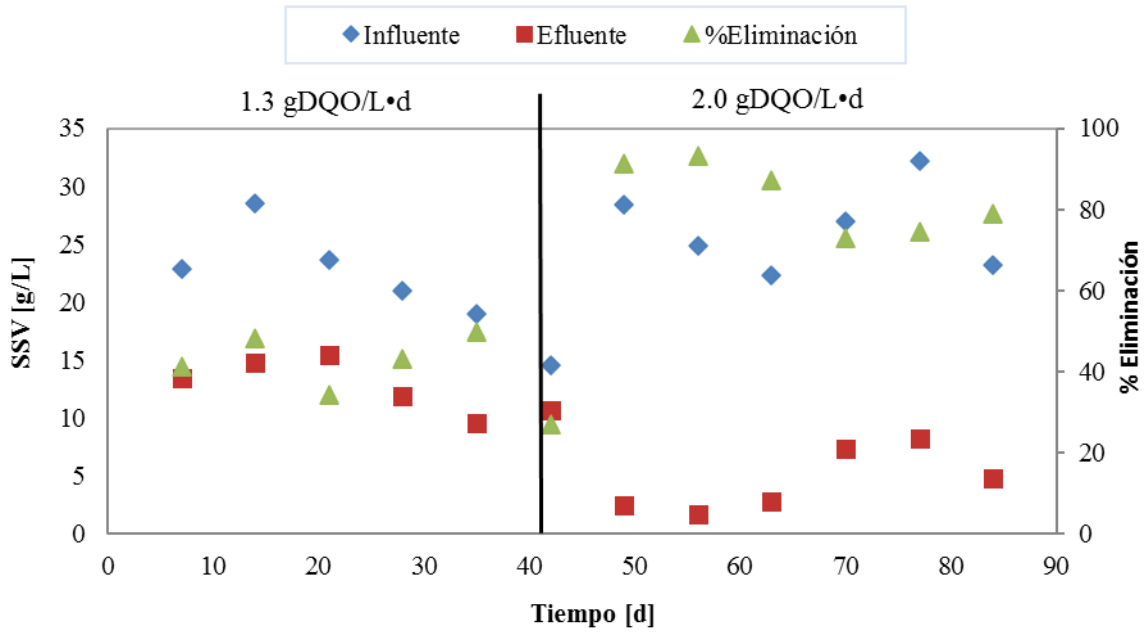
Los valores obtenidos para el COT respalda la teoría de que una CO baja como lo fue la de 1.3 gDQO/L•d no es suficiente para el desarrollo de los microorganismos encargados de procesar el material particulado.

García (2009), reporta valores de eliminación del 73, 61 y 59% de DQO_T, DQO_S y COT, respectivamente para una mezcla de 1:1 de estiércol vacuno y lodos de PTAR. Por otro lado, Lobato (2012) expone porcentajes de eliminación del 62.82 de DQO_T para un sistema de Co-DA de estiércol y cáscaras de papa y de un 60.56% para la Co-DA de estiércol y papa frita residual.

En el desarrollo de este trabajo de investigación con la CO de 2.0 gDQO/L•d, fue donde se obtuvieron los porcentajes de eliminación más eficientes para la DQO_T, DQO_S y COT, siendo del 85.19, 89.46 y 47%, respectivamente, más elevados que aquellos que obtuvieron en los trabajos citados anteriormente, a excepción del COT, el cual se encuentra por debajo del expuesto en la bibliografía.

En lo que respecta a los SSV, en la [gráfica 9.3](#) se muestran los resultados obtenidos, así como el porcentaje de eliminación dentro del sistema de Co-DA para ambas CO. Se observa que a mayor CO y menor TRH, la eliminación de este parámetro resultó más eficiente que con cargas bajas y TRH mayores.

Gráfico 9.3. Comportamiento de los SSV en el sistema de Co-DA.



Fuente: “Elaboración propia”

Comparando este resultado con el porcentaje de eliminación de DQO_T y el porcentaje de eliminación del COT, donde se encontró que la CO de 1.3 gDQO/L•d, no es la adecuada para el correcto desarrollo de los microorganismos encargados de la degradación de material tanto soluble como particulado, ya que los porcentajes de eliminación para estos parámetros se encuentran por debajo de los reportados por Metcalf y Eddy (2003), además de que como se menciona con anterioridad, la degradación de material particulado para una CO alta, como lo es la de 2.0 gDQO/L•d, es mayor que la eliminación en la CO de 1.3 gDQO/L•d.

Esto puede explicarse de la siguiente manera, dentro de este sistema los microorganismos se encuentran en un crecimiento constante, debido a que se añade de forma permanente alimento (nutrientes), del mismo modo que se elimina biomasa, un TRH de 25 d y un caudal de 0.12 L/d para la CO de 2.0 gDQO/L•d, son parámetros de operación propicios para el desarrollo de estos microorganismos y, por lo tanto la eliminación de los SSV.

Caso contrario de la CO de 1.3 gDQO/L•d, donde el TRH corresponde a los 37.5 d y el caudal de la alimentación de 0.08 L/d, por lo que en este caso los microorganismos siguen teniendo un crecimiento exponencial, donde su velocidad de crecimiento se ve afectada posiblemente debido a que dentro del sistema para esta CO existe un nutriente limitante, pasando de este modo a una etapa de decadencia, es decir comienzan a morir, puesto que las bacterias comienzan a consumir su propia biomasa a modo de reserva, por lo que decrece su materia activa y ocasiona la liberación de material orgánico por el rompimiento de su capa lipídica, esta liberación a su vez origina material suspendido. Es importante resaltar que Metcalf y Eddy (2003), consideran la concentración de los SSV como una medida aproximada del contenido de materia orgánica.

En la tabla 9.14 se muestran las concentraciones para la entrada y la salida del rector, donde se tiene que en promedio hubo una concentración de 21.60 y 26.32 g/L para el influente de la CO de 1.3 y 2.0 gDQO/L•d, respectivamente, y una concentración de 12.63 y 4.57 g/L para el efluente de la CO de 1.3 y 2.0 gDQO/L•d, respectivamente, con porcentajes de eliminación del 41.53 para la CO de 1.3 gDQO/L•d, y 82.63% para la CO de 2.0 gDQO/L•d.

Tabla 9.14 SSV en el codigestor anaerobio con dos CO.

CO (gDQO/L•d)	Influente (g/L)	Efluente (g/L)	% Eliminación
1.3	21.60 ± 4.28	12.63 ± 2.13	41.53
2.0	26.32 ± 5.71	4.57 ± 3.88	82.63

Fuente: Elaboración propia

La eliminación de los SSV en los procesos de DA se encuentran entre 67-81% (Ruíz et al., 2002) y 40-60% (Metcalf & Eddy, 2003), por lo que los resultados obtenidos para este trabajo se encuentran dentro de estos rangos, sin perder de vista que la CO de 2.0 gDQO/L•d resulta ser la más adecuada.

En la [tabla 9.15](#) se pueden apreciar las concentraciones obtenidas en el influente y efluente de ambas CO para el sistema de Co-DA, así como también la eficiencia de eliminación para los AGV's. De acuerdo a Noyola (1998), la concentración de AGV's en el efluente debe ser inferior a 100 mg/L, tomando en consideración este rango, la CO de 1.3 se encuentra muy por encima de este valor, por lo que de acuerdo a Ahring et al., (1995), Pérez y Torres (2008), la metanogénesis puede ser inhibida con altas concentraciones de AGV's.

Tabla 9.15. AGV en el codigestor anaerobio bajo la influencia de dos CO.

CO [gDQO/L•d]	Influente (mg/L)	Efluente (mg/L)	% Eliminación
1.3	1425.12 ± 205.55	350.83 ± 70.20	75.38
2.0	2221.45 ± 596.52	135.83 ± 35.81	93.89

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, García (2009), reporta valores de 834.3 y 210.5 mg/L de AGV para el influente y efluente respectivamente, lo que indica una eliminación del 75%, menor que el obtenido en el desarrollo de este bioproceso al trabajar con una CO de 2.0 gDQO/L•d, pero similar a la obtenida en la CO de 1.3 gDQO/L•d.

En la [tabla 9.16](#) se exponen los resultados obtenidos para pH, donde se observa que no hay una variación representativa de una CO a otra, ya que el pH se manejó dentro de un mismo rango tanto en la entrada, como en la salida, siendo ligeramente mayor en el efluente de la CO de 1.3 gDQO/L•d.

Potencial Redox

Tabla 9.16 pH en el codigestor anaerobio para ambas CO.

CO [gDQO/L•d]	Influente	Efluente
1.3	6.85 ± 0.04	8.28 ± 0.23
2.0	6.85 ± 0.04	8.25 ± 0.22

Fuente: Elaboración propia

En la [tabla 9.17](#) se muestran los valores de potencial redox obtenidos, durante el desarrollo del bioproceso para ambas CO. Con la de 1.3 gDQO/L•d, se obtuvo un valor de -265.40 y -433.03 mV para el influente y efluente, respectivamente. Mientras que para la CO de 2.0 gDQO/L•d, los valores reportados para este parámetro fueron de -251.45 mV para el influente y -356.38 mV para el efluente.

Tabla 9.17 Potencial redox en el influente y efluente del codigestor anaerobio bajo las dos CO

CO (gDQO/L•d)	Influente mV	Efluente mV
1.3	-265.40 ± 83.52	-433.03 ± 23.61
2.0	-251.45 ± 57.11	-356.38 ± 75.18

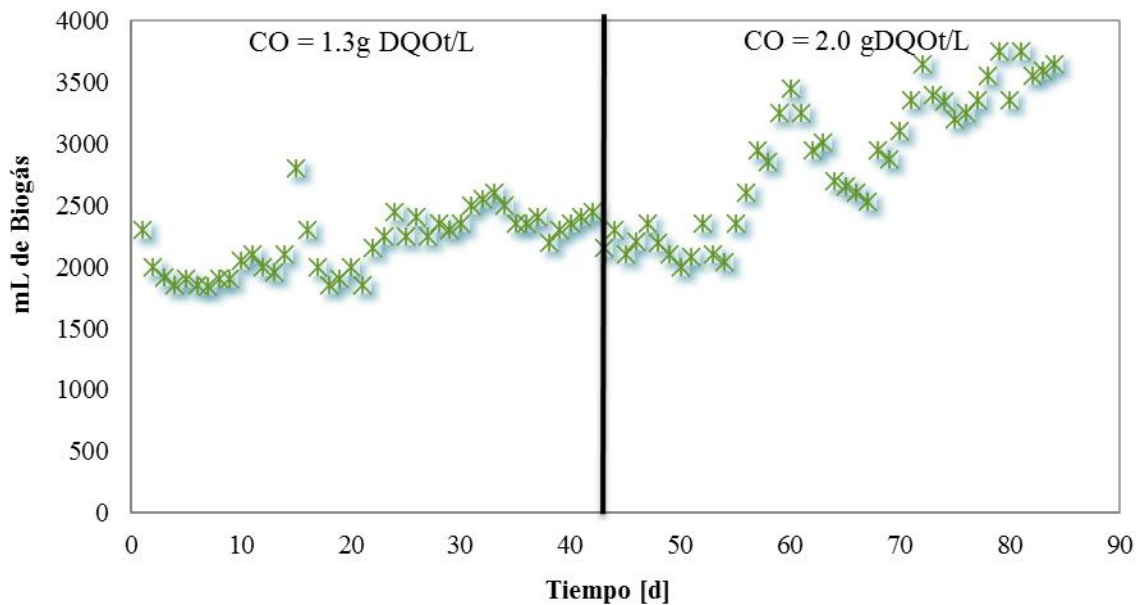
Fuente: Elaboración propia

Para asegurar el crecimiento adecuado de los microorganismos, se requiere mantener un potencial redox entre -220 a -350 mV a un pH de 7, a manera de conservar un ambiente fuertemente reductor que las bacterias metanogénicas necesitan para su óptima actividad (Varnero, 2011), sin embargo, hay autores que dan rangos de menor amplitud como es el caso de Martí (2006), quien marca un rango de -300 a -330 mV.

9.21 Producción de biogás

En la [gráfica 9.4](#) se muestra el comportamiento de la generación de biogás que se obtuvo para ambas CO, donde se observa que la producción fue mayor para la CO de 2.0 gDQO/L•d.

Gráfico 9.4 Generación de biogás para ambas CO en el sistema.



Fuente: "Elaboración propia"

Se aprecia que con la reducción del TRH en el sistema y aumento de la CO, la generación de biogás aumento de manera gradual, manteniéndose estable para la CO de 1.3 gDQO/L•d, con un rango de generación que va de los 1500-2500 mL, mientras que para la CO de 2.0 gDQO/L•d la generación de biogás tuvo algunos picos de producción que llegaron a los 4,000 mL, lo que resulta en un rango más amplio, que va de 1,500-4,000 mL.

9.22 Bioensayo de toxicidad del efluente proveniente del sistema de codigestión anaerobia

En esta etapa se muestran los resultados de la caracterización fisicoquímica de los sustratos empleados: BS (Biosólidos) y S (Suelo) en el bioensayo de toxicidad, así como los resultados del mismo. Cabe mencionar que este bioensayo se realizó con los BS obtenidos con la CO de 2.0 gDQO/L•d, ya que fue la más eficiente.

En la [tabla 9.18](#) se presenta la caracterización fisicoquímica del BS y del S previa al bioensayo. El pH del BS fue de 8.09, y de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 entra en una clasificación de medianamente alcalino.

Tabla 9.18 Caracterización fisicoquímica del BS y el S.

Parámetro	BS	S
pH	8.09 ± 0.13	3.83 ± 0.21
Conductividad dS m ⁻¹	1.96 ± 0.03	0.46 ± 0.002
Potencial Redox mV	+286.9 ± 5.5	+346.5 ± 2.8
% Materia Orgánica %MO	3.63 ± 0.3	10.02 ± 1.2
Nitrógeno total mg L ⁻¹	146	349
Fósforo total mg L ⁻¹	53.30	36.30

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, su valor de conductividad lo sitúa en muy ligeramente salino, lo que indica que puede ser deficiente en micronutrientes como el boro, cobre y zinc entre otros (Rawson & Gómez, 2001). En cuanto al pH del S que resultó ser de 3.83, entra en una clasificación de fuertemente ácido, sin embargo, el pH del suelo tiene poco efecto sobre el nitrógeno, el cual es uno de los macronutrientes importantes para el crecimiento de la planta. Así también, su conductividad lo ubica en un suelo con efectos despreciables de la salinidad. Como se puede observar en la tabla anterior en cuanto a los macronutrientes, la concentración del nitrógeno (N) total para el BS es menor que para el S, caso contrario al contenido de fósforo (P) total, donde para el BS es mayor que el S.

Por otro lado en cuanto al %MO, de acuerdo a la misma Norma Oficial Mexicana, el BS se considera como un suelo con muy bajo contenido de MO, estos lodos principalmente se componen de sólidos inorgánicos y volátiles que son de difícil degradación (Morales, 2005), en cuanto al %MO del S se tiene un 10.02%, por lo que se encuentra en la clasificación de suelo con un contenido medio de MO. El potencial redox para el BS y el S es positivo, lo que es indicio de que en ese sustrato se puede oxidar la materia orgánica.

En la [tabla 9.19](#) se muestra el resultado de la caracterización fisicoquímica que se le realizó a cada una de las proporciones del bioensayo. Para el pH, los resultados obtenidos tienden a disminuir del mismo modo que lo hace la concentración de BS en la muestra, ya que como se observa que el pH del BS (pH 8.09), es mucho mayor que el del S (pH 3.83).

Tabla 9.19 Caracterización fisicoquímica de las proporciones del bioensayo BS:S.

Parámetro/ BS:S	75:25	50:50	25:75
pH	7.25 ± 0.07	6.61 ± 0.21	5.64 ± 0.14
Conductividad dS m ⁻¹	2.28 ± 0.09	1.65 ± 0.11	0.48 ± 0.03
Potencial Redox mV	+295 ± 3.5	+307.8 ± 4	+322.9 ± 6.1
% MO	7.79 ± 0.5	10.27 ± 1.2	8.45 ± 0.91
Nitrógeno total mg L ⁻¹	268	301	304
Fosforo total [mg L ⁻¹	25.80	22.10	20.60

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000, la proporción 75:25 (BS:S) resultó ser un suelo neutro, para 50:50 un suelo moderadamente ácido, al igual que la proporción 25:75. En cuanto a la conductividad eléctrica, la proporción de 75:25 (BS:S) entra en una clasificación de suelo moderadamente salino, para 50:50 muy ligeramente salino y para la proporción 25:75, suelo con efectos despreciables de salinidad. El potencial redox para todas las proporciones, resultó ser positivo y aumenta conforme disminuye la porción de BS. Por otro lado, el contenido de MO para las tres proporciones se encuentra en una clasificación media, sin embargo no se debe perder de vista que la proporción 50:50 es la que posee el mayor porcentaje de MO.

En cuanto al contenido de N total se distingue un aumento notorio, al pasar de la proporción de 75:25 a 50:50. Mientras que para la proporción de 50:50 el contenido de N se encuentra muy cercano al de la proporción de 25:75. Respecto al P total se observa que pasa lo contrario al N total, ya que la concentración de una proporción a otra, tiende a disminuir del mismo modo que lo hace el contenido de BS. Esta diferencia en la concentración de ambos macronutrientes, da un indicador de que existe un balance de nutrientes, donde el contenido de N es mayor en una relación promedio para las tres proporciones de 3:0.25 (N:P).

Así mismo, en la [tabla 9.20](#), se observa que hubo una tendencia muy marcada para cada uno de los parámetros medidos, puesto que el pH, la conductividad y el P total, tienden a disminuir del mismo modo que el contenido de BS en la muestra, caso contrario del potencial redox, %MO y el contenido de N total, que tienden a aumentar de manera gradual conforme disminuye el contenido de BS.

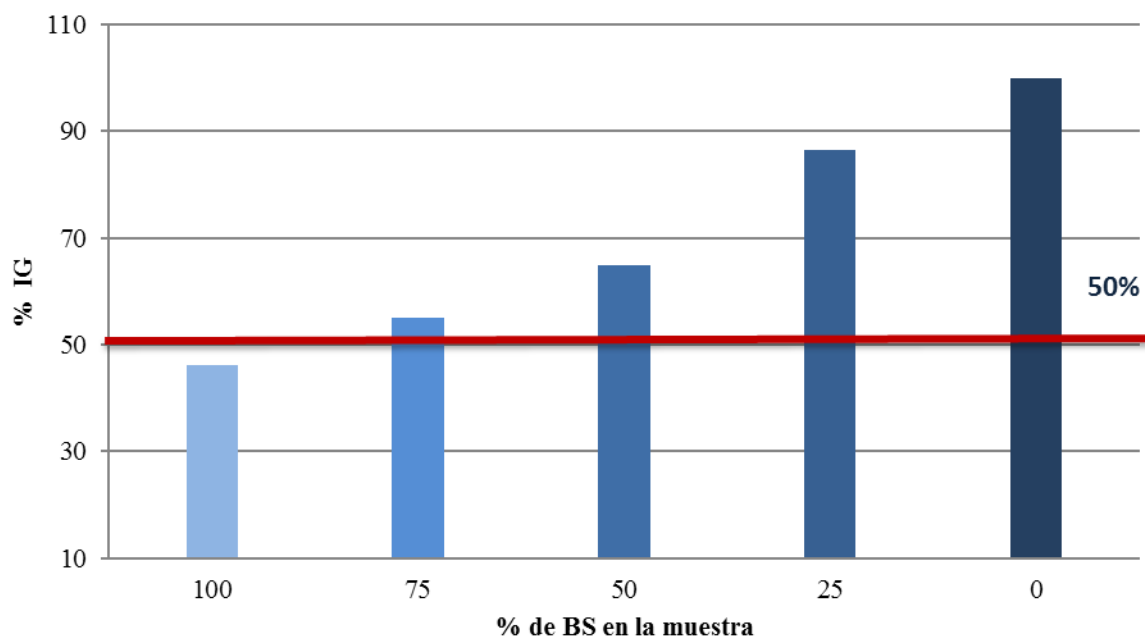
Tabla 9.20 Resultados del bioensayo.

Proporción BS:S	G	L	Gc	Lc	% IG
Control BS	5.50 ± 0.94	2.10 ± 0.13	8.50 ± 0.50	2.95 ± 0.30	46.06
75:25	5.75 ± 0.83	2.40 ± 0.22	8.50 ± 0.50	2.95 ± 0.30	55.03
50:50	6.50 ± 0.50	2.50 ± 0.32	8.50 ± 0.50	2.95 ± 0.30	64.81
25:75	7.75 ± 0.43	2.80 ± 0.19	8.50 ± 0.50	2.95 ± 0.30	86.54
Control S	8.50 ± 0.50	2.95 ± 0.30	8.50 ± 0.50	2.95 ± 0.30	100

Fuente: *Elaboración propia*

Los suelos con pH ácidos, suelen tener un alto potencial redox, y contenidos relativamente altos de materia orgánica (León & Arregocés, 1981), tal como se muestra en la tabla anterior, se exponen los resultados obtenidos luego de hacer el monitoreo correspondiente a la germinación y crecimiento de semillas. En la muestra que contiene un 75% de BS, el índice de germinación (IG) fue del 46.07%, mientras que para aquella que contiene el 50% de BS fue del 55.03%, por otro lado la muestra que contiene 25% de BS, arrojó un IG del 86.54%. También se observa que el IG aumentó cuando disminuyó la concentración de BS, al igual que sucede con el potencial redox, el contenido de MO y N total. Lo cual no resulta ser una tendencia casual, sino que están relacionados de manera directa, ya que el contenido de MO y el N como un macronutriente importante, son factores importantes en el IG de la plántula.

En la [gráfica 9.5](#) se muestra la germinación resultante para cada una de las proporciones usadas; se distingue de manera muy clara el incremento de la germinación. El IG para las proporciones de 75:25, 50:50 y 25:75, se encuentra por encima del 50%, de acuerdo a Sobrero y Ronco (2004).

Gráfico 9.5 Índice de Germinación obtenido en el bioensayo.

Fuente: *“Elaboración propia”*

Esto indica que no hay niveles de toxicidad en el suelo que puedan inhibir el crecimiento de la plántula, sin embargo la proporción que posee un 75% de BS se encuentra muy cerca del límite mínimo, mientras que en la muestra que contiene 100% BS, el IG se encuentra por debajo de este límite, esto puede deberse al poco contenido de MO que posee por si solo el lodo, además de su bajo contenido de N total.

Las características fisicoquímicas de los sustratos: ARL y Lodos Primarios, demostraron que ambos se complementaron, donde cada uno aportó una característica adecuada, como lo fue el pH, alcalinidad, MO y nutrientes, por lo que se vio beneficiado el desarrollo del bioproceso CoDA.

Otro factor que influyó en el desarrollo del proceso fue la CO con 2.0 gDQO/L•d, se obtuvieron porcentajes de eliminación por arriba del 80% de Materia Orgánica, expresada como DQO_T, DQO_S y SSV, por lo que esta CO fue la más eficiente; lo mismo sucedió en cuanto a la generación de biogás, dicha CO con un TRH de 25 d tuvo una producción de 396.7 mL biogás/g DQO eliminada. En cuanto a la presencia de patógenos, se lograron porcentajes de eliminación de hasta el 78% para Coliformes Totales con la CO de 1.3 gDQO/L•d, y del 97 para Coliformes Fecales en la CO de 2.0 gDQO/L•d y del 90% para Salmonella en ambas CO. El biosólido generado no se considera tóxico puesto que, los Índices de Germinación de semillas de lechuga se encuentran por encima del 50%, no se presentaron efectos negativos sobre las plántulas.

9.23 Conclusiones

La codigestión anaerobia es el tratamiento de un conjunto de residuos orgánicos de diferente origen y composición, donde se mejora el balance de nutrientes y las características fisicoquímicas de los sustratos. En este trabajo, se mejoró el proceso para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea, se obtuvieron porcentajes de remoción por arriba del 80% de la materia orgánica con cargas orgánicas de 2.0 gDQO/L.d y la producción de biogás fue de 396.7 mL de biogás/g DQO eliminada. El biosólido generado no se considera tóxico puesto que, los índices de germinación de semillas de lechuga se encontraron por encima del 50%, no se presentaron efectos negativos sobre las plántulas. La codigestión anaerobia es una alternativa para la recuperación y reutilización de las aguas residuales, así como para la generación de biogás y biosólidos.

9.24 Agradecimientos

Los autores brindan un agradecimiento al PRODEP por el financiamiento económico por el proyecto de redes académicas “Boprocesos ambientales” y a la Ing. Brenda Montserrat Crespo Pérez por su apoyo en la realización de este proyecto.

9.25 Referencias

- Agrowaste. (2013). *Digestión anaerobia*. Consultado en Octubre 2019, de <http://www.agrowaste.eu/>. Unión Europea.
- Agrowaste. (2014). *Guía para la obtención de biogás mediante digestión anaerobia a partir de desechos de la industria agroalimentaria*. Consultado en Octubre 2019, de <http://www.agrowaste.eu/>. Unión Europea.
- Ahring, B., Sadberg, M. y Angelidaki, I. (1995). Volatile fatty-acids as indicators of process imbalance in anaerobic digesters. *Applied microbiology and biotechnology* 43(5): 559-565.
- Akansha, J., Nidheesh, P., Gopinath. A., Anapuma, K., Suresh, M. (2020). Treatment of dairy industry wastewater by combined aerated electrocoagulation and phytoremediation process. *Chemosphere*: 253: 126652.
- Angelidaki, I. Y Ahring, B. (1993). Thermophilic anaerobic digestion of livestock waste: the effect of ammonia. *Applied microbiology and biotechnology* 38(4): 560-564.
- APHA, AWWA, WPCF. (1992). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association, 18th ed. Washington, D.C. U.S.A.
- Arango, O. y Sánchez, L. (2009). *Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea en sistemas anaerobios tipo UASB*. Fac. de Ciencias Agropecuarias 7(2): 24-31.
- Campos, E., Bonmatí, A., Teira, M. y Flotats, X. (2001). *Aprovechamiento energético de lodos residuales y purines*. *Producción de biogás*. Memorias de Jornadas técnicas sobre energía. Barcelona.
- Carrillo, L. (2002). *Tratamiento y reutilización del suero de leche*. *Conversus* (10): 22-25.

- Centro de Investigaciones Energéticas, Mediambientales y Tecnológicas. (1995). *La biomasa como fuente de energía y productos para la agricultura y la industria*. pp500. Madrid, España.
- Coelho, M., Rodríguez, A., Arroja, L. y Capela, I. (2007). Effect of non-feeding period length on the intermittent operation of UASD reactors treating dairy effluents. *Biotechnology and Bioengineering* 96 (2): 244-249.
- Comisión Nacional del Agua. (2018). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. México.
- Cortez, E. (2003). *Fundamentos de ingeniería para el tratamiento de los biosólidos generados por la depuración de aguas servidas de la región metropolitana*. Tesis para obtener el grado de Ing. Quím., Universidad de Chile, Dpto. de Ing. Quím. Santiago de Chile.
- Del Valle, M. (2007). *Sistema de innovación y transformaciones socioeconómicas en la agroindustria de los quesos en México*. Universidad Nacional autónoma de México. México.
- Devesa, L., Ferrer, I. y Casas, I. (2014). *Obtención de biogás a partir de codigestión anaerobia de microalgas y fangos de EDAR*. Barcelona.
- Durán Moreno, A., Casas-Gutiérrez, D., Rojas-Zamora, U., Vázquez-Cuevas, G., Roa-Luna, M., Alcántara-Hernández, R. (2014). *Fundamento de Digestión Anaerobia de Residuos Sólidos Orgánicos Urbanos*. Universidad Autónoma de México. ISBN: 978-607-02-5106-1.
- Ferguson, T. Y Mah, R. (1987). *Methanogenic bacteria in anaerobic digestion of biomass*. Edited by Chynoweth, D. Y. e Isaacson, R. Elsevier applied science LTD.
- García, K. (2009). *Codigestión anaeróbica de estiércol y lodos de depuradora para producción de biogás*. Tesis para obtener el grado de master. Universidad de Cádiz, Dpto. Tecnologías del medio ambiente.
- Gerardi, M. (2003). *The microbiology of anaerobic digesters*. ISBN: 0-471-20693-8. New Jersey: Publicaciones John Wiley & Sons, Inc.
- Hernández, A. (1998). *Depuración de aguas residuales*. Madrid, España. Ed. Servicios Públicos.
- Hernández, M. y Vélez, J. (2014). *Suero de leche y su aplicación en la elaboración de alimentos funcionales*. Temas selectos de Ing. en Alimentos 8(2): 13-22. Puebla, México.
- Hulshoff, L., Lens, P., Stams, A. y Lettinga, G. (1998). Anaerobic treatment of sulphate-rich wastewaters. *Biodegradation* 9: 213-224.
- Hwu, C-S. y Lettinga, G. (1997). Acute toxicity of oleate to acetate-utilizing methanogens in mesophilic and thermophilic anaerobic sludges. *Enzyme and microbial technology* 21: 297-301.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2007). *Biomasa: Digestores anaerobios*. ISBN-13: 978-84-96680-21-0. Madrid, España.
- Jauregui, P., Fuda, E. y Pyle, D. (2004). Recovery of lactoferrin and lactoperoxidase from sweet whey using colloidal gas aphrons (CGAs) generated from an anionic surfactant. AOT. *Biotechnology Progress*. 20(2):514-525.
- Kai Pan, Qi Song, Lei Wang y Bing Cao. (2011). A study of demineralization of whey by nanofiltration membrane. *Desalination*. 267(2-3): 217-221.
- Kavacik, B. y Topaloglu, B. (2010). Biogas production from co-digestion of a mixture of cheese whey and dairy manure. *Biomass and bioenergy* 34(9): 1321-1329.
- Kennedy, J., Panesar, P., Gandhi, D. y Bunko, K. (2007). *Bio-utilization of whey for lactic acid production*. *Food Chemistry* 105(1): 1-14.

- León, A. y Arregocés, O. (1981). *Química de suelos inundados*. pp. 9-19 Cali, Colombia: CIAT.
- Lobato, A. (2012). *Estudio de la co-digestión anaerobia de residuos ganaderos con otros substratos agroindustriales*. Tesis para obtener el grado de doctor. Universidad de León, Instituto de medio ambiente, recursos naturales y biodiversidad.
- Márquez, F. (2005). *Estudio del tratamiento de lodos provenientes de pisciculturas mediante un sistema de digestión anaerobia*. Tesis para obtener el grado de Lic. en Ciencias de la ingeniería. Universidad Católica de Temuco. Chile.
- Martí, N. (2006). *Estudio del proceso de digestión anaeróbica para optimizar la recuperación de fósforo en EDAR*. Tesis doctoral, Universidad de Valencia, Esc. Técnica superior de Ing. ISBN: 1-58112-332-9. España: Universal-Publishers.
- Mata, J., Dosta, J., Macé, S. y Astalás, S. (2011). Codigestion of solid wastes: A review of its uses and perspectives including modeling. *Critical reviews in Biotechnology*, 31(2): 99-111.
- Metcalf y Eddy, INC. (2003). *Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, vertido y reúso*. Vol. I y II 4ta ed. New York: McGraw-Hill.
- Montes, M. (2008). *Estudio técnico-económico de la digestión anaerobia conjunta de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y lodos de depuradora para la obtención de biogás*. Tesis para obtener el grado de doctor en Ing. Quím. Dpto. de Ing. Civil: Ordenación del Territorio, urbanismo y medio ambiente.
- Morales, P. (2005). *Digestión anaerobia de lodos de plantas de tratamiento de aguas y su aprovechamiento*. Tesis para obtener el grado de Ing. Quím. Con área en Ing. Amb., Universidad de las Américas Puebla, Dpto. de Ing. Quím. y Alimentos. Cholula, Puebla, México.
- Noyola, A. (1998). *Digestión anaerobia de lodos. Memorias del curso digestión anaerobia de lodos y aguas residuales*. Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales A.C. México.
- NTE-INEN 2594. (2011). *Suero de leche líquido. Requisitos*. Norma Técnica Ecuatoriana. Ed. Instituto Ecuatoriano de Normalización, Quito, Ecuador.
- Pandian, S., Margandan. B. y Kamalakannan, A. (2012). Anaerobic treatment of spoiled milk from milk processing industry for energy recovery. *Fuel* 96: 482-486.
- Pérez, A. y Torres. P. (2008). Índices de alcalinidad para el control del tratamiento anaerobio de aguas residuales fácilmente acidificable. *Ingeniería y Competitividad*. 10 (2): 41-52.
- Pomeón, T. y Cervantes, J. (2010). *El sector lechero y quesero en México entre 1900 a 2009. Entre lo global y local*. "Reportes de Investigaciones". Universidad Autónoma de Chapingo. <http://repositorio.chapingo.edu.mx:8080/handle/20.500.12098/163>.
- Pavlostathis, S. y Giraldo, E. (1991). Kinetics of anaerobic treatment: A critical review. *Critical reviews in environmental control* 21(5-6): 411-490.
- Rawson, H. y Gómez, H. (2001). *Trigo regado, manejo del cultivo*. ISBN: 92-5-304488-8. Roma, Italia: FAO.
- Ruíz, I., Álvarez, J. y Soto, M. (2002). *El potencial de la digestión anaerobia en el tratamiento de aguas residuales urbanas y efluentes de baja carga orgánica*. Universidad de Coruña, Fac. de Ciencias, Campus de Zapateira. España.
- RWL WATER. (2019). *Soluciones de tratamiento de aguas, aguas residuales y reúso*. Consultado en Octubre 2019, de <http://www.rwlwater.com/?lang=es>

- Schnürer, A. y Jarvis, A. (2010). *Microbiological Handbook for Biogas Plants*, Malmö: Svenskt Gastekniskt Center AB.
- Seba, E. (2013). *Evaluación de un sistema lagunar in situ a escala piloto para el tratamiento de aguas residuales lácteas del municipio de Miahuatlán, Veracruz*. Tesis para obtener el grado de Ing. Quím., Universidad Veracruzana, Fac. Xalapa. México.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2000). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación del suelo, estudio, muestreo y análisis. México: Diario Oficial de la Federación.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). *Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final*. México: Diario Oficial de la Federación.
- Sobrero, M. Y Ronco, L. (2004). *Ensayo de toxicidad aguda con semillas de lechuga "Lactuca Sativa L.* En Castillo, G., *Ensayos toxicológicos y métodos de evaluación da calidad de agua* (pp. 220).
- Sosnowski, P., Wieczorek, A. y Ledakowicz, S. (2003). Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid wastes. *Environmental research* 7: 609-616.
- Speece, R. (1983). Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatment. *Environmental Science and Technology*. 17(9): 416-427.
- Spreer, E. (1975). *Lactología industrial, leche, preparación y elaboración, maquinas, instalaciones y aparatos, productos lácteos*. 2da Ed. España: Ed. Acribia.
- Steffen, R., Szolar, O. y Braun, R. (1998). *Feedstocks for anaerobic digestion*. Institute for Agrobiotechnology Tulln. University of Agricultural Sciences. Vienna.
- Tchobanoglous, G. y Crites, R. (2000). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. México: McGraw Hill.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H. y Vígil, S. (1994). *Gestión integral de residuos sólidos*. Vol. I y II Madrid, España: McGraw-Hill.
- Valencia, E. y Ramírez, M. (2009). La industrial de la leche y la contaminación del agua. *Elementos* (73): 27-31.
- Van Lier, J. (1993). *Digestión anaerobia termofílica, aspectos relacionados con la temperatura*. Seminario D.A.A.R. Valladolid, Yucatán, México.
- Varnero, M. (2011). *Manual de biogás*. ISBN: 978-95-306892-0. FAO, Santiago de Chile.

Capítulo 10 Agricultura sostenible: herramienta para la soberanía alimentaria

Chapter 10 Sustainable agriculture: a tool for food sovereignty

GONZÁLEZ-LEÓN, Yared †*, ANDUCHO-REYES, Miguel Angel, CARTAGENA-LUNA, Adriana y MERCADO-FLORES, Yuridia

Universidad Politécnica de Pachuca

ID 1^{er} Autor: *Yared, González-León* / **ORC ID:** 0000-0002-7053-4214, **CVU CONACYT:** 605765

ID 1^{er} Coautor: *Miguel Agel, Anducho-Reyes* / **ORC ID:** 0000-0003-2401-6608, **CVU CONACYT:** 89678

ID 2^{do} Coautor: *Adriana, Cartagena-Luna* / **ORC ID:** 0000-0002-1649-3706, **CVU CONACYT:** 715603

ID 3^{er} Coautor: *Yuridia, Mercado-Flores* / **ORC ID:** 0000-0003-3278-2783, **CVU CONACYT:** 122168

DOI: 10.35429/H.2020.8.142.153

Y. González, M. Anducho, A. Cartagena y Y. Mercado

arodiberna@ugto.mx

A. Marroquín, J. Olivares, L. Cruz y A. Bautista. (Coord) Ciencias ambientales, uso de recursos. Handbooks-©ECORFAN-México, Querétaro, 2020.

Resumen

La agricultura, ha sido una de las actividades económicas de mayor importancia a lo largo de la humanidad, ya que está relacionada directamente con la producción de alimentos. A lo largo de la historia los problemas del hambre se han ido solucionando con la finalidad de abastecer a toda la población, lo que llevó al desarrollo de la revolución verde, con lo cual, se logró un incremento importante en la productividad agrícola, sin embargo, el uso excesivo de agroquímicos como fertilizantes y plaguicidas, ha tenido un efecto negativo al medio ambiente, ocasionando la erosión de los suelos y amenazando el entorno socioeconómico, en donde una gran proporción de la población se encuentra inmersa. Como una alternativa a esta problemática surge la agricultura de conservación, que tiene como objetivo, hacer uso eficiente de los recursos naturales disponibles de manera amigable con el ambiente, y así lograr una producción agrícola sostenible que garantice la soberanía alimentaria de la población más vulnerable.

Cultivo agrícola, Labranza de conservación, Revolución verde

Abstract

Agriculture has been one of the most important economic activities for the humanity, due to this is directly related to the food production. Throughout history, the hunger problems have been solved in order to supply the entire population, which led to the development of the green revolution, thereby achieving a significant increase in agricultural productivity, however, the excessive use of agrochemicals, such as, fertilizers and pesticides has had a negative effect on the environment, causing soil degradation and threatening the socioeconomic environment, in where a lot of proportion of the population is immersed. Conservation agriculture arises as an alternative to this problem, its aims to make efficient use of available natural resources in an environmentally friendly way, and thus achieve sustainable agricultural production that guarantees the food sovereignty of the most vulnerable population.

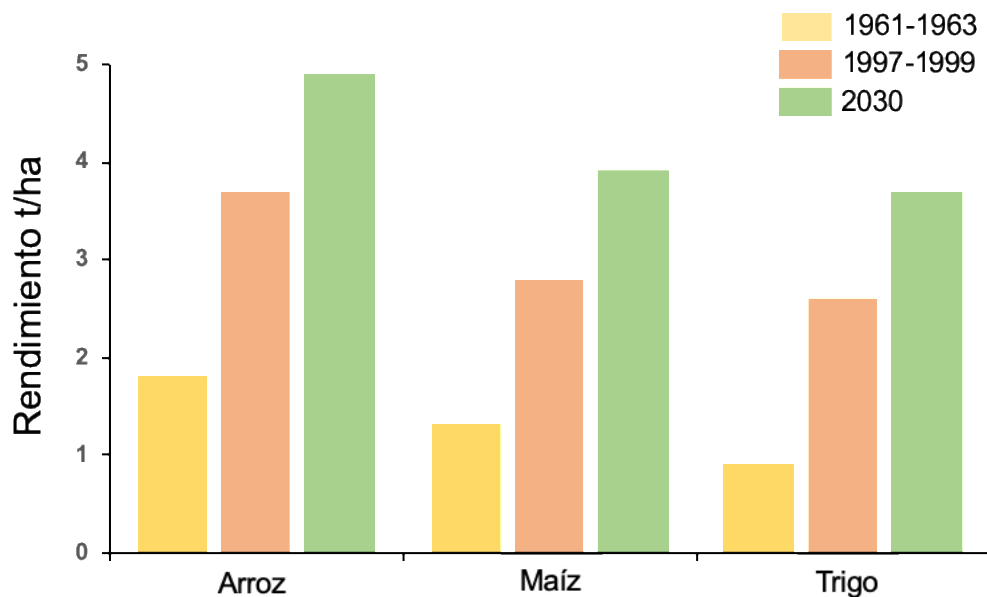
Agricultural crop, Conservation tillage, Green revolution

10. Introducción: La agricultura y su importancia

Etimológicamente la palabra agricultura es de origen griego, la cual se forma de la raíz agrós (ἀγρός), que significa campo y del sufijo -ura que expresa actividad, por lo que es toda acción relacionada con la producción de alimentos de origen vegetal, por lo que su importancia no solo radica en la producción generada y las hectáreas cosechadas, más bien es parte fundamental de la subsistencia humana, por lo que más de un tercio de la superficie del planeta es destinada para tal fin (Sámamo, 2013; Levine y col., 2011).

El sector agrícola es considerado como el motor de la economía, ya que fomenta la diversificación hacia otras áreas, desde la generación de empleos, hasta el suministro de insumos que proveen a industrias agroalimentarias. En el 2017 representó el 68% del empleo total en los países de bajos ingresos y el 26% de su PIB (FAO, 2017; Piña, 2019), por lo que esta actividad debería representar uno de los sectores económicos más importantes para la reducción de la pobreza, lo cual ha sido demostrado por diferentes estudios, sin embargo, la población más vulnerable se ubica en zonas agrarias, en donde se localizan comunidades rurales que dependen de la agricultura para ganarse la vida, dicho problema ha causado que mundialmente 400 millones de niños vivan en pobreza extrema, provocando 6 millones de muertes en menores de 5 años por desnutrición (Conrad y col, 2018; Raymond y col., 2011). En 2018 más de 820 millones de personas seguían padeciendo hambre en todo el mundo, lo que representa un inmenso reto para alcanzar el segundo objetivo de Desarrollo Sostenible según la Organización de las Naciones Unidas (ONU), que refiere que para el 2030 se deberá poner fin al hambre, por lo que, para abastecer el sector alimenticio, se necesitará producir más del doble de lo que se logró en los años sesenta (Figura 10.1), (FAO, 2018).

Figura 10.1 Comparación de la producción de diferentes cultivos durante los 60s y 90s con la predicción de la cantidad necesaria para lograr poner fin al hambre en el 2030, según los objetivos de desarrollo sostenible de la ONU



Fuente consultada y modificada: FAO, 2018

La agricultura siempre será un sector indispensable y de constante trabajo; un ejemplo, es el problema que se enfrenta con la actual pandemia de la enfermedad COVID-19, lo cual ha puesto a prueba la capacidad de las empresas tanto públicas y privadas de los sectores industrial, financiero, alimentario, farmacéutico y de salud; sin embargo, esto lleva a la reflexión de la realidad que día a día enfrenta la humanidad, puesto que los alimentos de primera necesidad no pueden faltar. Aunque gran parte de los fondos en la economía mundial se usaron para el sector salud, un ejemplo, es que mientras que la mayoría de las empresas tuvieron la necesidad de parar sus actividades, los agricultores permanecieron produciendo, reinventándose e incluso ajustando los costos para abastecer a toda la población, por lo que se debe valorar el trabajo que existe atrás de cada uno de los productos agrícolas, que en la mayoría de los casos se tienen de fácil acceso en mercados locales (Dubé y col., 2012; Mie y col., 2017; García y Damiani, 2020).

Otro de los retos a superar para el desarrollo de la agricultura es el cambio climático, que ha traído como consecuencia el incremento en la temperatura, inundaciones y al mismo tiempo sequías en distintos sitios geográficos, lo que causa importantes daños a los cultivos y a la economía de los productores. Por otro lado, la escasez de recursos naturales como el agua y la biodiversidad, aunado a que en la actualidad el suelo a nivel mundial presenta más del 40% de degradación, es necesario buscar nuevas técnicas que permitan hacer más eficaz la producción y disponibilidad de alimentos (Foley y col., 2011; FAO, 2018).

10.1 La revolución verde

La revolución verde surgió en la década de los sesentas, buscando una solución para lidiar con el hambre en el mundo mediante el uso de la tecnología e insumos mejorados, como fertilizantes, pesticidas, herbicidas, y otros insumos agrícolas de origen químico. El resultado fue el incremento en la tasa de productividad agrícola, primordialmente en cereales. Los campos comenzaron hacer abastecidos con infraestructura de riego, lo que sigue siendo un componente crítico en esta intervención, ya que este sistema es suministrado en su mayoría con aguas negras, lo que ha despertado desconfianza en los consumidores. Posteriormente en los años noventa surgió una nueva etapa de este movimiento, en donde se involucró el aspecto genético y el uso de la biotecnología aplicando la ingeniería genética, con la misma finalidad (McArthur y McCord, 2017).

La primera revolución verde tenía como principal soporte, la selección genética de nuevas variedades de semillas, esto para aumentar el rendimiento en los cultivos, principalmente de los tres granos con más demanda, el arroz, el trigo y el maíz; con los cuales se realizaron importantes estudios para lograr tener híbridos que permitieran abastecer el sector alimentario, asociada a la explotación intensiva permitida por el riego y el uso masivo de fertilizantes químicos y de maquinaria pesada (Li y col., 2018).

Mientras tanto el segundo movimiento, tuvo como principal objetivo el desarrollo de Organismos Genéticamente Modificados (OGM), en el caso de la agricultura, son conocidos como plantas transgénicas; los cuales, son organismos diseñados haciendo uso de herramientas moleculares que consisten en la transferencia de información genética deseable, de un organismo a otro, para después manipular la estructura natural por la modificación de su genoma (Mendelsohn, y Wang, 2017).

El análisis de la producción agrícola durante el periodo que abarca del año 1960 al 2000, ha permitido determinar un importante aumento en los rendimientos por hectáreas en productos de mayor necesidad alimentaria, como por ejemplo, un 208 % para el trigo, 109 % para el arroz, 157 % para el maíz, 78 % para la papa y 36 % para la yuca, que con el objetivo de asegurar la producción, se han utilizado agroquímicos de manera desmedida, sin embargo, esto ha traído importantes problemas principalmente al medio ambiente como se describe en la **Tabla 1** (FAO, 2016; FAO, 2017;).

Con respecto a la superficie ocupada para la agricultura, a nivel mundial, se observó un incremento de un 12% como resultado del cambio de uso de suelo en América Latina, África, Oceanía y Asia (**Tabla 10.2, Figura 10.1A**). El sistema de riego también fue mayoritariamente preferido en África, Asia, Norteamérica y Oceanía, contribuyendo en un aumento del 46% a nivel mundial (**Tabla 2, Figura 1B**). Por otro lado, a excepción de Norteamérica, el uso de maquinaria pesada y el consumo de combustibles incrementó considerablemente (**Tabla 10.2, Figura 10.1C-D**), al igual que el uso de fertilizantes, siendo el nitrógeno el más utilizado a nivel mundial (**Tabla 10.2, Figura 10.1E-G**). Lo anterior, ha contribuido en la degradación de los suelos agrícolas y en la contaminación ambiental (FAO y col., 2019).

La FAO proyecta un aumento en la demanda mundial de alimentos de alrededor del 60% para el año 2030, por tal motivo se busca implementar nuevas técnicas que permitan incrementar la producción y que su impacto ambiental sea bajo (FAO, 2018).

Tabla 10.1 Ventajas y desventajas de la Revolución Verde

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Incremento de la productividad agrícola	Uso excesivo de agroquímicos
Abastecimiento alimenticio, evitando el hambre de millones de personas	Pérdida de la fertilidad del suelo
Acceso al agua por la implementación de infraestructura de riego	Se seleccionan plagas cada vez más resistentes a los pesticidas y herbicidas
Mejoras genéticas en variedades de semillas, con características deseadas	Pérdida de biodiversidad en el suelo
Reducción de poblaciones que presentaban pobreza	Contaminación en aire, suelo y agua
Disminución en la conversión de miles de hectáreas de suelos en cultivos agrícolas	Daños a la salud de los agricultores por contacto o por ingestión

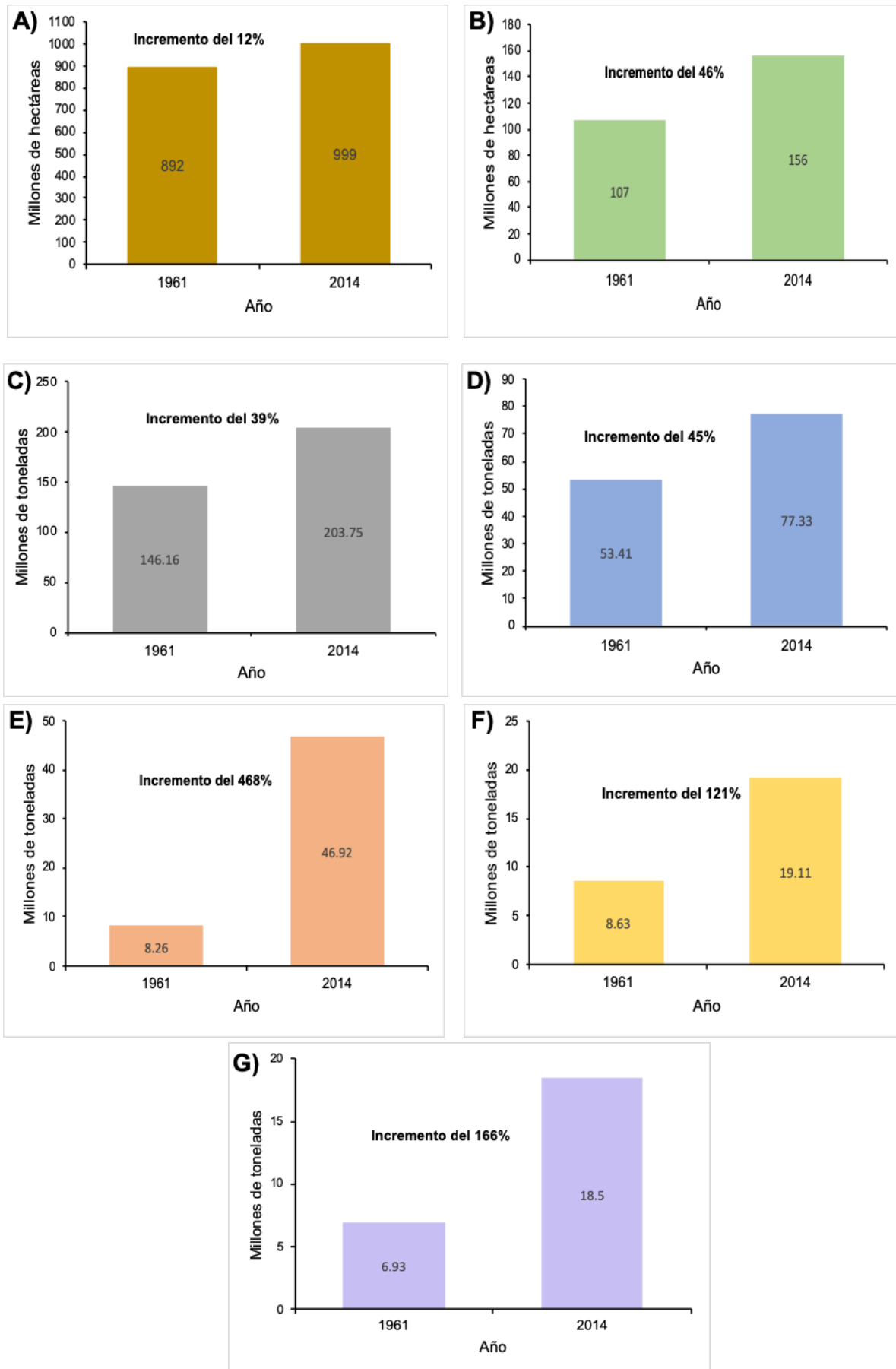
Fuente consultada y modificada: (FAO, 2017; Martínez-Hidalgo y col., 2019)

Tabla 10.2 Evolución de los insumos requeridos para la agricultura a nivel mundial durante el periodo de año 1961 al 2014.

Región	Suelo cultivado		Suelo con sistema de riego		Maquinaria		Combustible		Fertilizante Nitrógeno		Fertilizante Fósforo		Fertilizante Potasio	
	Millones de hectáreas				Millones de toneladas									
	1961	2014	1961	2014	1961	2014	1961	2014	1961	2014	1961	2014	1961	2014
África	76	120	2	55	1.02	1.3	0.51	0.65	0.07	1.08	0.15	0.52	0.04	0.29
Asia	115	161	15	40	0.85	35.45	0.32	13.3	0.34	9.23	0.24	3.28	0.04	3.84
Europa	353	288	14	13	40.2	59.74	17.59	26.1	4.37	12.63	4.65	2.83	4.49	2.91
América latina	83	175	55	18	2.85	14.71	1.25	6.43	0.28	7.32	0.27	6.42	0.14	6.26
Norteamérica	235	208	20	27	96.31	87.31	32.1	29.1	3.16	15.26	2.73	5.15	2.17	4.97
Oceanía	30	47	1	3	4.93	5.24	1.64	1.75	0.04	1.4	0.59	0.91	0.05	0.23

Fuente consultada y modificada: (FAO y col., 2019).

Figura 10.2 Incremento en los insumos requeridos para la agricultura a nivel mundial durante el periodo de año 1961 al 2014. A) Superficie de suelo. B) Sistema de riego. C) Maquinaria pesada. D) Combustibles. E) Fertilizantes a base de Nitrógeno. F) Fertilizantes a base de Fósforo. G) Fertilizantes a base de Potasio.



Fuente consultada: (FAO y col., 2019)

10.2 Sostenibilidad y su diferencia con sustentabilidad

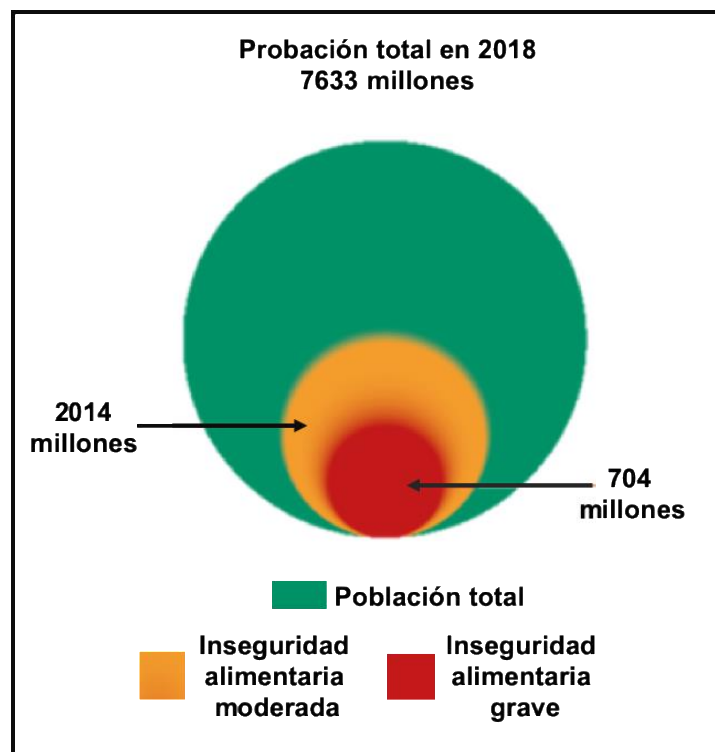
Actualmente el tema de los alimentos y la incertidumbre que existe en su disponibilidad, ha llevado a la búsqueda de nuevas alternativas que permitan dar un equilibrio sociocultural; dicho argumento se encuentra asociado a la pobreza, ya que las personas con inseguridad alimentaria se han visto obligadas a aceptar menos calidad o cantidad en lo que consumen debido a la falta de recursos económicos (Figura 3). Lo anterior, no es solo un problema local, pues, está relacionado con el agotamiento de las reservas de divisas y la devaluación de la moneda, que puede transmitirse al sistema económico y provocar el aumento de los precios nacionales, generando desempleo, disminución de sueldos y, en consecuencia, pérdida de ingresos. De los países donde han sido más intensas las repercusiones adversas de las desaceleraciones y debilitamientos de la economía, la gran mayoría de ellos dependen de las exportaciones e importaciones de productos básicos primarios, por lo que la seguridad alimentaria y nutrición se ve seriamente afectada (FAO, 2019; Di Fabio, 2017).

En los últimos años se busca mejorar distintos sectores que incrementen la calidad de vida de los seres humanos, sin impactar al medio ambiente, haciendo uso de la sustentabilidad y de la sostenibilidad, sin embargo, estos dos términos han generado confusión, para lo cual han sido discutidos, como temas relevantes para la supervivencia de la humanidad (Di Fabio, 2017).

Uno de los primeros términos conocidos fue el de la sustentabilidad, la cual atiende los problemas generados por la actividad humana y que pueden impactar en el medio ambiente de manera negativa, así como, las carencias que se tienen en la satisfacción de las necesidades de las sociedades; articulando los problemas que se presentan con sus consecuencias. En este caso, el enfoque debe ser multidisciplinario, en donde la participación de todas las ciencias y de las nuevas disciplinas que integren el conocimiento actual son fundamentales (Rockström y col., 2017).

Por otro lado, la sostenibilidad satisface tres ámbitos: el económico, el ambiental y el social, este último término hace la diferencia con la sustentabilidad, ya que contribuye a garantizar un equilibrio, puesto que correlaciona la estabilidad del ser humano, en donde lograr la equidad es fundamental, por lo que, en este caso, todos los estratos sociales se benefician del crecimiento económico, satisfaciendo las necesidades básicas de cada individuo establecidas en los principios generales de los tratados internacionales sobre los derechos humanos (Warren y col., 2015; Wamsler y col., 2018; Giunta y González, 2020).

Figura 10.3 Representación de la concentración y la distribución de la inseguridad alimentaria a nivel mundial en el 2018



Fuente consultada: (FAO y col., 2019)

10.3 Tipos de labranza y agricultura de conservación

La agricultura tradicional es aquella práctica agrícola en la que se eliminan todos los restos de la cosecha anterior, y se utiliza maquinaria o herramientas para arar el suelo, es decir, abrir los surcos en donde serán sembradas las semillas. En la actualidad la quema de residuos ha sido utilizada desde décadas atrás como herramienta de trabajo para la preparación del terreno, ya que trae consigo ventajas como; evitar el uso de maquinaria, combustible y mano de obra, así como el ahorro de tiempo en la preparación de la próxima siembra. Se estima que la actividad humana es responsable de la pérdida de 26 millones de toneladas de suelo por año, lo que significa 2.6 veces la tasa natural de la degradación, por lo que la aplicación de la labranza de conservación o labranza cero, es una opción para disminuir los daños, principalmente ambientales y de degradación de suelos que repercuten de cierta forma en la seguridad alimentaria. Este método se basa en mantener la materia orgánica que se genera de las cosechas anteriores, sembrando directamente sobre el rastrojo sin alteración del suelo. En la Tabla 3 se muestran las diferencias entre éstas dos estrategias (Hobbs y col., 2008; Mamani y Filippone, 2018; Ryan y col., 2018).

Se ha estimado que existen pérdidas de hasta 44 mil millones de dólares anuales por daños a los suelos de cultivo, a la infraestructura y a la salud. Por lo que hay la creciente necesidad de implementar métodos amigables con el medio ambiente y que garantice la disponibilidad de alimentos de manera sostenible (Warren y col., 2015; Carrus y col., 2018).

Tabla 10.3 Diferencias entre labranza tradicional y la labranza de conservación.

Concepto	Labranza tradicional	Labranza de conservación
Práctica	Perturba el suelo y deja una superficie desnuda	Reduce la perturbación del suelo y lo mantiene cubierto
Erosión	Alta por el viento	Reducida significativamente
Salud física del suelo	Baja	Mejorada significativamente
Salud biológica del suelo	Baja	Mejorada significativamente
Compactación	Se usa para reducir la compactación, pero puede inducirla destruyendo los poros biológicos	Se reduce la compactación
Humedad	Baja	Alta
Materia orgánica disponible	Baja	Alta
Control de malezas	Bajo	Bajo
Temperatura del suelo	Variable	Variabilidad reducida
Uso de combustibles	Alto	Intermedio
Costos de producción	Altos	Intermedio

Fuente consultada y modificada: (Hobbs y col., 2008)

La agricultura de conservación se ha propuesto como una amplia forma de adaptación de algunos principios de manejo agronómico, que puede asegurar una mayor producción. Tiene como objetivo conservar, mejorar y hacer uso más eficiente de los recursos naturales a través del manejo integrado de los que hay disponibles, combinando insumos externos ecológicamente amigables, lo que trae como consecuencia una producción agrícola mejorada y sostenida (Hobbs y col., 2008; Aguilar, 2017; Peña, 2017), que ocurre principalmente en tres pasos (Figura 4); los cuales se describen a continuación.

A) Reducción en la labranza: Aunque puede involucrar sistemas de siembra con labranza controlada, que por lo general no perturban más del 20-25% de la superficie del suelo, la finalidad es lograr un sistema de cero movimiento en los residuos que se generaron de la cosecha anterior (Milder y col., 2015).

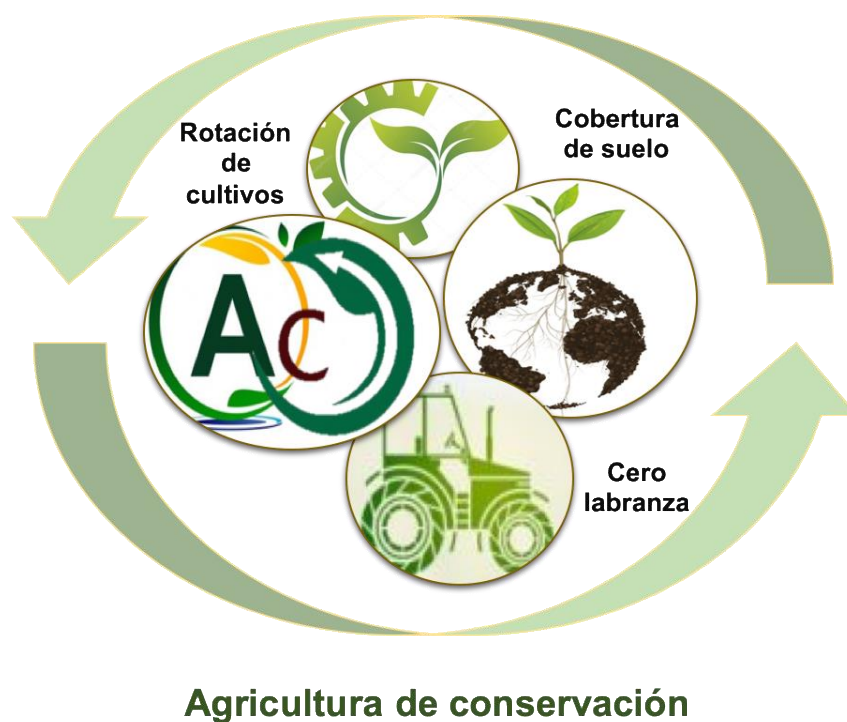
B) Retención de los niveles adecuados de residuos del cultivo y cobertura de la superficie del suelo: el objetivo es la retención de suficientes residuos sobre el suelo para protegerlo de la erosión hídrica y eólica, así como reducir los escurrimientos y la evaporación de agua, aumentando las propiedades físicas, químicas y biológicas asociadas con una productividad sostenible a largo plazo (Prestele y col., 2018).

C) Uso de rotación de cultivos: el objetivo es la diversificación de cultivos para ayudar a evitar posibles problemas de malezas, enfermedades y plagas, utilizando los efectos benéficos de algunas especies vegetales de interés económico sobre las condiciones del suelo y sobre la productividad, proporcionando a los agricultores opciones económicamente viables que minimicen los riesgos (Muñoz, 2009).

Mediante la agricultura de conservación, se mejora la calidad del suelo, lo cual incide en sus características físicas, químicas y biológicas (Prestele y col., 2018).

Las propiedades físicas del suelo condicionan el desarrollo del sistema radicular de las plantas y el aporte hídrico. Los terrenos que se trabajan con la labranza cero se vuelven más estables y menos susceptibles al deterioro estructural, mientras que los labrados de manera convencional son propensos a la erosión, ya que la textura de un suelo está determinada por las cantidades y el tamaño de las partículas minerales inorgánicas que contiene, por lo que la estructura es un factor clave en su funcionamiento y en la evaluación de la sostenibilidad de los sistemas de producción de cultivos (Hirsch y col., 2018; Gouda y col., 2018).

Figura 10.4 Principios de la agricultura sostenible.



Fuente: "Elaboración Propia"

Bajo el sistema de labranza cero, disminuye la densidad del suelo, lo que permite que las raíces tengan la capacidad de penetrar las capas más profundas, es decir aumenta la porosidad conservando mayor humedad, de lo contrario una densidad alta puede ser perjudicial para las raíces e incluso inhibir la infiltración del agua (Hirsch y col., 2018; Gouda y col., 2018).

Los factores biológicos son determinados por la actividad de los microorganismos del suelo, puesto que los cambios en la labranza, los residuos y las prácticas de rotación de los cultivos inducen importantes variaciones en el número y composición de la microbiota.

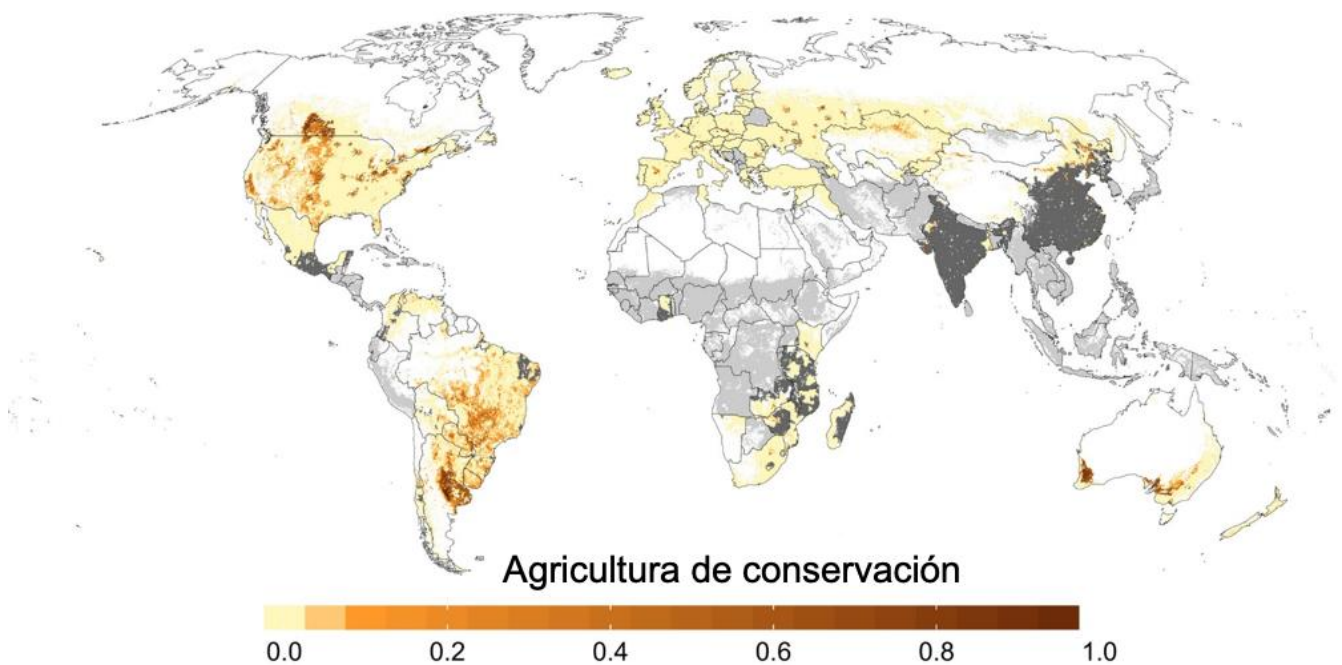
Cuando se implementa agricultura de conservación, aumenta la actividad biológica y esto se debe a que en el suelo existe materia orgánica que permite el desarrollo de diversos microorganismos, algunos de ellos pueden ser benéficos para las plantas (Gouda y col., 2018; Wu y col., 2019; do Nascimento y col., 2020).

Los componentes químicos, hacen referencia a la reserva de nutrientes para las plantas. Su disponibilidad se ve favorecida en la agricultura de conservación, por los beneficios que otorgan las propiedades biológicas y físicas que se logran en el suelo, proporcionando elementos de suma importancia para el desarrollo vegetal como los macronutrientes: Nitrógeno, Fósforo y Potasio, y los micronutrientes: Azufre, Calcio, Magnesio, Hierro, Zinc, Cobre, Manganeso y Boro (Raman, 2017; Porter y col., 2019).

Económicamente, se han obtenido resultados donde se muestra que con el uso de la agricultura de conservación se genera un ahorro considerable en la lámina de agua y preparación del terreno, además de obtener mayor producción por hectárea, lo que puede implicar una disminución en los costos de producción (Aguilar, 2017; Peña, 2017); por tal motivo esto contribuye a fomentar una soberanía alimentaria, donde se fortalecen tanto los derechos de las personas que producen, como las que distribuyen y consumen alimentos, mediante la aplicación de sistemas o técnicas en campo, como también políticas alimentarias justas, forjando así una seguridad sostenible para toda la población (Galli, y Losch, 2019).

En la actualidad esta práctica ya es utilizada en más de 72 países, siendo más importante en Estados Unidos, Canadá, Australia y Nueva Zelanda (Figura 5). En el primero, la agricultura de conservación ocurre principalmente en la parte occidental y central, que se caracteriza por un clima más árido. En Australia, se concentra principalmente en las zonas templadas del suroeste y sureste (Prestele y col., 2018; Noguera y col., 2019).

Figura 10.5 Distribución espacial actual de Agricultura de Conservación. (Las áreas en las diferentes tonalidades de gris indican suelos de cultivo que se excluyeron del mapeo debido a la falta de datos)



Fuente de consulta: (Prestele y col., 2018)

10.4 Conclusión

El incremento en la población y el compromiso de lograr la desaparición del hambre en la humanidad para el 2030, lleva a la búsqueda de estrategias sostenibles que permitan la disponibilidad de alimentos y la soberanía alimentaria en los países en vías de desarrollo, por lo que es necesario impulsar la agricultura de conservación, como una estrategia, que permita proveer sustento a los pueblos, rechazando la privatización de los recursos naturales, utilizando prácticas que no perjudiquen al medio ambiente, para combatir la hambruna, la pobreza y la desnutrición.

10.5 Referencias

Aguilar C. H. (2017) Maíz bajo los sistemas de producción convencional, convencional modificado y Agricultura de Conservación. *Revista Enlace*, 41:38–40.

Carrus, G., Pirchio, S., y Mastandrea, S. (2018). Social-cultural processes and urban affordances for healthy and sustainable food consumption. *Front Psychol*, 9: 2407–2411. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02407>

Conrad, Z., Niles, M. T., Neher, D. A., Roy, E. D., Tichenor, N. E., y Jahns, L. (2018). Relationship between food waste, diet quality, and environmental sustainability. *PloS one*, 13: e0195405. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195405>

Di Fabio A. (2017). The Psychology of Sustainability and Sustainable Development for Well-Being in Organizations. *Front Psychol*, 8: 1534. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01534>

do Nascimento, F. S., Calle-Collado, Á., & Benito, R. M. (2020). Economía social y solidaria y agroecología en cooperativas de agricultura familiar en Brasil como forma de desarrollo de una agricultura sostenible. *CIRIEC-España, revista de economía pública, social y cooperativa*, (98), 189-211. DOI: <https://doi.org/10.7203/CIRIEC-E.98.14161>

Dubé, L., Pingali, P., y Webb, P. (2012). Paths of convergence for agriculture, health, and wealth. *PNAS USA*, 109: 12294–12301. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0912951109>

FAO Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2016). Desarrollo agrícola sostenible para la seguridad alimentaria y la nutrición: ¿qué función desempeña la ganadería?. Disponible en línea: <http://www.fao.org/3/a-mq860s.pdf>. Consultado en Junio de 2020.

FAO Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2017). El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Disponible en línea: <http://www.fao.org/3/a-I7658s.pdf> Consultado en Junio de 2020.

FAO Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2018). El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Servicio de información migración, agricultura y desarrollo rural. Disponible en línea: <http://www.fao.org/3/I9549ES/i9549es.pdf>. Consultado en Junio de 2020.

FAO Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2019). 2019, el estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo. Disponible en línea: <http://www.fao.org/3/ca5162es/ca5162es.pdf>. Consultado en Junio de 2020.

Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., Mueller, N. D., O'Connell, C., Ray, D. K., West, P. C., Balzer, C., Bennett, E. M., Carpenter, S. R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., Tilman, D., Zaks, D. P. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478: 337–342. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature10452>

Galli, A., y Losch, A. (2019). Beyond planetary protection: What is planetary sustainability and what are its implications for space research?. *Life Sci Space Res (Amst)*, 23: 3–9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2019.02.005>

- García, A., y Damiani, O. (2020). Sistemas de riego y agricultura prehispánica en el centro oeste de Argentina. *RIVAR*, 7: 22–45. DOI: <http://orcid.org/0000-0002-3537-5879>
- Giunta, I., & González, J. D. (2020). Crecimiento económico inclusivo y sostenible en la Agenda 2030: un análisis crítico desde la perspectiva de la soberanía alimentaria y los derechos de la naturaleza. *Revista Iberoamericana de Estudios de Desarrollo= Iberoamerican Journal of Development Studies*, 9(1), 146–176. DOI: https://doi.org/10.26754/ojs_ried/ijds.438
- Gouda, S., Kerry, R. G., Das, G., Paramithiotis, S., Shin, H. S., y Patra, J. K. (2018). Revitalization of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable development in agriculture. *Microbiol Res*, 206: 131–140. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2017.08.016>
- Hirsch, A. L., Prestele, R., Davin, E. L., Seneviratne, S. I., Thiery, W., y Verburg, P. H. (2018). Modelled biophysical impacts of conservation agriculture on local climates. *Global Change Biology*, 24: 4758–4774. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14362>
- Hobbs, P. R., Sayre, K., y Gupta, R. (2008). The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. *Phil. Trans. R. Soc. B*, 363: 543–555. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2169>
- Levine, U. Y., Teal, T. K., Robertson, G. P., y Schmidt, T. M. (2011). Agriculture's impact on microbial diversity and associated fluxes of carbon dioxide and methane. *The ISME journal*, 5: 1683–1691. DOI: <https://doi.org/10.1038/ismej.2011.40>
- Li, S., Tian, Y., Wu, K., Ye, Y., Yu, J., Zhang, J., Liu, Q., Hu, M., Li, H., Tong, Y., Harberd, N. P., y Fu, X. (2018). Modulating plant growth-metabolism coordination for sustainable agriculture. *Nature*, 560: 595–600. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0415-5>
- Mamani de Marchese, A., y Filippone, M.P. (2018). Bioinsumos: componentes claves de una agricultura sostenible. *Rev Agron Noroeste Argent*, 38: 9–21.
- Martínez-Hidalgo, P., Maymon, M., Pule-Meulenberg, F., y Hirsch, A. M. (2019). Engineering root microbiomes for healthier crops and soils using beneficial, environmentally safe bacteria. *Can J Microbiol*, 65: 91–104. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjm-2018-0315>
- McArthur, J. W., y McCord, G. C. (2017). Fertilizing growth: Agricultural inputs and their effects in economic development. *J Dev Econ*, 127: 133–152. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2017.02.007>
- Mendelsohn, R., y Wang, J. (2017). The impact of climate on farm inputs in developing countries agriculture. *Atmósfera*, 30: 77–86. DOI: <https://doi.org/10.20937/ATM.2017.30.02.01>
- Mie, A., Andersen, H. R., Gunnarsson, S., Kahl, J., Kesse-Guyot, E., Rembiałkowska, E., Quaglio, G., y Grandjean, P. (2017). Human health implications of organic food and organic agriculture: a comprehensive review. *Environ health*, 16:111. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12940-017-0315-4>
- Milder, J. C., Arbuthnot, M., Blackman, A., Brooks, S. E., Giovannucci, D., Gross, L., Kennedy, E. T., Komives, K., Lambin, E. F., Lee, A., Meyer, D., Newton, P., Phalan, B., Schroth, G., Semroc, B., Van Rikxoort, H., y Zrust, M. (2015). An agenda for assessing and improving conservation impacts of sustainability standards in tropical agriculture. *Conserv Biol*, 29: 309–320. DOI: <https://doi.org/10.1111/cobi.12411>
- Muñoz, A., López-Piñeiro, A., Albarrán, A., y Ramírez, M. (2009) Influencia de la agricultura de conservación en la temperatura del suelo y su relación con las poblaciones microbianas. *Revista de Ciencias Agrarias*, 32: 123–129.
- Noguera-Talavera, A., Salmerón, F., y Reyes-Sánchez, N. (2019). Bases teórico-metodológicas para el diseño de sistemas agroecológicos. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*, 51: 273–293.
- Peña, H. (2017). Modificación de maquinaria para la Agricultura de Conservación. *Revista Enlace*, 41:3–6.

- Piña, B.C.E. (2019). Cambio climático, inseguridad alimentaria y obesidad infantil. *Revista Cubana de Salud Pública*, 45: 1561–3127.
- Porter, J. R., Challinor, A. J., Henriksen, C. B., Howden, S. M., Martre, P., y Smith, P. (2019). Invited review: Intergovernmental Panel on Climate Change, agriculture, and food—A case of shifting cultivation and history. *Glob Chang Biol*, 25: 2518–2529. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14700>
- Prestele, R., Hirsch, A. L., Davin, E. L., Seneviratne, S. I., y Verburg, P. H. (2018). A spatially explicit representation of conservation agriculture for application in global change studies. *Glob Chang Biol*, 24: 4038–4053. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14307>
- Raman R. (2017). The impact of Genetically Modified (GM) crops in modern agriculture: A review. *GM Crops Food*, 8: 195–208. DOI: <https://doi.org/10.1080/21645698.2017.1413522>
- Raymond Park, J., McFarlane, I., Hartley Phipps, R., y Ceddia, G. (2011). The role of transgenic crops in sustainable development. *Plant Biotechnol J*, 9: 2–21. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1467-7652.2010.00565.x>
- Rockström, J., Williams, J., Daily, G., Noble, A., Matthews, N., Gordon, L., Wetterstrand, H., DeClerck, F., Shah, M., Steduto, P., de Fraiture, C., Hatibu, N., Unver, O., Bird, J., Sibanda, L., y Smith, J. (2017). Sustainable intensification of agriculture for human prosperity and global sustainability. *Ambio*, 46: 4–17. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0793-6>
- Ryan, S. F., Adamson, N. L., Aktipis, A., Andersen, L. K., Austin, R., Barnes, L., Beasley, M. R., Bedell, K. D., Briggs, S., Chapman, B., Cooper, C. B., Corn, J. O., Creamer, N. G., Delborne, J. A., Domenico, P., Driscoll, E., Goodwin, J., Hjarving, A., Hulbert, J. M., Isard, S. y Dunn, R. R. (2018). The role of citizen science in addressing grand challenges in food and agriculture research. *Proc. R. Soc. B*, 285: 20181977. DOI: <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2018.1977>
- Sámano, R.M.A. (2013). La agroecología como una alternativa de seguridad alimentaria para las comunidades indígenas. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 4: 1251–1266.
- Wamsler, C., Brossmann, J., Hendersson, H., Kristjansdottir, R., McDonald, C., y Scarampi, P. (2018). Mindfulness in sustainability science, practice, and teaching. *Sustain Sci*, 13: 143–162. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11625-017-0428-2>
- Warren, E., Hawkesworth, S. y Knai, C. (2015). Investigating the association between urban agriculture and food security, dietary diversity, and nutritional status: A systematic literature review. *Food Policy*, 53: 54–66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2015.03.004>
- Wu, Q., Guan, X., Zhang, J., y Xu, Y. (2019). The Role of Rural Infrastructure in Reducing Production Costs and Promoting Resource-Conserving Agriculture. *Int J Environ Res Public Health*, 16: 3493. DOI: <https://doi.org/10.3399>

Instructions for Scientific, Technological and Innovation Publication

Título en Times New Roman y Negritas No. 14 en Español e Inglés]

Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 1^{er} Autor†*, Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 1^{er} Coautor, Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 2^{do} Coautor y Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 3^{er} Coautor

Institución de Afiliación del Autor incluyendo dependencia (en Times New Roman No.10 y Cursiva)

International Identification of Science - Technology and Innovation

ID 1st author: (ORC ID - Researcher ID Thomson, arXiv Author ID - PubMed Author ID - Open ID) and CVU 1st author: (Scholar-PNPC or SNI-CONACYT) (No.10 Times New Roman)

ID 1st coauthor: (ORC ID - Researcher ID Thomson, arXiv Author ID - PubMed Author ID - Open ID) and CVU 1st coauthor: (Scholar or SNI) (No.10 Times New Roman)

ID 2nd coauthor: (ORC ID - Researcher ID Thomson, arXiv Author ID - PubMed Author ID - Open ID) and CVU 2nd coauthor: (Scholar or SNI) (No.10 Times New Roman)

ID 3rd coauthor: (ORC ID - Researcher ID Thomson, arXiv Author ID - PubMed Author ID - Open ID) and CVU 3rd coauthor: (Scholar or SNI) (No.10 Times New Roman)

(Report Submission Date: Month, Day, and Year); Accepted (Insert date of Acceptance: Use Only ECORFAN)

Citación: Primer letra (EN MAYUSCULAS) del Nombre del 1^{er} Autor. Apellido, Primer letra (EN MAYUSCULAS) del Nombre del 1^{er} Coautor. Apellido, Primer letra (EN MAYUSCULAS) del Nombre del 2^{do} Coautor. Apellido, Primer letra (EN MAYUSCULAS) del Nombre del 3^{er} Coautor. Apellido

Correo institucional [Times New Roman No.10]

Primera letra (EN MAYUSCULAS) del Nombre Editores. Apellidos (Coord) *Título del Handbook [Times New Roman No.10]*, Temas Selectos del área que corresponde ©ECORFAN- Filial, Año.

Instructions for Scientific, Technological and Innovation Publication

Abstract

Texto redactado en Times New Roman No.12, espacio sencillo, en inglés.

Indicar (3-5) palabras clave en Times New Roman y Negritas No.12

1 Introducción

Texto redactado en Times New Roman No.12, espacio sencillo.

Explicación del tema en general y explicar porque es importante.

¿Cuál es su valor agregado respecto de las demás técnicas?.

Enfocar claramente cada una de sus características.

Explicar con claridad el problema a solucionar y la hipótesis central.

Explicación de las secciones del Capítulo.

Desarrollo de Secciones y Apartados del Capítulo con numeración subsecuente

[Título en Times New Roman No.12, espacio sencillo y Negrita]

Desarrollo de Capítulos en Times New Roman No.12, espacio sencillo.

Inclusión de Gráficos, Figuras y Tablas-Editables

En el *contenido del Capítulo* todo gráfico, tabla y figura debe ser editable en formatos que permitan modificar tamaño, tipo y número de letra, a efectos de edición, estas deberán estar en alta calidad, no pixeladas y deben ser notables aun reduciendo la imagen a escala.

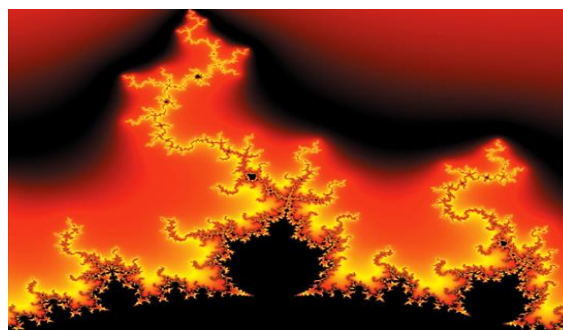
[Indicando el título en la parte Superior con Times New Roman No.12 y Negrita, señalando la fuente en la parte Inferior centrada con Times New Roman No. 10]

Tabla 5.1 Título

Particiones	Valores	Log
P1	7.58	0.88
P2	7.62	0.88
P3	7.58	0.88
P4	7.59	0.88
P5	7.57	0.88
P6	7.58	0.88
P7	7.57	0.88

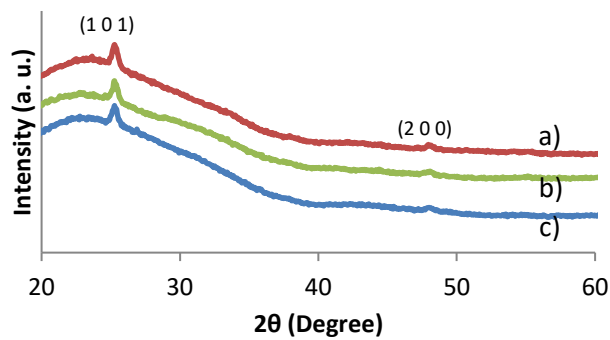
Fuente de Consulta:
(No deberán ser imágenes, todo debe ser editable)

Figura 1.1 Título



Fuente de Consulta:
(No deberán ser imágenes, todo debe ser editable)

Gráfico 1.1 Título



Fuente de Consulta:

(No deberán ser imágenes, todo debe ser editable)

Cada Capítulo deberá presentar de manera separada en **3 Carpetas**: a) Figuras, b) Gráficos y c) Tablas en formato .JPG, indicando el número en Negrita y el Título secuencial.

Para el uso de Ecuaciones, señalar de la siguiente forma:

$$P = \frac{[V_V - P_V]^{1/2}}{V_O - P^{Uh}} + \frac{3}{4} \left[\frac{(P^{VL})}{(P_u)} \right] \rightarrow \int_{V^{La}}^J \quad (1)$$

Deberán ser editables y con numeración alineada en el extremo derecho.

Metodología a desarrollar

Dar el significado de las variables en redacción lineal y es importante la comparación de los criterios usados.

Resultados

Los resultados deberán ser por sección del Capítulo.

Anexos

Tablas y fuentes adecuadas.

Agradecimiento

Indicar si fueron financiados por alguna Institución, Universidad o Empresa.

Conclusiones

Explicar con claridad los resultados obtenidos y las posibilidades de mejora.

Referencias

Utilizar sistema APA. **No** deben estar numerados, tampoco con viñetas, sin embargo, en caso necesario de numerar será porque se hace referencia o mención en alguna parte del Capítulo.

Ficha Técnica

Cada Capítulo deberá presentar en un documento Word (.docx):

Nombre del Handbook

Título del Capítulo

Abstract

Keywords

Instructions for Scientific, Technological and Innovation Publication

Secciones del Capítulo, por ejemplo:

1. *Introducción*
2. *Descripción del método*
3. *Análisis a partir de la regresión por curva de demanda*
4. *Resultados*
5. *Agradecimiento*
6. *Conclusiones*
7. *Referencias*

Nombre de Autor (es)

Correo Electrónico de Correspondencia al Autor

Referencias

Requerimientos de Propiedad Intelectual para su edición:

-Firma Autógrafa en Color Azul del Formato de Originalidad del Autor y Coautores

-Firma Autógrafa en Color Azul del Formato de Aceptación del Autor y Coautores

Reserva a la Política Editorial

ECORFAN Handbooks se reserva el derecho de hacer los cambios editoriales requeridos para adecuar la Obra Científica a la Política Editorial del Ecorfan Handbooks. Una vez aceptada la Obra Científica en su versión final, el Ecorfan Handbooks enviará al autor las pruebas para su revisión. Ecorfan® únicamente aceptará la corrección de erratas y errores u omisiones provenientes del proceso de edición de la revista reservándose en su totalidad los derechos de autor y difusión de contenido. No se aceptarán supresiones, sustituciones o añadidos que alteren la formación de la Obra Científica.

Código de Ética – Buenas Prácticas y Declaratoria de Solución a Conflictos Editoriales

Declaración de Originalidad y carácter inédito de la Obra Científica, de Autoría, sobre la obtención de datos e interpretación de resultados, Agradecimientos, Conflicto de intereses, Cesión de derechos y distribución

La Dirección de Ecorfan-México, S.C reivindica a los Autores de la Obra Científica que su contenido debe ser original, inédito y de contenido Científico, Tecnológico y de Innovación para someterlo a evaluación.

Los Autores firmantes de la Obra Científica deben ser los mismos que han contribuido a su concepción, realización y desarrollo, así como a la obtención de los datos, la interpretación de los resultados, su redacción y revisión. El Autor de correspondencia de la Obra Científica propuesto requisitara el formulario que sigue a continuación.

Título de la Obra Científica:

- El envío de una Obra Científica a Ecorfan Handbooks emana el compromiso del autor de no someterlo de manera simultánea a la consideración de otras publicaciones seriadas para ello deberá complementar el Formato de Originalidad para su Obra Científica, salvo que sea rechazado por el Comité de Arbitraje, podrá ser retirado.
- Ninguno de los datos presentados en esta Obra Científica ha sido plagiado ó inventado. Los datos originales se distinguen claramente de los ya publicados. Y se tiene conocimiento del testeado en PLAGSCAN si se detecta un nivel de plagio Positivo no se procederá a arbitrar.
- Se citan las referencias en las que se basa la información contenida en la Obra Científica, así como las teorías y los datos procedentes de otras Obras Científicas previamente publicados.
- Los autores firman el Formato de Autorización para que su Obra Científica se difunda por los medios que Ecorfan-México, S.C. en su Holding México considere pertinentes para divulgación y difusión de su Obra Científica cediendo sus Derechos de Obra Científica.
- Se ha obtenido el consentimiento de quienes han aportado datos no publicados obtenidos mediante comunicación verbal o escrita, y se identifican adecuadamente dicha comunicación y autoría.
- El Autor y Co-Autores que firman este trabajo han participado en su planificación, diseño y ejecución, así como en la interpretación de los resultados. Asimismo, revisaron críticamente el trabajo, aprobaron su versión final y están de acuerdo con su publicación.
- No se ha omitido ninguna firma responsable del trabajo y se satisfacen los criterios de Autoría Científica.
- Los resultados de esta Obra Científica se han interpretado objetivamente. Cualquier resultado contrario al punto de vista de quienes firman se expone y discute en la Obra Científica.

Copyright y Acceso

La publicación de esta Obra Científica supone la cesión del copyright a ECORFAN-Mexico, S.C en su Holding México para su ECORFAN Handbooks, que se reserva el derecho a distribuir en la Web la versión publicada de la Obra Científica y la puesta a disposición de la Obra Científica en este formato supone para sus Autores el cumplimiento de lo establecido en la Ley de Ciencia y Tecnología de los Estados Unidos Mexicanos, en lo relativo a la obligatoriedad de permitir el acceso a los resultados de Investigaciones Científicas.

Título de la Obra Científica:

Nombre y apellidos del Autor de contacto y de los Coautores	Firma
1.	
2.	
3.	
4.	

Principios de Ética y Declaratoria de Solución a Conflictos Editoriales

Responsabilidades del Editor

El Editor se compromete a garantizar la confidencialidad del proceso de evaluación, no podrá revelar a los Árbitros la identidad de los Autores, tampoco podrá revelar la identidad de los Árbitros en ningún momento.

El Editor asume la responsabilidad de informar debidamente al Autor la fase del proceso editorial en que se encuentra el texto enviado, así como de las resoluciones del arbitraje a Doble Ciego.

El Editor debe evaluar los manuscritos y su contenido intelectual sin distinción de raza, género, orientación sexual, creencias religiosas, origen étnico, nacionalidad, o la filosofía política de los Autores.

El Editor y su equipo de edición de los Holdings de ECORFAN® no divulgarán ninguna información sobre la Obra Científica enviado a cualquier persona que no sea el Autor correspondiente.

El Editor debe tomar decisiones justas e imparciales y garantizar un proceso de arbitraje por pares justa.

Responsabilidades del Consejo Editorial

La descripción de los procesos de revisión por pares es dado a conocer por el Consejo Editorial con el fin de que los Autores conozcan cuáles son los criterios de evaluación y estará siempre dispuesto a justificar cualquier controversia en el proceso de evaluación. En caso de Detección de Plagio a la Obra Científica el Comité notifica a los Autores por Violación al Derecho de Autoría Científica, Tecnológica y de Innovación.

Responsabilidades del Comité Arbitral

Los Árbitros se comprometen a notificar sobre cualquier conducta no ética por parte de los Autores y señalar toda la información que pueda ser motivo para rechazar la publicación de la Obra Científica. Además, deben comprometerse a mantener de manera confidencial la información relacionada con la Obra Científica que evalúan.

Cualquier manuscrito recibido para su arbitraje debe ser tratado como documento confidencial, no se debe mostrar o discutir con otros expertos, excepto con autorización del Editor.

Los Árbitros se deben conducir de manera objetiva, toda crítica personal al Autor es inapropiada.

Los Árbitros deben expresar sus puntos de vista con claridad y con argumentos válidos que contribuyan al que hacer Científico, Tecnológica y de Innovación del Autor.

Los Árbitros no deben evaluar los manuscritos en los que tienen conflictos de intereses y que se hayan notificado al Editor antes de someter la Obra Científica a evaluación.

Responsabilidades de los Autores

Los Autores deben garantizar que sus Obras Científicas son producto de su trabajo original y que los datos han sido obtenidos de manera ética.

Los Autores deben garantizar no han sido previamente publicados o que no estén siendo considerados en otra publicación seriada.

Los Autores deben seguir estrictamente las normas para la publicación de Obra Científica definidas por el Consejo Editorial.

Los Autores deben considerar que el plagio en todas sus formas constituye una conducta no ética editorial y es inaceptable, en consecuencia, cualquier manuscrito que incurra en plagio será eliminado y no considerado para su publicación.

Los Autores deben citar las publicaciones que han sido influyentes en la naturaleza de la Obra Científica presentado a arbitraje.

Servicios de Información

Indización - Bases y Repositorios

RESEARCH GATE	For international bibliographer's manager
MENDELEY	For basification of data from scientific journals
GOOGLE SCHOLAR	For your international search specialized in retrieving scientific documents
REDIB	Ibero-American Network of Innovation and scientific knowledge-CSIC

Servicios Editoriales:

Identificación de Citación e Índice H.
Administración del Formato de Originalidad y Autorización.
Testeo del Chapter con PLAGSCAN.
Evaluación de Obra Científica.
Emisión de Certificado de Arbitraje.
Edición de Obra Científica.
Maquetación Web.
Indización y Repositorio
Publicación de Obra Científica.
Certificado de Obra Científica.
Facturación por Servicio de Edición.

Política Editorial y Administración

143 - 50 Itzopan, Ecatepec de Morelos – México. Tel: +52 1 55 6159 2296, +52 1 55 1260 0355, +52 1 55 6034 9181; Correo electrónico: contact@ecorfan.org www.ecorfan.org

ECORFAN®

Editor en Jefe

VARGAS-DELGADO, Oscar. PhD

Directora Ejecutiva

RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD

Director Editorial

PERALTA-CASTRO, Enrique. MsC

Diseñador Web

ESCAMILLA-BOUCHAN, Imelda. PhD

Diagramador Web

LUNA-SOTO, Vladimir. PhD

Asistentes Editoriales

SERRUDO-GONZÁLES, Javier. BsC

Traductor

DÍAZ-OCAMPO, Javier. BsC

Filóloga

RAMOS-ARANCIBIA, Alejandra. BsC

Publicidad y Patrocinio

(ECORFAN®- Mexico- Bolivia- Spain- Ecuador- Cameroon- Colombia- El Salvador- Guatemala- Nicaragua- Peru- Paraguay- Democratic Republic of The Congo- Taiwan),sponsorships@ecorfan.org

Licencias del Sitio

03-2010-032610094200-01-Para material impreso, 03-2010-031613323600-01-Para material electrónico, 03-2010-032610105200-01-Para material fotográfico, 03-2010-032610115700-14-Para Compilación de Datos, 04 -2010-031613323600-01-Para su página Web, 19502-Para la Indización Iberoamericana y del Caribe, 20-281 HB9-Para la Indización en América Latina en Ciencias Sociales y Humanidades, 671-Para la Indización en Revistas Científicas Electrónicas España y América Latina, 7045008-Para su divulgación y edición en el Ministerio de Educación y Cultura-España, 25409-Para su repositorio en la Biblioteca Universitaria-Madrid, 16258-Para su indexación en Dialnet, 20589-Para Indización en el Directorio en los países de Iberoamérica y el Caribe, 15048-Para el registro internacional de Congresos y Coloquios. financingprograms@ecorfan.org

Oficinas de Gestión

244 Itzopan, Ecatepec de Morelos–México.

21 Santa Lucía, CP-5220. Libertadores -Sucre–Bolivia.

38 Matacerquillas, CP-28411. Morazarzal –Madrid-España.

18 Marcial Romero, CP-241550. Avenue, Salinas I - Santa Elena-Ecuador.

1047 La Raza Avenue -Santa Ana, Cusco-Peru.

Boulevard de la Liberté, Immeuble Kassap, CP-5963.Akwa- Douala-Cameroon.

Southwest Avenue, San Sebastian – León-Nicaragua.

6593 Kinshasa 31 – Republique Démocratique du Congo.

San Quentin Avenue, R 1-17 Miralvalle - San Salvador-El Salvador.

16 Kilometro, American Highway, House Terra Alta, D7 Mixco Zona 1-Guatemala.

105 Alberdi Rivarola Captain, CP-2060. Luque City- Paraguay.

Distrito YongHe, Zhongxin, calle 69. Taipei-Taiwán.

43 Calle # 30 -90 B. El Triunfo CP.50001. Bogotá-Colombia.

