

DIGITAL CIENCIA@UAQRO

VOLUMEN 15 NÚMERO 1

ISSN: 2395 – 8847

ENERO – JUNIO 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
DIRECCIÓN DE POSGRADO





PRESENTACIÓN

En este número, los artículos que se presentan abordan temas relacionados con las ciencias naturales y exactas y, que impactan en el tratamiento de importantes problemáticas contempladas en las áreas prioritarias de atención en el país. El primer artículo, titulado **Residuos de frutas y vegetales como materias primas para la producción de biocombustibles: potencial en el estado de Guanajuato**, presenta la problemática que existe en las ciudades por el manejo de residuos orgánicos, la investigación describe un panorama general acerca de la generación de residuos orgánicos en México, y posteriormente, se realiza un análisis enfocado en los residuos de frutas y verduras producidos en el estado de Guanajuato. Se discutirá acerca de su disponibilidad, sus características y la normatividad vigente en torno a su manejo. Asimismo, se discutirá su potencial como materia prima para la obtención de biocombustibles.

El siguiente artículo denominado **¿Cómo afecta la escasez de agua a la producción de tus alimentos y qué estrategias agrícolas se han implementado para reducir su impacto?** Nos alerta del grave descuido que se tiene con el vital líquido durante el proceso de producción de alimentos ya que cerca del 70% del agua disponible para consumo humano es utilizada en la agricultura para la producción de alimentos; sin embargo, se desaprovecha alrededor del 60% debido a que la infraestructura de riego es obsoleta, está desgastada y presenta fugas; también porque se presentan pérdidas por evaporación del agua de riego presente en el suelo y al uso no eficiente de este recurso, es decir, que no se aprovecha totalmente el agua utilizada. Para abatir esta situación en documento

proporciona algunas estrategias para afrontar la escasez hídrica en la agricultura como la obtención de plantas genéticamente modificadas, que, aunque aún no tiene una amplia aceptación por parte de productores y consumidores, permite producir plantas con resistencia a la sequía; mejores prácticas agrícolas, la mejora de sistemas de riego que permita la reducción del agua utilizada; y el riego deficitario, el cual permite un ahorro de agua significativo para la producción de alimentos, que va del 26 hasta el 80 %, entre otras.

A continuación, el artículo **Modelos matemáticos y biorefinerías: sinergia hacia la sustentabilidad** muestra otra importante problemática que es la relacionada con el incremento en las demandas de alimentos, combustibles, materias primas, y algunos otros productos químicos por lo que la satisfacción de las necesidades actuales sin comprometer los recursos disponibles para futuras generaciones. El contenido del documento nos muestra que en la última década las comunidades científicas, gubernamentales y tecnológicas han enfocado sus esfuerzos en ello y, una alternativa es la conversión de biomasas mediante esquemas de biorefinerías que permite aprovecharlas en su totalidad para generar biocombustibles, así como bioenergía y la optimización matemática resulta ser una herramienta poderosa que puede emplearse para realizar dicha tarea.

En el artículo **Abatimiento de expansión en suelo aplicando concreto permeable** se analiza la aplicación de estructuras fabricadas con concreto permeable para la disminución del potencial de expansión de un suelo. Para realizar este estudio se extrajo una muestra de suelo en Querétaro, Querétaro y se sometió a ensayos geotécnicos para caracterizarlo. Posteriormente se estudiaron 3 dosificaciones distintas de

concreto permeable de baja resistencia a la compresión, para determinar la mezcla óptima en la elaboración de las estructuras de concreto. Las dimensiones de las estructuras investigadas se establecieron en 8 cm de diámetro y alturas de 5 y 7 mm aproximadamente. Se realizaron pruebas de expansión al suelo natural y posteriormente al suelo con la incorporación de las estructuras de concreto permeable. Los resultados mostraron que el suelo en estudio corresponde a un limo inorgánico de alta compresibilidad o alta plasticidad (MH) y la estructura de concreto permeable más favorable fue la de 7 mm de altura, al abatir el 85% de la expansión.

Por último, el artículo **Proceso para la realización de una revisión bibliográfica en investigaciones clínicas** muestra los resultados de un estudio documental con el fin de hacer una propuesta para la realización de marcos teóricos para investigaciones clínicas. En esta propuesta se describen las etapas para realizar un proceso de revisión bibliográfica en el área clínica que inician con la generación de una pregunta de revisión, seguido por la identificación de las fuentes de información, la utilización de criterios de selección, así como estrategias de búsqueda. Posteriormente, se clasifica y se agrupa la información encontrada en matrices de sistematización.

Con estas investigaciones la Universidad Autónoma de Querétaro da cuenta de la generación del conocimiento que se desarrolla en la institución.

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Editora en jefe



Comité Editorial

Ciencias Físico Matemáticas:

Dra. Janet Ledesma García. Facultad de Ingeniería UAQ

Dr. Enrique González Sosa Facultad de Ingeniería UAQ

Ciencias de Psicología y Pedagogía

Dra. Evelyn Díez-Martínez Facultad de Psicología UAQ

Dr. Martín Mora Martínez Universidad de Guadalajara

Ciencias Socio Políticas

Dr. Gabriel Muro González Facultad de Ciencias Políticas y Sociales UAQ

Dra. Sulima del Carmen García Falconi Facultad de Ciencias Políticas y Sociales UAQ

Ciencias Químico Biológicas

Dr. Fernando Chiang Cabrera Instituto de Biología, UNAM

Dra. Mahinda Martínez y Díaz de Salas Facultad de Ciencias Naturales UAQ

Dr. Juan Campos Guillén Facultad de Ciencias Naturales UAQ

Dra. Rosalía Reynoso Camacho Facultad de Química UAQ

Ciencias Jurídicas

Dr. Juan Ricardo Jiménez Gómez Facultad de Derecho UAQ

Dr. Gerardo Porfirio Hernández Aguilar Facultad de Derecho UAQ

Ciencias de la Salud

Dr. Carlos Arámburo de la Hoz Coordinación de Investigación Científica de la UNAM

Dra. Margarita Teresa de Jesús García Gasca Facultad de Ciencias Naturales UAQ

Dra. María Peña Rangel Instituto de Neurobiología, UNAM

Dr. Elhadi Yahia Kazuz Facultad de Ciencias Naturales UAQ

Dra. Olga Patricia García Obregón Facultad de Ciencias Naturales UAQ

Agropecuarias

Dra. Tercia C. Reis de Souza Facultad de Ciencias Naturales UAQ

Dra. Rosalía Ocampo Velázquez Facultad de Ingeniería UAQ

Ciencias Económico Administrativas

Dra. Graciela Lara Gómez Facultad de Contaduría y Administración UAQ

Dr. Jesús Alberto Pastrana Palma Facultad de Contaduría y Administración UAQ

Humanidades

Dra. Valeria Belloro Facultad de Lenguas y Letras UAQ

Dra. María de los Ángeles Aguilar San Román Facultad de Bellas Artes UAQ

Dr. Sergio Rivera Guerrero Facultad de Bellas Artes UAQ

Directorio

Rectora

Dra. Margarita Teresa de Jesús García Gasca

Secretario Académico

Dr. Javier Ávila Morales

Dirección de Investigación y Posgrado

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña

Consejo editorial

Editora en Jefe

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña

Editora

Dra. Azucena de la Concepción Ochoa Cervantes

Coordinación editorial

Lic. María Verónica Muñoz Velázquez

Cuidado de la Edición

Dra. Ester Bautista Botello

Diseño editorial

Lic. Gerson Cornish Mendoza

Comité Evaluador

Dr. Juan Pablo Ramírez Herrejón	Universidad Autónoma de Querétaro
Dr. Pablo Alan Rodríguez Salinas	Universidad Autónoma de Querétaro
Dra. Tércia Cesária Reis de Souza	Universidad Autónoma de Querétaro
Dr. Eduardo Arturo Elizalde Peña	Universidad Autónoma de Querétaro
Dr. Gerardo Israel Pérez Soto	Universidad Autónoma de Querétaro
Dr. Héctor Paul Reyes	Universidad Autónoma de Querétaro
Dr. José Alberto Rodríguez Morales	Universidad Autónoma de Querétaro
Dr. José Luis Reyes Araiza	Universidad Autónoma de Querétaro
Dr. Ricardo Antonio Escalona Villalpando	Universidad Autónoma de Querétaro
Dra. María de la Luz Pérez Rea	Universidad Autónoma de Querétaro
Dra. Teresa López Lara	Universidad Autónoma de Querétaro
Dr. Pablo García Solís	Universidad Autónoma de Querétaro
Dra. Rosa Martha Pérez Serrano	Universidad Autónoma de Querétaro
Dra. Jesica Esther Escobar Cabrera	Universidad Autónoma de Querétaro
M. en Enf. Josué A. Medina Fernández	Universidad de Quintana Roo
Dra. Nildia Yamileth Mejias Brizuela	Universidad Politécnica de Sinaloa

La revista DigitalCiencia@UAQRO es una revista semestral editada y publicada por la Universidad Autónoma de Querétaro, Dirección de investigación y Posgrado. C.U. Cerro de las Campanas S/N, Col. Las Campanas, C.P. 76010, Tel. [442] 192-13-12, http://www.uaq.mx/investigacion/revista_ciencia@uaq/, e-mail: ciencia@uaq.mx. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2014-062610323500-203, ISSN: 2395-8847, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derechos de Autor. Responsable de la última actualización de este número: Dirección de Investigación y Posgrado de la UAQ, Centro Universitario Cerro de las Campanas s/n, Col. Las Campanas, C.P. 76010, Querétaro, Qro., fecha de la última modificación 15 de diciembre de 2021. El diseño de esta revista se financió con recursos de la Universidad Autónoma de Querétaro.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación. Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial del contenido e imágenes de la publicación sin plena autorización de la Universidad Autónoma de Querétaro.

LATINDEX, sistema de Información sobre las revistas de investigación científica técnico-profesionales y de divulgación científica y cultural que se editan en los países de América Latina, El Caribe, España y Portugal, No. 24506. Comité Editorial Revista Digital Ciencia @UAQRO Volumen 15 Número 1.





Índice

RESIDUOS DE FRUTAS Y VEGETALES COMO MATERIAS PRIMAS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES: POTENCIAL EN EL ESTADO DE GUANAJUATO.

*FRUIT AND VEGETABLE WASTES AS RAW MATERIALS TO PRODUCE BIOFUELS:
POTENTIAL IN THE STATE OF GUANAJUATO.*

Gómez-Castro Fernando Israel, González-Guerra Guillermo Manuel, Restrepo-Elorza
María del Pilar, Montiel-Carrillo Amy Pamela, Álvarez-Rivera Karla Yuritzi,
Linares-Luna René Gabriel, Hernández Salvador

8 - 19

¿CÓMO AFECTA LA ESCASEZ DE AGUA A LA PRODUCCIÓN DE TUS ALIMENTOS Y QUÉ ESTRATEGIAS AGRÍCOLAS SE HAN IMPLEMENTADO PARA REDUCIR SU IMPACTO?

*¿HOW DOES WATER SCARCITY AFFECT YOUR FOOD PRODUCTION AND WHAT
AGRICULTURAL STRATEGIES HAVE BEEN IMPLEMENTED TO REDUCE ITS IMPACT?*

Melo-Sabogal Diana Victoria, Contreras-Medina Luis Miguel

20 - 28

MODELOS MATEMÁTICOS Y BIOREFINERÍAS: SINERGIA HACIA LA SUSTENTABILIDAD

MATHEMATICAL MODELS AND BIOREFINERIES: SYNERGY TOWARD SUSTAINABILITY

Martínez-Guido Sergio Iván, Gutiérrez-Antonio Claudia, Toledano-Ayala Manuel,
García-Trejo Juan Fernando

29 - 37

“ABATIMIENTO DE EXPANSIÓN EN SUELO APLICANDO CONCRETO PERMEABLE”

"EXPANSION ABATEMENT IN SOIL BY APPLYING PERMEABLE CONCRETE"

Verdín-Reyes Blanca Angélica, López- Lara Teresa, Hernández- Zaragoza Juan Bosco,
Horta-Rangel Jaime Moisés

38 - 49

PROCESO PARA LA REALIZACIÓN DE UNA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA EN INVESTIGACIONES CLÍNICAS

PROCESS FOR THE DEVELOPMENT OF A LITERATURE REVIEW IN CLINICAL STUDIES

Hernández-Muñoz Adrián Enrique, Rangel-Alvarado Miguel Ángel Alexandro,
Torres-García Lenin, Hernández-Martínez Gustavo, Castillo-Ixta Pierre Kalid,
Olivares-Moreno Leticia Lizzet, Sánchez-Morales Andrea Guadalupe

50 - 61



RESIDUOS DE FRUTAS Y VEGETALES COMO MATERIAS PRIMAS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES: POTENCIAL EN EL ESTADO DE GUANAJUATO.

FRUIT AND VEGETABLE WASTES AS RAW MATERIALS TO PRODUCE BIOFUELS: POTENTIAL IN THE STATE OF GUANAJUATO.

Gómez-Castro Fernando Israel ^{1*}, González-Guerra Guillermo Manuel ², Restrepo-Elorza María del Pilar, Montiel-Carrillo Amy Pamela, Álvarez-Rivera Karla Yuritzi, Linares-Luna René Gabriel ¹, Hernández Salvador ¹

¹ Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Noria Alta s/n, Col. Noria Alta, Guanajuato, Guanajuato, 36050, México.

² Departamento de Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Cerro de la Venada s/n, Guanajuato, Guanajuato, 36040, México.

* Autor de correspondencia, correo: fgomez@ugto.mx

Resumen

El manejo de residuos orgánicos representa una problemática para las ciudades, debido a los grandes volúmenes que se generan diariamente. Entre estos residuos se encuentran aquellos correspondientes a frutas y verduras, los cuales se producen en importantes cantidades en centrales de abasto, mercados y supermercados. Sin embargo, aun cuando ya no sean aptos para el consumo humano, estos residuos pueden emplearse como fuente de carbono para la producción de combustibles y otros derivados. En este trabajo se presentará primero un panorama general acerca de la generación de residuos orgánicos en México, con un posterior análisis enfocado en los residuos de frutas y verduras producidos en el estado de Guanajuato. Se discutirá acerca de su disponibilidad, sus características y la normatividad vigente en torno a su manejo. Asimismo, se discutirá su potencial como materia prima para la obtención de biocombustibles.

Palabras clave: *Residuos de fruta, residuos de verdura, manejo de residuos orgánicos, normatividad.*

Abstract

Organic wastes' handling is an issue for the cities, due to the great volumes daily generated. Among such wastes, those corresponding to fruits and vegetables can be mentioned; these are produced in great amounts in markets and supermarkets. Even when such wastes are no longer suitable for human consumption, they can be employed as carbon source to produce fuels and other derivatives. In this work, a general overview on the generation of organic wastes in Mexico is first presented, followed by an analysis focused on the production of fruit and vegetables wastes in the state of Guanajuato. A discussion is presented in terms of their availability, characteristics and the current normativity related to their handling. Moreover, their potential as raw material to produce biofuels will be discussed.

Keywords: *fruit wastes, vegetable wastes, organic waste management, normativity.*

1. Introducción

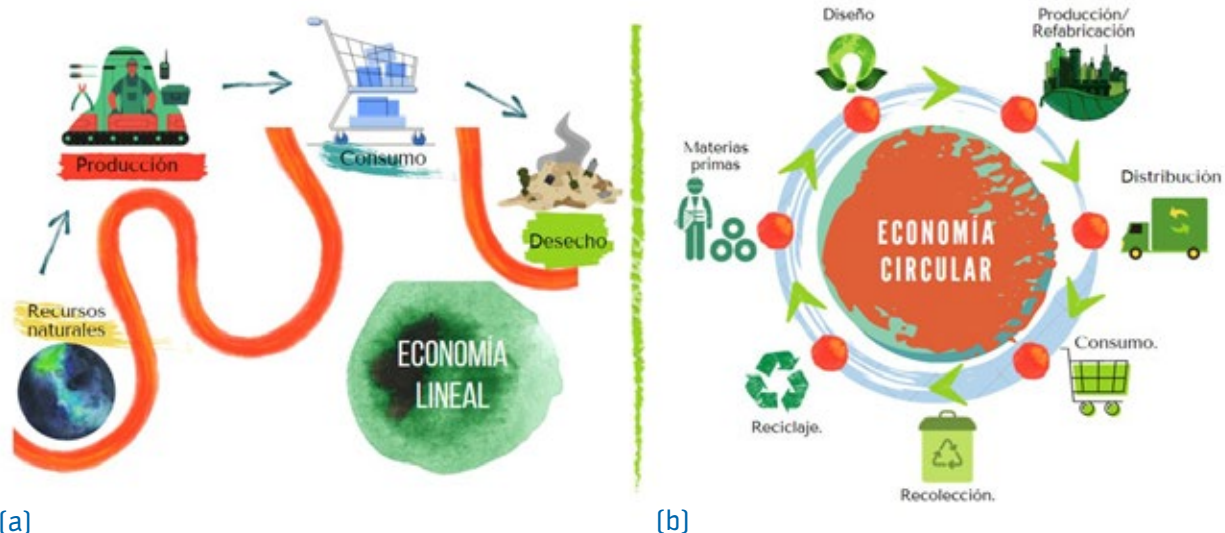
El mundo actual enfrenta una diversidad de retos económicos y medioambientales para los cuales deben establecerse soluciones desde un punto de vista multidisciplinario. La manera tradicional en la que las necesidades del ser humano son satisfechas no es sostenible, lo cual hace necesario modificar los patrones actuales, tanto conductuales como del entorno productivo. El modelo a través del cual se han regido las actividades del ser humano en los últimos años se conoce como economía lineal, en la cual las materias primas son procesadas para obtener productos o servicios, y los residuos generados son desechados. De igual manera, el producto de interés tiene un periodo de vida útil, al final del cual también es desechado (Figura 1.a). Esta estrategia ha llevado a diversos problemas medioambientales. Por ejemplo, los residuos electrónicos, tales como baterías de computadora y teléfonos celulares, entre otros, se acumulan con el paso del tiempo, y contienen metales pesados que pueden contaminar suelos y cuerpos acuáticos (Li y Achal, 2020: 139745). Otro ejemplo está relacionado con la producción de plásticos, los cuales al final de su uso son desechados y pueden acumularse en el océano, donde afectan a las especies acuáticas y pueden incluso ser ingeridos e ingresar a la cadena alimenticia, ocasionando daños a la salud (Chia y col., 2020: 100065). Debido a esto, en

los últimos años ha tomado una mayor importancia el concepto de economía circular, el cual implica dar un uso a los residuos con el fin de satisfacer necesidades ya sea de la población o de los procesos productivos, así como establecer estrategias para la recuperación y re-uso de los productos al término de su vida útil (Figura 1.b). El modelo de economía circular es consistente con diversos de los objetivos de desarrollo sostenible establecidos por la Organización de las Naciones Unidas dentro de su agenda 2030 (ONU México, s.f.).

El uso de residuos para su conversión en productos de utilidad para la sociedad permite evitar su incorrecta disposición, reintegrándolos a la cadena productiva. Así, se contribuye a la creación de un esquema de economía circular. Un tipo de residuo que ha recibido atención en los últimos años corresponde a los residuos orgánicos, particularmente los desechos de frutas y verduras que se generan, entre otros, en mercados, supermercados, e incluso desde la etapa de cosecha. En ocasiones estos residuos ya no están en condiciones para consumo humano, por lo que se convierten en un desecho. Sin embargo, sus características los convierten en una posible fuente de biocombustibles. Así, en el presente trabajo se describirán las características de los residuos de frutas y verduras, su distribución en México, la normatividad que regula el manejo de residuos orgánicos, así como los productos que se pueden obtener a partir del tipo de residuo bajo análisis.

Figura 1

Modelos de producción (a) economía lineal, (b) economía circular.



2. Disponibilidad de residuos en México

En México la gestión integral de residuos sólidos está regulada en términos de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) a nivel federal, estatal y municipal. Esta Ley entró en vigor desde enero de 2004. Las autoridades federales, estatales y municipales son responsables de determinar el volumen y la composición de los residuos sólidos generados, así como la infraestructura y las capacidades disponibles para su procesamiento o transformación. Además, deben identificar las necesidades al respecto, y diseñar programas encaminados a crear las condiciones para satisfacer tales necesidades.

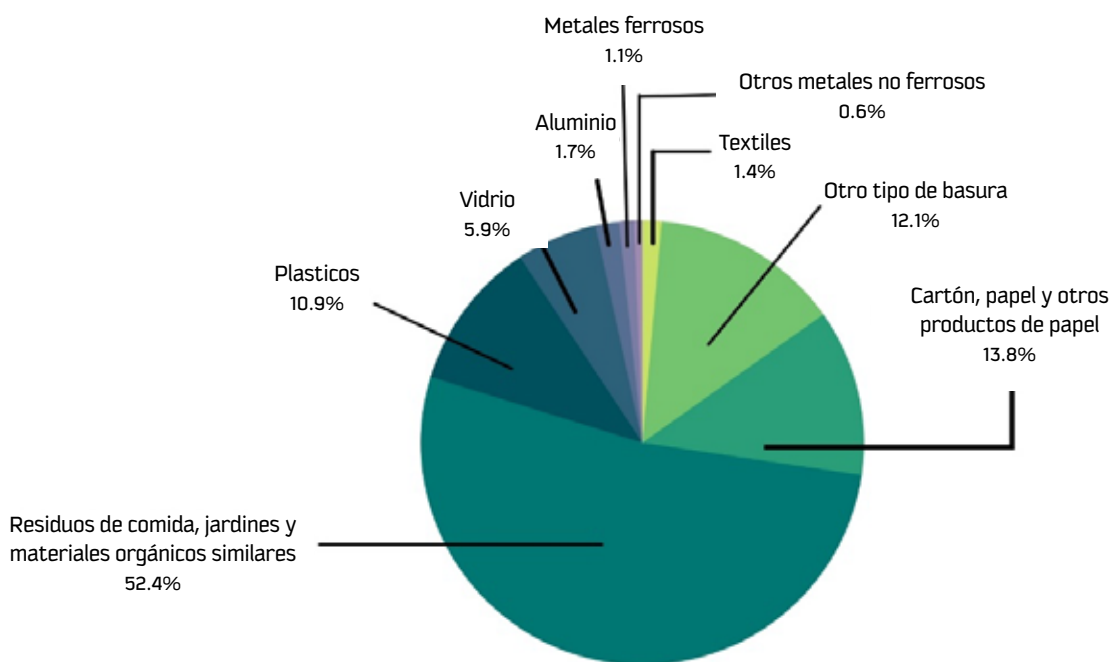
Los residuos se definen formalmente como los materiales o productos que se desechan ya sea en estado sólido, semisólido, líquido o gaseoso, estos necesitan estar sujetos a tratamiento o disposición final con base en lo dispuesto en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (DOF, 2003). Se clasifican de acuerdo con sus características y orígenes en tres grupos: residuos sólidos urbanos (RSU), residuos de manejo especial (RME) y residuos peligrosos (RP).

En México, según la cifra más reciente publicada en 2015, la generación de RSU alcanzó 53.1 millones de toneladas, lo que representó un aumento del 61.2% con respecto a 2003 (10.24 millones de toneladas más generadas en ese período). Si se expresa por habitante, alcanzó 1.2 kilogramos en promedio diariamente en el mismo año.

En general, la predominancia de residuos orgánicos o inorgánicos se asocia a la condición económica de la población: en los países con menores ingresos dominan los de composición orgánica, mientras que en los países con mayores ingresos los residuos son principalmente inorgánicos, con una cantidad importante de productos manufacturados (Acurio y col., 1997). Con el paso de los años, México ha cambiado hacia una composición con una menor predominancia de residuos orgánicos: en la década de los cincuenta, el porcentaje de residuos orgánicos oscilaba entre 65 y 70% de su volumen, mientras que en 2012 esta cifra se redujo a 52.4%, como se puede observar en la Figura 2. En la Figura 3 se puede observar el proceso de manejo y disposición de los residuos. Este proceso se lleva a cabo de acuerdo con la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR).

Figura 2

Composición de los RSU en México, 2012 [SEMARNAT, 2013].



Gómez-Castro Fernando Israel, González-Guerra Guillermo Manuel, Restrepo-Elorza María del Pilar, Montiel-Carrillo Amy Pamela, Álvarez-Rivera Karla Yuritzi, Linares-Luna René Gabriel, Hernández Salvador [pp. 8-19]

Las fuentes bibliográficas consultadas proporcionan una vista panorámica de la gestión de los residuos en México, sin embargo, estas no especifican el manejo y la gestión de residuos de biomasa o de frutas y verduras.

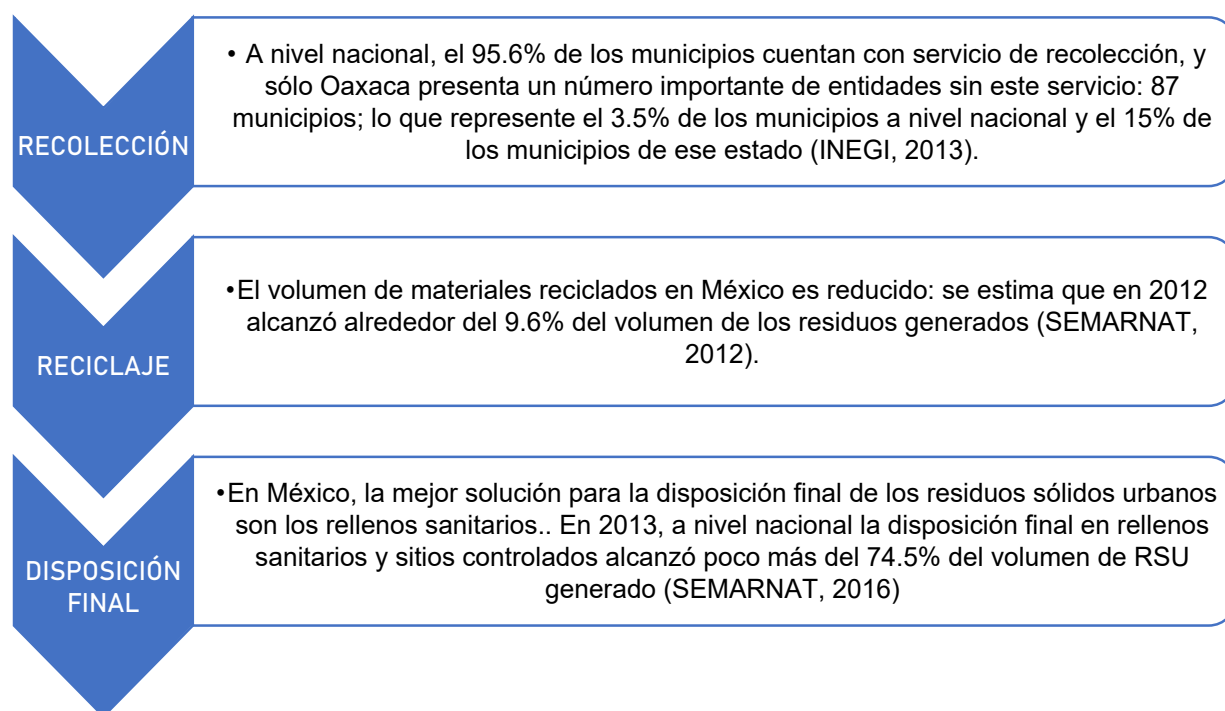
A nivel estatal en Guanajuato la gestión de residuos está regulada por la Ley para la Gestión Integral de Residuos del Estado y los Municipios de Guanajuato (LEGIREMG), además de que con base en el artículo 13 de esta ley se elaboró el Programa Estatal para la Prevención y Gestión Integral de Residuos de Guanajuato (PEPGIRG). Este programa es el principal instrumento de planeación y política ambiental del

Gobierno de Guanajuato en materia de residuos sólidos urbanos, de manejo especial y peligrosos.

Dentro de la composición de los residuos orgánicos que se generan en el estado de Guanajuato, se encuentran principalmente excretas de animales, residuos de plantas, residuos de comida y alimentos, madera, cartón, papel, aceite y lodos de plantas de tratamiento. Los residuos que son de interés para la producción de biocombustibles serían los correspondientes al sector alimenticio, de los cuales se estiman un total de 3,472,573 toneladas anuales (SMAOT, 2020).

Figura 3

Proceso que se sigue a nivel federal, estatal y municipal para el manejo y disposición final de residuos sólidos urbanos.



La cantidad de residuos orgánicos que se estima que son generados en el estado de Guanajuato por el sector alimenticio es de aproximadamente 9,513.90 toneladas diarias. Los municipios que generan la mayor cantidad de residuos orgánicos de acuerdo con los datos del diagnóstico son Irapuato (31.49%), Pénjamo (12.24%) y Celaya (10.86%). Este total de toneladas diarias proviene de diferentes actividades productivas, la agricultura, ganadería y forestal generan un 72.54% de residuos orgánicos, la industria alimentaria (procesadoras de alimentos) 17.91%, los servicios de alojamiento temporal y preparación de alimentos y bebidas (hoteles y

restaurantes) 0.22%, el comercio al por menor (tiendas de autoservicio) 0.7% y el comercio al por mayor (centrales de abastos y mercados públicos) 8.63% (SMAOT, 2020).

3. Distribución de residuos de frutas y verduras en el estado de Guanajuato

A causa de la escasez de información respecto al tipo de residuos orgánicos, en particular residuos de frutas y verduras, en el estado de Guanajuato, los autores de esta contribución han realizado un estudio en las ciudades de Guanajuato, Guanajuato, y León, Guanajuato.

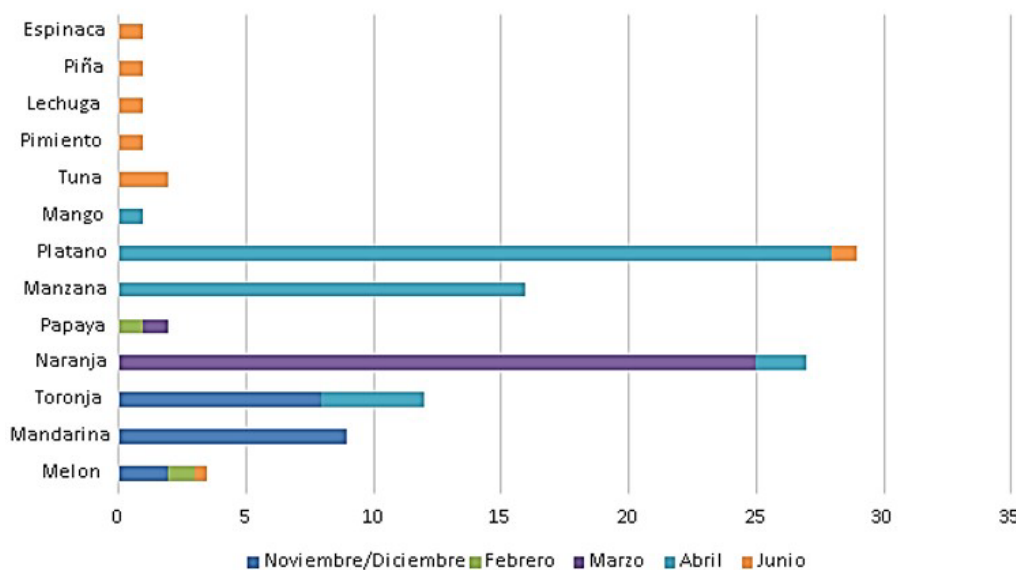
Este análisis tuvo como objetivo evaluar la distribución y características de estos residuos, con enfoque a su aplicación en la elaboración de biocombustibles. Por esta razón, se han obtenido muestras mensuales de residuos agroalimentarios en distintos puntos del estado de Guanajuato durante diferentes temporadas del año. Estas muestras se han obtenido de algunas fruterías y del mercado Hidalgo de la ciudad de Guanajuato, y de la central de abastos de la ciudad de León. Dichas muestras se han analizado para valorar sus características físicas, así como las características de los residuos que pueden impactar en el proceso de conversión a biocombustibles. Entre las características valoradas se encuentra la variación y abundancia del tipo de residuos de frutas y verduras, el aspecto físico de cáscara, pulpa y semillas, la variación de su aspecto con el paso del tiempo, la pérdida de la humedad, así como la presencia de hongos en distintas frutas y verduras observando sus características físicas. De acuerdo con Raven y col. (2019: 14), la presencia de hongos en las muestras es un factor importante por considerar debido a que los hongos tienen la capacidad de reducir las sustancias lignocelulósicas por su mecanismo enzimático, lo cual podría ser útil en el futuro tratamiento de los residuos.

De acuerdo con el análisis de los residuos de biomasa adquiridos (Figura 4), se observa que en temporada de otoño e invierno el tiempo de secado ronda en 20 días y principalmente abunda el melón mientras

que en primavera el tiempo de secado se duplicó, esto debido al incremento de humedad del ambiente en esas temporadas del año, los residuos que se obtuvieron en su mayoría fueron naranja, papaya y plátano. Esta información es importante para la planeación del potencial aprovechamiento de los residuos para la producción de biocombustibles, dadas las variaciones en la composición de cada tipo de residuo, lo cual se describirá con mayor detalle en la sección 3. Debido al cambio de factores climatológicos como humedad y temperatura, el secado de los residuos a condiciones ambiente varía según la temporada del año en la que se hizo el estudio.

Es necesario resaltar que este estudio se ve limitado por diferentes factores, entre ellos se encuentra que las valoraciones se han realizado a distancia debido a la contingencia sanitaria por el virus SARS-CoV-2. Además de esto, las muestras que se han obtenido son pequeñas, lo cual no permite tener un análisis exacto y preciso de la distribución de residuos orgánicos. Por esta razón, se considera un estudio inicial y se tiene la perspectiva de aumentar la cantidad de muestras por temporada con el objetivo de tener un estudio más exacto respecto a la distribución de residuos orgánicos. Sin embargo, el análisis ha permitido obtener información preliminar acerca del tipo de residuos de frutas y verduras que se generan con mayor frecuencia en el estado de Guanajuato, en función de la temporada del año.

Figura 4
Distribución de residuos en las muestras obtenidas.



4. Componentes de los residuos de frutas y verduras

Los residuos de frutas y verduras no son aptos para consumo humano. Sin embargo, aún poseen componentes que los hacen apropiados para su transformación en productos de utilidad para la sociedad. En esta sección se describirán los componentes principales de estos residuos.

Entre los componentes de los residuos de frutas y verduras se encuentran fibras, las cuales se presentan como fibra soluble (pectinas) y fibra insoluble (celulosa y hemicelulosa), con proporciones entre 2 y 9%, dependiendo del tipo de fruta o vegetal. Por otra parte, algunos frutos tienen contenido significativo de grasas en forma de ácidos grasos mono y poliinsaturados, como es el caso del coco (27,0 gr / 100 gr) y el aguacate (13,3 gr / 100 gr). La fracción lipídica de las frutas corresponde a acilglicéridos, glicolípidos, fosfolípidos, carotenoides, triterpenoides y ceras. También poseen carbohidratos, los cuales se encuentran en forma de fructuosa en proporción de 1-8% en las frutas, siendo mayor en las frutas maduras; en las verduras se encuentra entre el 1-6%. Como ejemplo, la remolacha contiene azúcar (10,4 gr / 100 gr). Algunas frutas contienen almidones, como la guanábana (11,9 gr / 100 gr) y el plátano (20,45 gr / 100 gr). Se cuenta también con contenido de proteínas. Las frutas contienen 0,1-1,5% de compuestos nitrogenados y las hortalizas contienen 1-5%; las proteínas constituyen un 35-75% en las frutas y el 35-80% en las hortalizas. Asimismo, contienen vitaminas y minerales, así como una alta proporción de agua (60-95%).

Los componentes contenidos en los residuos de frutas y verduras los hacen candidatos para ser materia prima en la producción de biocombustibles. Las azúcares pueden ser fermentadas para la obtención de alcoholes. Por otra parte, la fracción de celulosa y hemicelulosa puede tratarse para obtener

azúcares adicionales. Asimismo, la fracción lipídica puede emplearse en la producción de biodiésel. La Tabla 1 muestra frutas y verduras comunes en México, con potencial para la síntesis de biocombustibles como el bioetanol, biodiesel y biohidrógeno, así como su composición promedio.

Una de las fracciones útiles en los residuos de frutas y verduras para el posible desarrollo de combustibles está dado por el componente lignocelulósico. Sin embargo, es importante mencionar que un problema para tomar en consideración la lignocelulosa como materia prima para la fabricación de biocombustibles es que la composición química de las lignocelulosas varía mucho entre especies, en este caso para cada una de las frutas y verduras. Debido a esto, resulta importante conocer el tipo de residuos a tratar con el fin de seleccionar un proceso de conversión apropiado. Lo anterior es un claro indicativo de la relevancia del estudio presentado en la sección 3, el cual permite identificar el tipo de residuos con mayor contribución, orientando en la elección del tipo de tratamiento.

Generalmente, la celulosa es el polisacárido estructural dominante de las lignocelulosas seguido de las hemicelulosas y la lignina (Prabhakar Soudham, 2015). La celulosa es una cadena lineal de unidades de glucosa unidas por enlaces $\beta(1 \rightarrow 4)$. Las hemicelulosas se forman principalmente a partir de cinco azúcares: glucosa, galactosa, manosa, xilosa, y arabinosa. La lignina está integrada por compuestos fenólicos que actúan como inhibidores de la fermentación de los azúcares (Santiago-Ortega y col., 2016: 711). Asimismo, los residuos de fruta también cuentan con fracciones con alto contenido de azúcares fermentables. Finalmente, las semillas de algunos de estos residuos, tales como las de aguacate, tienen contenido de aceite que puede ser útil como materia prima para la obtención de biocombustibles (Dagde, 2019: 215).

Gómez-Castro Fernando Israel, González-Guerra Guillermo Manuel, Restrepo-Elorza María del Pilar, Montiel-Carrillo Amy Pamela, Álvarez-Rivera Karla Yuritzi, Linares-Luna René Gabriel, Hernández Salvador [pp. 8-19]

Tabla 1

Composición de vegetales y frutas con potencial para la producción de biocombustibles [Arroyo Uriarte y col., 2018].

VERDURAS	Agua (g)	Energía (kcal)	Proteínas (g)	Grasas (g)	Hidratos de carbono (g)	Almidón (g)	Azúcares (g)	Fibra (g)
Acelgas frescas	87,5	41	2,0	0,4	4,5	3,5	1,0	5,6
Achicoria	92,0	36	1,7	0,3	4,7	4,0	0,7	4,0
Ajo	70,3	118	5,3	0,3	23,0	20,7	2,3	1,1
Berenjena	93,0	27	1,2	0,2	4,4	0,3	4,0	1,2
Calabacín	96,5	14	0,6	0,2	2,2	0,1	2,1	0,5
Calabaza	95,9	15	0,7	0,2	2,2	0,3	1,9	1,0
Cebolla blanca	93,9	23	1,4	0,2	3,5	0,6	2,9	1,0
Cebolleta	92,2	29	1,4	0,0	5,1	0,0	5,1	1,3
Champiñón	91,4	31	1,8	0,3	4,0	0,0	4,0	2,5
Coliflor	92,4	27	2,2	0,2	3,1	0,4	2,7	2,1
Espinacas	89,6	31	2,6	0,3	1,2	0,3	0,9	6,3
Lechuga	95,3	17	1,5	0,3	1,4	0,0	1,4	1,5
Patata	77,3	88	2,5	0,2	18,0	17,1	0,9	2,0
Pepino	96,7	13	0,7	0,2	1,9	0,1	1,8	0,5
Pimiento morrón	89,4	40	1,1	0,4	7,0	0,1	6,9	2,1
Pimiento rojo	90,3	37	1,0	0,4	6,4	0,0	6,4	1,9
Pimiento verde	94,0	23	0,9	0,2	3,7	0,2	3,5	1,2
Rábanos	95,3	17	1,0	0,1	2,7	0,0	2,7	1,0
Remolacha	89,2	37	1,3	0,0	6,4	0,0	6,4	3,1
Tomate	94,0	22	1,0	0,1	3,5	0,1	3,4	1,4
Yuca, mandioca, casava	58,4	164	1,4	0,3	38,1	36,4	1,7	1,8
Zanahoria	88,7	40	0,9	0,2	7,3	0,0	7,3	2,9
FRUTAS								
Aguacate	78,8	141	1,5	12,0	5,9	Tr	5,9	1,8
Arándano	87,8	42	0,6	0,6	6,1	0,0	6,1	4,9
Ciruela	86,3	51	0,6	Tr	11,0	0,0	11,0	2,1
Fresa, fresón	89,6	40	0,7	0,5	7,0	0,0	7,0	2,2
Guayaba	87,6	42	0,9	0,5	5,8	0,0	5,8	5,2
Kiwi	85,9	55	1,1	0,5	10,6	0,0	10,6	1,9
Limón	88,9	44	0,7	0,4	9,0	0,0	9,0	1,0
Mandarina	88,3	43	0,8	Tr	9,0	0,0	9,0	1,9
Melón	92,4	28	0,6	Tr	6,0	0,0	6,0	1,0
Naranja	88,6	42	0,8	Tr	8,6	0,0	8,6	2,0
Piña	86,8	50	0,5	Tr	11,5	0,0	11,5	1,2
Plátano	75,1	94	1,2	0,3	20,0	3,1	16,9	3,4

5. Conversión de residuos de frutas y verduras en biocombustibles

Como se ha descrito en la sección anterior, los residuos de frutas y verduras tienen componentes en común. De entre estos componentes, algunos presentan potencial para la producción de biocombustibles, tales como la fibra, las azúcares, las grasas y los aceites. En esta sección se describirán las rutas de obtención de biocombustibles a partir de estos componentes.

Tres de los componentes más importantes de los residuos de las frutas y verduras son la celulosa, hemicelulosa y lignina. A partir de estos compuestos, es posible la síntesis de bioalcoholes, tales como el bioetanol y el biobutanol. La síntesis puede dividirse en varias etapas. Una de las primeras fases implica un tratamiento preliminar de la materia prima, con el propósito de facilitar el acceso a los azúcares en los tratamientos posteriores. La elección de un pretratamiento adecuado es una etapa fundamental para obtener el mejor rendimiento posible hacia el producto deseado (Galbe y Wallberg, 2019: 294) Dicha elección depende principalmente de las características de la materia prima, lo cual hace importante el conocimiento de las propiedades del material o materiales a partir del cual se obtendrán los biocombustibles. En el caso de los residuos de frutas y verduras, no todas las fracciones requerirán un pretratamiento.

Existen diversos tipos de pretratamientos, los cuales pueden ser mecánicos, térmicos, fisicoquímicos, químicos y biológicos. Entre los tratamientos mecánicos es posible mencionar la trituración, la molienda y la extrusión. Por lo general, este tipo de tratamientos se aplican para reducir el tamaño del material y mejorar la eficiencia de los tratamientos subsecuentes. Los pretratamientos térmicos son, por ejemplo, explosión de vapor, pretratamiento con agua caliente en fase líquida (PACL), pretratamiento con microondas, y pirolisis. Es posible mencionar como pretratamientos fisicoquímicos la expansión de fibra de amoníaco (AFEX) y la percolación de amoníaco reciclado (ARP). Dentro de los tratamientos químicos se encuentra la oxidación húmeda, la ozonólisis y el tratamiento organosolv.

Finalmente, los tratamientos biológicos se basan en el uso de microorganismos, tales como hongos.

Una vez que se ha removido la lignina, la siguiente etapa corresponde a la hidrólisis. En este procedimiento, los componentes de celulosa y hemicelulosa que se encuentran en los residuos de cascara y pulpa de frutas y verduras se rompen en carbohidratos más simples. Es posible mencionar tres tipos de hidrólisis: ácida, básica y enzimática. La hidrólisis enzimática se basa en emplear microorganismos (enzimas) como catalizadores. Esta característica representa una ventaja sobre la hidrólisis ácida y básica, ya que evita el uso de agentes químicos, la corrosión de la biomasa y disminuyen los costos de producción. Sin embargo, el tiempo requerido para la reacción puede ser muy grande en comparación con los otros tipos de hidrólisis, pasando del orden de minutos para el caso de la hidrólisis ácida a días para la hidrólisis enzimática (Torabi y col, 2021: 2617).

La tercera etapa de síntesis corresponde a la fermentación. En esta fase la biomasa se degrada por acción de microorganismos como levaduras o bacterias en condiciones anaerobias o aerobias. Los productos finales de la fermentación dependen principalmente del tipo de microorganismo empleado. Entre los microorganismos más empleados para la obtención de bioetanol se encuentra *Saccharomyces cerevisiae*, mientras que en la producción de biobutanol se suele emplear *Clostridium acetobutylicum*. Una vez que se concluye la etapa de síntesis es necesario obtener puro el producto de interés, lo cual se lleva a cabo por medio de procesos de separación como la destilación, extracción con solvente, sistemas de membrana, entre otros.

Un segundo componente presente en los residuos de frutas que puede emplearse para la producción de biocombustibles corresponde a la fracción de semillas. Es posible extraer aceites de estas semillas por medio de procesos mecánicos (prensado) o por tecnologías de extracción con solvente. Los aceites pueden ser tratados con alcoholes, regularmente metanol o etanol, para obtener biodiésel. Este proceso puede llevarse a cabo en presencia de hidróxido de sodio como catalizador, aunque otras alternativas implican el uso de catalizadores sólidos

Gómez-Castro Fernando Israel, González-Guerra Guillermo Manuel, Restrepo-Elorza María del Pilar, Montiel-Carrillo Amy Pamela, Álvarez-Rivera Karla Yuritzi, Linares-Luna René Gabriel, Hernández Salvador [pp. 8-19]

o enzimáticos (Gómez-Castro y col., 2022:109), o alcoholes bajo condiciones supercríticas (Gómez-Castro y col., 2015: 2041). En esta reacción se obtiene glicerol como subproducto. Así, una vez que se lleva a cabo la conversión a biodiésel, es necesario recuperar el alcohol en exceso y remover el glicerol para obtener el biocombustible puro. Algunos estudios han valorado el potencial de transformación de residuos agroalimentarios en biocombustibles. Tal es el caso de la biomasa de la papa, la cual es usada como componente principal en la síntesis de bioetanol (Demichelis y col., 2020: 124111). Otro caso es el del maíz, el cual se ha encontrado en numerosos trabajos de investigación en los cuales es el principal elemento para la síntesis de bioetanol y

biohidrógeno (Aruwajoye y col., 2020: 6609). De acuerdo con el estudio presentado en la sección 3, durante la temporada otoño-invierno en el estado de Guanajuato abundan los residuos de melón, mientras que en primavera se presentan principalmente residuos de naranja, papaya y plátano. En la Tabla 2 se presentan ejemplos de estudios preliminares en torno a la conversión de estas frutas a bioalcoholes, mostrando su potencial para la producción de biocombustibles. La mayor parte de los trabajos están enfocados en la producción de bioetanol, debido principalmente al mayor rendimiento en comparación con la obtención de butanol.

Tabla 2
Conversión de frutas y verduras típicas del estado de Guanajuato hacia biocombustibles.

Materia prima	Producto	Tratamiento	Rendimiento	Fuente
Cáscara de naranja	Bioetanol	Hidrólisis ácida	8.4 mg etanol/g cáscara	Tejeda y col. (2010: 120).
Plátano	Bioetanol	Tratamiento alcalino y microbiano	0.84 g de etanol/g de azúcares	Ingale y col. (2014: 885).
Mezcla de diversas frutas, manzanas, papaya, uvas y plátanos	Bioetanol	Lavado con permanganto de potasio y agua destilada	n.d.	Vishwakarma y col. (2014: 1).
Manzana	Bioetanol	Hidrólisis ácida	0.945 g etanol/g de azúcares totales	Evcan y Tari (2015: 775).
Cáscara de naranja	Bioetanol y biobutanol	Explosión de vapor	4.1 g de etanol/100 mL de hidrolizado; 19.5 g de butanol/L de hidrolizado	Joshi y col. (2015: 55)
Melón	Bioetanol	Hidrólisis	60.5 g etanol/kg melón	Salehi y col. (2018: 127).
Naranja	Bioetanol	Hidrólisis alcalina	32.32 % v/v	Musa y col. (2018: 19).
Manzana	Biobutanol	Tratamiento alcalino y ácido	262 g ABE/kg manzana	Jin y col. (2019: 536)
Cáscara de plátano, mango y papaya	Bioetanol	Hidrólisis ácida	n.d.	Mitiku y Hatsa (2020: 50).

Cabe mencionar que los esfuerzos continúan para la obtención de microorganismos que permitan incrementar el rendimiento hacia butanol, dado que se trata de un biocombustible que puede emplearse en una mayor proporción en los motores existentes.

La mayoría de los estudios relacionados con la conversión de frutas y/o residuos de fruta se enfocan en un tipo de residuo particular, así como una fracción de cada residuo. Son escasos los reportes donde se aborda el tratamiento de mezclas de residuos de diversas frutas. Por otra parte, el tratamiento integral de este tipo de residuos, incluyendo la cáscara, pulpa y semilla, no ha sido abordado. Este tipo de estudios es importante debido a que los residuos que se generan en mercados y centrales de abasto no involucran un solo tipo de fruta, sino que incluyen varios tipos, los cuales varían con cada temporada. Así pues, existe un área de oportunidad importante en el desarrollo de esquemas de aprovechamiento integral de los residuos de frutas y verduras.

Conclusiones

La correcta disposición de los residuos sólidos urbanos representa un reto para la sociedad actual. Sin embargo, dichos residuos pueden incorporarse a un modelo de economía circular para la reintegración de sus componentes a la cadena productiva. En el caso particular de los residuos de frutas y verduras, éstos se generan diariamente, por lo que presentan un alto potencial de aprovechamiento. Dado su alto contenido de azúcares y otros componentes de interés, son una posible materia prima para la obtención de biocombustibles. Con el fin de definir el tipo de derivados que podrían obtenerse a partir de los residuos de frutas y verduras en México, es necesario contar con información referente a las características de los residuos, particularmente los tipos de frutas y verduras que más se desechan en el país. Esta información es escasa, sin embargo, en este trabajo se ha presentado un análisis preliminar para las ciudades de Guanajuato y León, en el estado de Guanajuato, por medio de la cual es posible establecer de manera inicial que el tipo de residuo más común en invierno es el melón,

mientras que el verano es la naranja, papaya y plátano. El contar con este tipo de información permite identificar el tipo de residuos que se generan en mayor proporción en el estado, así como proponer y probar rutas de aprovechamiento para tales residuos.

Agradecimientos

Los autores agradecen profundamente el apoyo de la Universidad de Guanajuato. Asimismo, se agradece a la Dirección General de Servicios Públicos y a los locatarios del Mercado Hidalgo (Guanajuato) por su apoyo para la obtención de muestras para análisis

Referencias bibliográficas

- Acurio, G., Rossin, A., Texeira, P.F. y Zepeda, F. (1997). Diagnóstico de la situación del manejo de residuos sólidos municipales en América Latina y el Caribe. BID, Organización Panamericana. Washington, D.C. Extraído el 04 de octubre de 2021 desde: <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Diagn%C3%B3stico-de-la-situaci%C3%B3n-del-manejo-de-residuos-s%C3%B3lidos-municipales-en-Am%C3%A9rica-Latina-y-el-Caribe.pdf>
- Aruwajoye, G., Kassim, A., Saha, A. y Kana, E. (2020). Prospects for the improvement of bioethanol and biohydrogen production from mixed starch-based agricultural wastes. *Energies*, 13(24), 6609.
- Arroyo Uriarte, P., Mazquiarán Bergera, L., Rodríguez Alonso, P., Valero Gaspar T., Ruiz Moreno, E., Ávila Torres, J.M., Varela Moreiras, G. (2018). *Informe de estado de situación sobre frutas y hortalizas: nutrición y salud en la España del S. XXI*. Fundación Española de la Nutrición.
- Carrillo-Nieves, D., Rostro Alanís, M.J., de la Cruz Quiroz, R., Ruiz, H.A., Iqbal, H.M.N. y Parra-Saldívar, R. (2019). Current status and future trends of bioethanol production from agro-industrial wastes in Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102, 63-74.
- Dagde, K.K. (2019). Extraction of vegetable oil from

Gómez-Castro Fernando Israel, González-Guerra Guillermo Manuel, Restrepo-Elorza María del Pilar, Montiel-Carrillo Amy Pamela, Álvarez-Rivera Karla Yuritzi, Linares-Luna René Gabriel, Hernández Salvador [pp. 8-19]

- avocado seeds for production of biodiesel. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 23 (2), 215-221.
- Demichelis, F., Laghezza, M., Chiappero, M. y Fiore, S. (2020). Technical, economic and environmental assesment of bioethanol biorefinery from waste biomass. *Journal of Cleaner Production*, 277, 124111.
- DOF (2003). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos, México. Extraído el 20 de julio de 2021 desde: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263_180121.pdf
- Evcan, E. y Tari, C. (2015). Production of bioethanol from apple pomace by using cocultures: Conversion of agro-industrial waste to value added product. *Energy*, 88, 775-782
- Galbe, M. y Wallberg, O. (2019). Pretreatment for biorefineries: a review of common methods for efficient utilisation of lignocellulosic materials. *Biotechnology for Biofuels*, 12, 294.
- Gebremariam, S.N. y Marchetti, J.M. (2018). Economics of biodiesel production: Review. *Energy Conversion and Management*, 168, 74-84.
- Gómez-Castro, F.I., Martínez-Sánchez, O. y Ramírez-Corona, N. (2022). Production of biodiesel: from the oil to the engine. En F.I. Gómez-Castro, C. Gutiérrez-Antonio (Eds.), *Biofuels and Biorefining. Volume 1: Current Technologies for Biomass Conversion*. Elsevier. 109-156.
- Gómez-Castro, F.I., Segovia-Hernández, J.G., Hernández, S., Rico-Ramírez, V., Gutiérrez-Antonio, C., Briones-Ramírez, A., Cano-Rodríguez, I. y Gamiño-Arroyo, Z. (2015). Analysis of alternative non-catalytic processes for the production of biodiesel fuel. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17, 2041-2054.
- Ingale, S., Joshi, S. y Gupte, A. (2014). Production of bio-ethanol using agricultural waste: Banana pseudo stem. *Brazilian Journal of Microbiology*, 45(3), 885-892.
- INEGI (2013). Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales 2011 (CNGMD), México. Extraído el 30 de septiembre de 2021 desde: <https://www.inegi.org.mx/programas/cngmd/2011/>
- Jin, Q., Qureshi, N., Wang, H. y Huang, H. (2019). Acetone-butanol-ethanol (ABE) fermentation of soluble and hydrolyzed sugars in apple pomace by *Clostridium beijerinckii* P260. *Fuel*, 244, 536-544.
- Joshi, S.M., Waghmare, J.S., Sonawane, K.D. y Waghmare, S.R. (2015). Bio-ethanol and bio-butanol production from orange peel waste. *Biofuels*, 6(1-2), 55-61.
- Li, C., Yang, X., Gao, S., Chuh, A.H. y Lin, C.S.K. (2018). Hydrolysis of fruit and vegetable waste for efficient succinic acid production with engineered *Yarrowia lipolytica*. *Journal of Cleaner Production*, 179, 151-159.
- Li, W. y Achal, V. (2020). Environmental and health impacts due to e-waste disposal in China – a review. *Science of the Total Environment*, 737, 139745.
- Mitiku, A.A. y Hatsu, T.M. (2020). Bioethanol production from decaying fruits peel using *Saccharomyces cerevisiae*. *International Journal of Current Research and Academic Review*, 8(5), 50-59.
- Musa, U., Mohammed, I.A., Munnir, S.M., Garba, M.U., Abdulhamid, A.F. y Uduak, E.P. (2018). Solid state fermentation of orange pomace for bioethanol production. *Covenant Journal of Engineering Technology*, 1(2), 19-27.
- ONU México (s.f.). Objetivos de Desarrollo Sostenible. Extraído el 28 de julio de 2021 desde: <https://www.onu.org.mx/agenda-2030/objetivos-del-desarrollo-sostenible/>.
- Prabhakar Soudham, V. (2015). *Biochemical conversion of biomass to biofuels: pretreatment-detoxification-hydrolysis-fermentation*. Umeå, Suecia: VMC-KBC Umeå.
- Raven, S., Francis, A., Srivastava, C., Kezo, S. y Tiwari, A. (2019). Fungal biofuels: innovative approaches. En A.N. Yadav, S. Singh, S. Mishra, A. Gupta (Eds.), *Recent Advancement in White Biotechnology Through Fungi. Volume 2: Perspective for Value-Added Products and Environments* (pp. 385-405). Cham, Suiza: Springer.
- Rivadeneira, J.P., Wu, T., Ybanez, Q., Dorado, A.A., Migo, V.P., Nayve, F.R.P. y Castillo-Israel, K.A.T. (2020). Microwave-assisted extraction of pectin from “Saba” banana peel waste: optimization,

Gómez-Castro Fernando Israel, González-Guerra Guillermo Manuel, Restrepo-Elorza María del Pilar, Montiel-Carrillo Amy Pamela, Álvarez-Rivera Karla Yuritzi, Linares-Luna René Gabriel, Hernández Salvador (pp. 8-19)

- characterization, and rheology study. *International Journal of Food Science*, 2020, 8879425.
- Salehi, R., Taghizadeh-Alisaraei, A., Jahanbakhshi, A. y Shahidi, F. [2018]. Evaluation and measurement of bioethanol extraction from melon waste (Qassari cultivar). *Agricultural Engineering International*, 20(3), 127-131.
- Santiago-Ortega, M., Honorato-Salazar, J.A., Quero-Carrillo, A.R., Hernández-Garay, A., López Castañeda, C. y López-Guerrero, I. [2016]. Biomasa de *Urochloa brizantha* cv. Toledo como materia prima para la producción de bioetanol. *Agrociencia*, 50(6), 711-726.
- SEMARNAT [2012]. Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos, México. Extraído el 10 de agosto de 2021 desde: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/187440/diagnostico_basico_extenso_2012.pdf
- SEMARNAT [2013]. Informe de la situación del medio ambiente en México - Compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave y de desempeño ambiental edición 2012, México. Extraído el 10 de agosto de 2021 desde: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_12/pdf/Cap7_residuos.pdf
- SEMARNAT [2016]. Informe de la situación del medio ambiente en México 2015 - Compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave y de desempeño ambiental, México. Extraído el 10 de agosto de 2021 desde: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Informe15_completo.pdf
- SMAOT [2020]. Programa Estatal Para La Prevención y Gestión Integral de los Residuos de Manejo Especial de Guanajuato [BORRADOR PARA CONSULTA]. Extraído el 20 de julio de 2021 desde: <https://smaot.guanajuato.gob.mx/sitio/manejo-integral-de-residuos/197/Programa-Estatal-para-la-Prevencion-y-Gesti%C3%B3n-Integral-de-los-Residuos-de-Manejo-Especial-de-Guanajuato>
- Tejeda, L.P., Tejada, C., Villabona, A., Alvear, M.R., Castillo, C.R., Henao, D.L., Marimón, W., Madariaga, N. y Tarón, A. [2010]. Producción de bioetanol a partir de la fermentación alcohólica de jarabes glucosados derivados de cáscaras de naranja y piña. *Revista Educación en Ingeniería*, 10, 120-125.
- Torabi, S., Satari, B. y Hassan-Beygi, S.R. [2021]. Process optimization for dilute acid and enzymatic hydrolysis of waste wheat bread and its effect on aflatoxin fate and ethanol production. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 11, 2617-2625.
- Vishwakarma, H.S., Kumar, A., Singh, J., Dwivedi, S. y Kumar, M. [2014]. Production of ethanol from fruit wastes by using *Saccharomyces cerevisiae*. *International Journal of Renewable Energy Technology Research*, 3(10), 1-5.





¿CÓMO AFECTA LA ESCASEZ DE AGUA A LA PRODUCCIÓN DE TUS ALIMENTOS Y QUÉ ESTRATEGIAS AGRÍCOLAS SE HAN IMPLEMENTADO PARA REDUCIR SU IMPACTO?

¿HOW DOES WATER SCARCITY AFFECT YOUR FOOD PRODUCTION AND WHAT AGRICULTURAL STRATEGIES HAVE BEEN IMPLEMENTED TO REDUCE ITS IMPACT?

Melo-Sabogal Diana Victoria ¹, Contreras-Medina Luis Miguel ^{1*}

¹ Facultad de Ingeniería Campus Amazcala, Universidad Autónoma de Querétaro, Carretera a Chichimequillas, km 1 s/n, Amazcala, El Marqués, Qro. C.P. 76265

* Autor de correspondencia, correo: miguel.contreras@uaq.mx

Resumen

El agua es el líquido de la vida; sin esta sustancia no sería posible nuestra existencia en el planeta tierra. En México, cerca del 70% del agua disponible para consumo humano es utilizada en la agricultura para la producción de alimentos; sin embargo, se desaprovecha alrededor del 60% debido a que la infraestructura de riego es obsoleta, está desgastada y presenta fugas; también porque se presentan pérdidas por evaporación del agua de riego presente en el suelo y al uso no eficiente de este recurso, es decir, que no se aprovecha totalmente el agua utilizada. Debido a lo anterior, se plantea dar a conocer la relación existente entre la escasez de agua y la producción de alimentos primarios, así como presentar las estrategias que se están empleando para enfrentar la escasez de agua en la agricultura. Algunas estrategias para afrontar la escasez hídrica en la agricultura son la obtención de plantas genéticamente modificadas como el maíz y trigo, que, aunque aún no tiene una amplia aceptación por parte de productores y consumidores, permite producir plantas con resistencia a la sequía, necesitando menor cantidad de agua para su producción; mejores prácticas agrícolas, como es el caso de la mejora de sistemas de riego que permita la reducción del agua utilizada, por ejemplo en cultivos de cebada y maíz; y el riego deficitario, el cual permite un ahorro de agua significativo para la producción de alimentos, que va del 26 hasta el 80 %, dependiendo del tipo de cultivo, pero del que no hay un consenso en los efectos negativos sobre la productividad. Estas estrategias abordadas de manera conjunta podrían mejorar la eficiencia en el uso del agua, y evitar desperdicios en el área agrícola.

Palabras clave: Agua, producción de alimentos, resistencia a sequía, riego deficitario, sequía

Abstract

Water is the liquid of life; without this substance, our existence on planet earth would not be possible. In Mexico, about 70% of the water available for human consumption is used in agriculture for food production; however, about 60% is wasted due to outdated, worn-out, and leaky irrigation infrastructure; also because there are losses due to evaporation of the irrigation water present in the soil and the non-efficient use of this resource, that is, the water used is not fully used. Due to the above, it is proposed to make known the relationship between water scarcity and primary food production, as well as to present the strategies that are being used to face water scarcity in agriculture. Some strategies to deal with water scarcity in agriculture are obtaining genetically modified plants such as corn and wheat, which, although not yet widely accepted by producers and consumers, make it possible to produce plants with resistance to drought, requiring less amount of water for their production; better agricultural practices, such as the improvement of irrigation systems that allow the reduction of the water used, for example in barley and corn crops; and deficit irrigation, which allows significant water savings for food production, ranging from 26 to 80%, depending on the type of crop, but for which there is no consensus on the negative effects on productivity. These strategies approached jointly could improve the efficiency in the use of water, and avoid waste in the agricultural area.

Keywords: Water, food production, drought resistance, deficit irrigation, drought

1. Introducción

De acuerdo con estimaciones de las Naciones Unidas, la población mundial para el año 2022 es de 7.9 billones de personas, y se espera que este número aumente a 9.7 billones en el año 2050 [Worldometer, 2022]. Ante un incremento poblacional cercano a 2.0 billones, la demanda de productos de origen agrícola, como es el caso de alimentos y fibras, tendrá aumento del 60-70 % [Collado, 2020]. Debido a lo anterior, según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la agricultura tendrá que incrementar la producción de alimentos en un 70 % en el 2050 para garantizar la seguridad alimentaria de la población [FAO, 2009], entendiéndose seguridad alimentaria como *“la situación que se da cuando todas las personas tienen acceso físico, social y económico permanente a alimentos seguros, nutritivos y en cantidad suficiente para satisfacer sus requerimientos nutricionales y preferencias alimentarias”* (FAO, 2020). Ante el panorama abordado previamente, el sector agrícola tiene el reto de incrementar el rendimiento de los cultivos y diversificar sus variedades [FAO, 2021]; sin embargo, esto implica ejercer una mayor presión sobre los recursos agrícolas como el agua [FAO, 2009], requiriéndose un aumento del 15 % de las extracciones de este recurso [Bressa, 2021].

El agua desempeña un papel primordial para la producción de alimentos de origen agrícola debido a que se usa para el riego, la aplicación de fertilizantes y de pesticidas en los cultivos [Pérez 2021]. El agua y la seguridad alimentaria están directamente relacionadas, ya que la capacidad del sector agrícola para la producción de alimentos depende de la disponibilidad de agua para satisfacer las necesidades hídricas de las plantas [Conagua, 2021]. De este modo, la agricultura utiliza el 70 % del total de agua dulce disponible para consumo humano a nivel mundial (1 %), lo que aumenta la competencia por el agua con los sectores urbano e industrial [FAO, 2009] y promueve su escasez, de allí que su uso para las labores agrícolas ha sido cuestionable [UNESCO, 2021].

Por su parte, la escasez de agua se define como una condición donde la demanda de agua, tanto por los seres humanos como los ecosistemas, excede su suministro [Kumari et al., 2021], o cuando la infraestructura

y capacidad institucional para garantizar a las personas un acceso equitativo a los recursos hídricos (agua para consumo y riego) son insuficientes [FAO, 2021]. Según la FAO (2021), el balance hídrico del agua (cantidad de agua disponible y cantidad de agua consumida) está bajo presión, presentándose disminución del 20 % del agua dulce disponible para consumo humano durante los últimos veinte años, y estimándose un déficit hídrico del 40 % en el año 2030 [UNESCO, 2021].

Por otro lado, la escasez de agua, además de presentarse cuando hay la falta física de este recurso, también se presenta debido al deterioro progresivo de la calidad del agua [Van Vliet et al., 2017]. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), la calidad del agua se ha deteriorado como producto de la contaminación de la mayoría de los ríos en América, África y Asia, que se presenta principalmente por el uso de fertilizantes en la agricultura, los cuales aportan al suelo un exceso de nutrientes como el fósforo y el nitrógeno, que al llegar a ríos o lagos provocan la aparición excesiva de materia orgánica (fango) y de algas o plantas verdes, lo que impide el paso de la luz solar necesaria para otras plantas, animales y microorganismos, además de resultar tóxico para el ecosistema [Zarza, s/f]. Otro factor que provoca escasez hídrica es la erosión del suelo, como causa de la sobreexplotación de tierras agrícolas, deforestación y riego excesivo, lo que impide al suelo retener agua; lo anterior puede reducir hasta en un 50 % el rendimiento de los cultivos [FAO, 2019].

En la agricultura, la escasez de agua disminuye el rendimiento de los cultivos entre un 20 y 50 % [Shrivastava & Kumar, 2015], provocando un crecimiento desacelerado de la economía, de tal forma que, según el Banco Mundial (2021), en 2050, las tasas de crecimiento económico podrían disminuirse en un 6 % del PIB en regiones con escasez de agua. Por otro lado, a nivel mundial, la escasez de agua es una limitante para la producción de alimentos de origen agrícola [Muñoz, 2009] debido a que incrementa los riesgos para la producción por los volúmenes de agua necesarios para esta actividad, mismos que difieren según el producto; por ejemplo, para la producción de frutas y hortalizas como un tomate, una papa, una naranja y una manzana se requieren de 13, 25, 50 y 70 litros (L) de agua,

respectivamente (FAO, 2009). También, para producir un kilogramo de tomate, lechuga, papa, café, maíz, frijol y arroz, se utilizan 214, 237, 287, 1056, 1544, 4642 y 4890 L de agua, respectivamente; estos volúmenes equivalen desde 10.7 garrafones de 20 L hasta 244.5 garrafones (SIAP, 2013).

En México, la escasez de agua afecta al 40 % del país y se ha convertido en un factor limitante para la producción agrícola, debido a que en el país se destinan 3/4 partes del agua dulce para la agricultura (Comisión Nacional del Agua, 2019). Alrededor del 42 % de los mantos acuíferos (agua subterránea) en México no tienen agua disponible, debido a que su extracción excede un 10 % de la recarga de estos. Entre otros datos, durante el 2020, el agua disponible en las 210 presas nacionales disminuyó en un 30 %, pasando de 91,330 hectómetros cúbicos (hm³) de agua a 66,607 hm³ (Carbajal, 2021), mientras que, para el 2021, se presentó una reducción del 55 % del nivel de agua. Lo anterior pone de manifiesto que, ante la escasez hídrica, la producción de alimentos de origen agrícola está en riesgo (FAO, 2021).

Ante esta problemática, instituciones públicas y privadas, así como centros de investigación han participado en el desarrollo de estrategias aplicadas al uso de agua en la agricultura que permitan garantizar la demanda de alimentos y la seguridad alimentaria de la población. Por lo tanto, en el presente artículo se abordará la relación entre la escasez de agua y la producción de alimentos de origen agrícola, así como las estrategias que se están empleando para enfrentar la insuficiencia de agua en la agricultura.

2. Uso del agua en la agricultura mexicana

¿La escasez de agua afecta la producción de los alimentos?, la respuesta a esta pregunta es un rotundo ¡sí!. El agua es un recurso natural finito que es usado por las plantas para el transporte de nutrientes desde el suelo; asimismo, el agua permite llevar a cabo procesos biológicos como la fotosíntesis, respiración y transpiración, que provocan el crecimiento y desarrollo de raíces, tallos, hojas, flores y frutos (Muñoz, 2009). Sin agua la sobrevivencia de las plantas se puede ver comprometida, y, con ello, la producción de alimentos provenientes del sector agrícola se ve amenazada, comprometiendo la seguridad alimentaria de la población.

El agua que consumimos a través de estos alimentos es obtenida de las lluvias o extraída de reservas hídricas, y ésta es aplicada al cultivo por técnicas de riego como goteo, aspersión e inundación. Actualmente, se evidencia escasez de agua porque la cantidad de precipitaciones o agua de lluvia es menor al límite extremo en zonas áridas (350 mm), por el desperdicio de cerca del 57 % del agua de riego debido a que la infraestructura con la que se cuenta está obsoleta o en mal estado (desgastada, rota y/o presenta fugas), así como a las pérdidas por infiltración y evaporación del agua almacenada para uso agrícola, mismas que ascienden a un 60 %, debido que cuando el agua llega al suelo (Maguey, 2018), esta puede infiltrarse o ingresar a capas del suelo muy profundas donde no puede ser aprovechada por las plantas, o puede evaporarse y pasar de la superficie del suelo a la atmósfera.

Por otra parte, tanto a nivel mundial como en nuestro país, la agricultura es la actividad que más contamina las fuentes hídricas, afectando directamente a los ecosistemas, el desarrollo económico y la seguridad alimentaria (FAO, 2021). Por ejemplo, el uso de fertilizantes sintéticos a base de nitrógeno o fósforo, ya que sus residuos son causantes de la eutrofización de las aguas dulces (exceso de nutrientes en el agua). La contaminación del agua también puede deberse al uso de plaguicidas como herbicidas e insecticidas, que son empleados para controlar o prevenir la aparición de plagas en los cultivos agrícolas; cuando estas sustancias químicas, nocivas para los seres vivos, llegan a ecosistemas acuáticos, pueden provocar la muerte de animales, plantas y microorganismos allí presentes, y ser nocivos para la salud humana (Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, 2007). Debido a ello, el sector agrícola mexicano enfrenta el desafío de seguir ofreciendo los alimentos requeridos por la población sin comprometer los recursos hídricos con los que cuenta el país (Ochoa-Noriega y col, 2020). Ante este reto, se han estudiado algunas estrategias para hacer frente a la escasez de agua en la producción agrícola, las cuales permitan hacer más eficiente su uso, como es el caso del uso de plantas genéticamente modificadas, mejores prácticas agrícolas, y el régimen de riego deficitario. En las secciones 3-5 se abordará cada una de estas estrategias a partir de una revisión bibliográfica en bases de datos de organizaciones e instituciones nacionales e internacionales, así como en revistas científicas y de divulgación.

3. Plantas genéticamente modificadas

Es probable que en tus comidas hayas incluido algún alimento procedente de plantas genéticamente modificadas, y que no hayas percibido que lo fueran; esto se debe a que las modificaciones que sufren estas plantas se dan en su interior y generalmente no son visibles. Pero ¿qué quiere decir que las plantas han sido genéticamente modificadas?, tal vez parezca algo complejo, pero básicamente se trata de que científicos expertos insertan uno o más genes de un organismo (planta, bacteria, hongo) en una planta para que esta tenga una característica nueva; por ejemplo, que resista al ataque de insectos y virus, tolere la presencia de herbicidas, tenga mayor contenido nutricional, soporte mejor las temperaturas extremas y la escasez de agua, entre otras.

La modificación genética de plantas es una estrategia prometedora para aumentar la tolerancia a condiciones de sequía provocada por la escasez de agua, a través de la expresión y/o regulación de genes relacionadas con la sequía; lo anterior podría reducir la incidencia de este tipo de estrés ambiental sobre el crecimiento de las plantas (aumento del número y volumen celular) y mejorar el rendimiento de los cultivos (productividad), con la finalidad de mantener la producción de alimentos demandada (Khan y col, 2019). En México se ha autorizado la producción comercial de algunos organismos genéticamente modificados, entre los que se encuentran el algodón, soya, trigo, alfalfa, papa, tomate, betabel, canola y maíz (García y col, 2018); sin embargo, el Gobierno Nacional prohibió recientemente la siembra de maíz genéticamente modificado a partir del 2024 (DOF, 2020). Aunque la mayoría de los cultivos mencionados previamente han sido modificados para otorgar tolerancia a herbicidas como el glifosato y resistencia a insectos; también se han modificado plantas de trigo y maíz para inducir tolerancia a la sequía (García y col, 2018). En ese sentido, en el año 2004, el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) desarrolló y sembró en México (Sede Centro en Texcoco) trigo tolerante a la sequía, insertando el gen DRREB1A de la planta de *Arabidopsis thaliana* (CIMMYT, 2012). Por su parte, científicos del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV) del Instituto Politécnico Nacional desarrollaron a nivel laboratorio una variedad de maíz genéticamente modificado que, al probarla en un

campo piloto ubicado en Sinaloa, mostró tolerancia a la sequía y presentó mejoras en el crecimiento, floración y grano que las plantas no modificadas (Agreda-Laguna y col, 2018; CINVESTAV, 2018). Con relación a otros cultivos, Investigadores de la Universidad Autónoma de Querétaro aumentaron la tolerancia a la sequía en plantas de *Arabidopsis thaliana* modificadas genéticamente con la clonación del gen LEA obtenido de plantas de Chile, donde encontraron que los niveles de transpiración (evaporación o pérdida de agua de la plantas a través de las hojas) en estas plantas fueron más bajos que en plantas no modificadas, lo que sugiere una mejora en el uso eficiente del agua (Acosta-García y col, 2015).

Según CINVESTAV, el mejoramiento genético es una estrategia relevante para el ahorro de agua, así como para contrarrestar el problema de la escasez de esta sustancia en el país (Gutiérrez y col., 2015). Sin embargo, la implementación de esta estrategia en el campo aumenta los costos de producción debido a la compra de insumos, fertilizantes y herbicidas que producen las mismas empresas que venden las semillas modificadas genéticamente, y aún no ha tenido aceptación por parte de los agricultores (Larach, 2001). Además, su implementación depende de evaluar su nivel de seguridad para la salud humana y el nivel de aceptación, es decir, disposición de adquirir estos productos por parte los productores y consumidores a nivel local y mundial (Liang, 2016).

4. Prácticas culturales en la agricultura

Otra estrategia para hacer frente al problema de la escasez de agua en la agricultura, a nivel nacional e internacional, es la selección de adecuadas prácticas culturales. En la agricultura, las prácticas culturales hacen referencia a un conjunto de acciones, medidas, técnicas o métodos orientados a mejorar la productividad agrícola a través de la conservación del suelo y el agua, y mediante la reducción de plagas, enfermedades y malezas, sin uso de sustancias químicas de origen sintético, para proteger, además, tanto la salud humana como el medio ambiente. Algunas de estas prácticas son las podas, deshierbe, cultivos intercalados, rotación de cultivos, uso de abono orgánico, etc. (NCZOO, 2019).

Hay una serie de prácticas culturales recomendadas por la FAO y otras organizaciones del sector agrícola para la conservación del agua destinada para la agricultura, como la captación, almacenamiento y utilización del agua de lluvia, y el uso eficiente de riegos, evitando el derrame de agua mediante la mejora y tecnificación de las instalaciones de riego, así como la conservación del suelo mediante la no quema y la incorporación de rastrojos para tener la humedad en el suelo (Martínez, 2013). Entre estas prácticas se encuentran la elección de un sistema de riego basado en las necesidades del cultivo, y que reduzca el desperdicio de agua (por ejemplo, el riego por aspersión o por goteo); el riego por aspersión consiste suministrar el agua al suelo mediante pulverizadores o aspersores de manera similar a la lluvia, con lo cual el agua se infiltra al suelo sin producir escurrimientos, mientras que en el riego por goteo, el agua y los nutrientes se adicionan al suelo gota a gota, siendo eficiente para el ahorro de agua ya que se suministra la cantidad necesaria para cada planta (SIAP, 2018).

Otra estrategia es la programación de los riegos, es decir cuánto y cuándo regar para obtener una mayor eficiencia en el uso del agua, y con ello reducir el exceso de humedad en el suelo y evitar desperdicio de agua por evaporación (regando, por ejemplo, a primeras horas de la mañana o del anochecer) (Intagri, s/f). También, se propone reducir al mínimo necesario el uso de fertilizantes y pesticidas, ya que estos deterioran la calidad del suelo y del agua (FAO, 2018). Por otro lado, una práctica cultural que ayuda a enfrentar escasez de agua y a promover un mejor uso del agua es el aprovechamiento del agua de lluvias para el riego de los cultivos (FAO, 2003).

Un caso de estudio de este tipo de prácticas se desarrolló en Irapuato por parte de investigadores de la Universidad de Guanajuato, como acciones del proyecto titulado “Cultivando un México Mejor”, de HEINEKEN México y CIMMYT. Los investigadores evaluaron la eficiencia en el uso del agua en cultivos de maíz amarillo y cebada bajo dos tipos de riego (por superficie o por gravedad, y por goteo) y encontraron que la tecnificación del riego (gotero) tiene un buen potencial de ahorro de agua, mejorando la eficiencia del uso del agua, requiriendo menos litros de agua para producir un

kilogramo de grano, requiriéndose 870 m³/ha en riego por goteo y 1577 m³/ha en riego superficial (Flores, 2021).

Algunos entes gubernamentales como la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) y la Comisión Nacional de Zonas Áridas (CONAZA) han promovido programas económicos y de capacitación para apoyar a los productores en la ejecución de las prácticas previamente mencionadas (Gutiérrez y col., 2015); sin embargo, aún resulta compleja su aplicación debido a que en México se carece de una estrategia integral donde se definan las acciones específicas para la conservación tanto del recurso hídrico como del suelo para fines agrícolas. Por otro lado, también se presenta la problemática del desconocimiento por parte de los agricultores acerca de las necesidades de agua para los cultivos, de las técnicas de riego y del manejo de fertilizantes. También suman a esta problemática la baja concientización de los problemas de escasez de agua, es decir, muchas veces la gente no percibe la importancia del agua y los efectos que la escasez de esta tiene.

5. Riego deficitario

¿Crees que todas las plantas necesitan la misma cantidad de agua para vivir?, la realidad es que no, cada tipo de planta tiene un requerimiento diferente de agua; de hecho, ese requerimiento varía de acuerdo con la etapa de crecimiento en la que se encuentre la planta. La cantidad de agua que necesita un cultivo depende de qué tanta agua se evapora del suelo en conjunto con el agua que transpiran las plantas del cultivo, lo que se conoce como evapotranspiración (Méndez-Vázquez y col., 2021); bajo este concepto se desarrolló otra estrategia para el manejo de los recursos hídricos destinados a la agricultura, conocida con el nombre de riego deficitario.

El riego deficitario consiste en suministrar una cantidad de agua menor a la de evapotranspiración del cultivo, lo que se traduce en ahorro de agua. Esta estrategia ha permitido el ahorro de agua para el riego de las plantas, según el cultivo, por ejemplo, en cultivos de tomate permitió un ahorro de agua del 80 % (Coyago-Cruz et al., 2019), en la vid fue de 30 al 50 % (Kovalenko y col., 2021), mientras que en cultivos de pera el ahorro

fue del 26 al 73 % (Vélez-Sánchez et al., 2021)

El déficit hídrico es una estrategia también utilizada en diversos cultivos en México, como el de tomate y almendra; sin embargo, aún se desconoce cómo responden las plantas a esas reducidas cantidades de agua. Además, se tiene poca información acerca de si esta práctica mejora la productividad de los cultivos, y hasta qué punto es posible llevar esa reducción de agua del riego sin provocar un efecto negativo sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas (Méndez-

Vázquez y col., 2021), ya que se ha reportado que con la carencia de agua también se pueden afectar los procesos fisiológicos de las plantas (fotosíntesis, transpiración, respiración), lo que puede afectar el rendimiento de los cultivos (Schaible & Aillery, 2017).

Con base en lo descrito previamente, se presentan de manera resumida las ventajas y desventajas de las estrategias estudiadas para enfrentar la escasez de agua en la producción agrícola de los alimentos (Tabla 1).

Tabla 1. Estrategias para enfrentar la escasez de agua en el campo agrícola.

Estrategia	Ventajas	Desventajas
Plantas genéticamente modificadas	• Mayor resistencia a la sequía • Aumento del crecimiento de las plantas y de la productividad • Contribución a la seguridad alimentaria de la población	• Requiere de inversión económica por parte del productor en la compra de semillas que no puede conservar, así como plaguicidas específicos para ese cultivo modificado genéticamente • Es un tema que sigue causando controversia social, ya que algunas personas consideran que estos productos son dañinos para la salud humana, animal y para el ambiente • Se necesita la implementación de campañas para la divulgación de la evidencia científica que demuestra que son seguros, para su aceptación por parte de agricultores y consumidores
Prácticas culturales en la agricultura	• Ahorro de agua al evitar pérdidas por evaporación o filtración • Puede mejorar la eficiencia en el uso del agua, dependiendo del cultivo • Menor uso de fertilizantes y plaguicidas, reduciendo el impacto ambiental	• Se requiere inversión económica para la tecnificación de las labores agrícolas, como el riego, donde se requieren \$1'263,250 MX para adecuar un sistema de riego por goteo en un campo de 10 ha, fuera de los costos generados por mantenimientos posteriores a su instalación (Flores, 2021) • Desconocimiento del agricultor de las necesidades hídricas de los cultivos, técnicas de riego y de fertilización
Riego deficitario	• Ahorro de agua y uso eficiente del agua	• Controversia en los resultados acerca de efectos negativos sobre la fisiología de las plantas (los procesos químicos y físicos para la vida vegetal) y sobre el rendimiento de los cultivos

6. Conclusiones

La escasez de agua es un problema que nos involucra a todos, ya que cada día una persona necesita alrededor de 100 L de agua para satisfacer sus necesidades hídricas de consumo e higiene, además de que, como se mencionó previamente, el agua es fundamental para la producción de los alimentos que consumimos. La agricultura utiliza alrededor de tres cuartas partes del agua dulce disponible para consumo humano, pero la disponibilidad de este recurso es cada vez menor, previéndose una carencia del 40 % de agua en la siguiente década.

Aunque actualmente se desarrollan y aplican diversas estrategias para ahorrar agua y usarla de manera eficiente en la producción agrícola, tales como el uso de plantas genéticamente modificadas tolerantes a bajas condiciones de humedad del suelo, mejora de sistemas de riego y prácticas culturales, y el uso volúmenes de agua por debajo de las necesidades hídricas de los cultivos de manera controlada, aún persiste la problemática de la escasez de agua en el campo y el desaprovechamiento de esta. Debido a lo anterior, se identifica la necesidad de realizar más investigaciones para cada una de estas estrategias, donde se evalúen los impactos ambientales y económicos a los que estas prácticas conllevan, y si realmente se da solución a las problemáticas planteadas, o si es necesario abordar todas estas estrategias en conjunto como una alternativa para el ahorro de agua, y que permita que su escasez no sea un factor limitante para la producción de alimentos. Finalmente, aunque no seamos actores directos en el sector agrícola, que es el que consume la mayor cantidad de agua, es necesario cuidar el agua en nuestro quehacer diario; esto lo podemos lograr evitando su desperdicio, implementando acciones para ahorrar dicho recurso. Esto permitirá que el agua continúe disponible para nosotros, generaciones futuras, animales y plantas, ya que nuestra vida depende de este recurso.

7. Referencias bibliográficas

- Acosta-García, G., Chapa-Oliver, A. M., Millán-Almaraz, J. R., Guevara-González, R. G., Cortez-Baheza, E., Rangel-Cano, R. M., ... & Torres-Pacheco, I. (2015). CaLEA 73 gene from *Capsicum annuum* L. enhances drought and osmotic tolerance modulating transpiration rate in transgenic *Arabidopsis thaliana*. *Canadian Journal of Plant Science*, 95(2), 227-235.
- Agreda-Laguna, K. A., Cabrera-Ponce, J. L., Medrano, R. R., Garzon-Tiznado, J. A., & Xoconostle-Cazares, B. (2018). Trehalose accumulation provides drought tolerance to genetically-modified maize in open field trials. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 55(4).
- Banco Mundial (2021). *Agua. Panorama general*. <https://www.bancomundial.org/es/topic/water/overview#1>
- Bressa, R. (2021). Escasez de agua: 6 formas de reducir el consumo de agua en la agricultura. <https://www.foodunfolded.com/es/articulo/escasez-de-agua-6-formas-de-reducir-el-consumo-de-agua-en-la-agricultura>
- Carbajal, B. (2021). Escasez de agua limitará producción agrícola en 2021. *La Jornada*. <https://www.jornada.com.mx/notas/2021/01/06/economia/escasez-de-agua-limitara-produccion-agricola-en-2021/>
- CIMMYT. (2012). In Quest for Drought-Tolerant Varieties, CIMMYT Sows First Transgenic Wheat Field Trials in Mexico.
- CINVESTAV. (2018). Maíz híbrido resistente a sequías y bajas temperaturas. <https://conexion.cinvestav.mx/Publicaciones/ma237z-h237brido-resistente-a-sequ237as-y-bajas-temperaturas>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2019). *Usos del agua*. <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/usos-del-agua>
- Collado, A. (2020). La agricultura del futuro: cambios y desafíos. Comisión Económica para América Latina

- y el Caribe [CEPAL]. <https://comunidades.cepal.org/ilpes/es/grupos/discusion/la-agricultura-del-futuro-cambios-y-desafios>
- Coyago-Cruz, E., Meléndez-Martínez, A. J., Moriana, A., Girón, I. F., Martín-Palomo, M. J., Galindo, A., Pérez-López, D., Torrecillas, A., Beltrán-Sinchiguano, E., & Corell, M. (2019). Yield response to regulated deficit irrigation of greenhouse cherry tomatoes. *Agricultural Water Management*, 213, 212-221. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.10.020>
- Diario Oficial Mexicano [DOF]. (2020). *Decreto por el que se establecen las acciones que deberán realizar las dependencias y entidades que integran la Administración Pública Federal, en el ámbito de sus competencias, para sustituir gradualmente el uso, adquisición, distribución, promoción e importación de la sustancia química denominada glifosato y de los agroquímicos utilizados en nuestro país que lo contienen como ingrediente activo, por alternativas sostenibles y culturalmente adecuadas, que permitan mantener la producción y resulten seguras para la salud humana, la diversidad biocultural del país y el ambiente. Decreto de 21-12-2020*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5609365&fecha=31/12/2020
- FAO. (1996). Cumbre Mundial sobre la Alimentación 13-17 de Noviembre 1996 Roma Italia. http://www.fao.org/wfs/index_es.htm
- FAO. (2003). Enfoques/2003. *Incrementar la productividad del agua*. <https://www.fao.org/ag/esp/revista/0303sp2.htm>
- FAO. (2009). *How much water is needed to produce...?* Water Resources.
- FAO. (2009). "La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050", en *Cómo alimentar al mundo en 2050*, Secretaría del Foro de Alto Nivel de Expertos, Italia, Roma, pp. 28. https://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/synthesis_papers/C%3%B3mo_alimentar_al_mundo_en_2050.pdf
- FAO. (2017). *Escasez de agua: Uno de los grandes retos de nuestro tiempo*. <http://www.fao.org/zhc/detail-events/es/c/880888/>
- FAO. (2017). The future of food and agriculture-Trends and challenges. *Annual Report*, 296, 1-180.
- FAO. (2018). Los contaminantes agrícolas: una grave amenaza para el agua del planeta. <https://www.fao.org/in-action/agronoticias/detail/es/c/1141955/>
- FAO. (2019). Simposio Mundial sobre la Erosión del Suelo. <https://www.fao.org/about/meetings/soil-erosion-symposium/about-the-symposium/es/>
- FAO. (2020). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2020. Superar los desafíos relacionados con el agua en la agricultura*. Roma. <https://doi.org/10.4060/cb1447es>
- FAO. (2021). El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura - Sistemas al límite. Informe de síntesis 2021. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb7654es>
- FAO. (2021). El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura - Sistemas al límite. Informe de síntesis 2021. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb7654es>
- Flores G., Álvaro. (2021). Investigan cómo ahorrar agua con prácticas agrícolas sustentables. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. <https://idp.cimmyt.org/investigan-como-ahorrar-agua-con-practicas-agricolas-sustentables/>
- Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental. (2007). Contaminación del agua por plaguicidas. <https://agua.org.mx/biblioteca/contaminacion-del-agua-por-plaguicidas/#:~:text=La%20contaminaci%C3%B3n%20del%20agua%20por,el%20balance%20de%20algunos%20ecosistemas.>
- Forbes. (2021). *La sequía golpea al agro mexicano y anticipa una menor producción*.
- Gutiérrez, D., Ruíz, R., y Xoconostle, B. (2015). *Estado actual de los cultivos genéticamente modificados en México y su contexto internacional*. <https://conacyt.mx/cibiogem/images/cibiogem/comunicacion/publicaciones/Estado-actual-de-los-cultivos.pdf>
- Infoagro. (2020). *Alimentos transgénicos en México*. <https://mexico.infoagro.com/alimentos-transgenicos-en-mexico/>
- Intagri. (s/f). El riego, la Importancia de su Programación y los Parámetros de Humedad en el Suelo. <https://www.intagri.com/articulos/agua-riego/El-riego-la-importancia-de-su-programacion-y-los-parametros-de-humedad-en-el-suelo>

- Khan, S., Anwar, S., Yu, S., Sun, M., Yang, Z., & Gao, Z. Q. (2019). Development of Drought-Tolerant Transgenic Wheat: Achievements and Limitations. *International journal of molecular sciences*, 20(13), 3350. <https://doi.org/10.3390/ijms20133350>
- Kovalenko, Y., Tindjau, R., Madilao, L. L., & Castellarin, S. D. (2021). Regulated deficit irrigation strategies affect the terpene accumulation in Gewürztraminer (*Vitis vinifera* L.) grapes grown in the Okanagan Valley. *Food Chemistry*, 341, 128172. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128172>
- Kumari, U., Swamy, K., Gupta, A., Karri, R. R., & Meikap, B. C. (2021). Global water challenge and future perspective. In *Green Technologies for the Defluoridation of Water* (pp. 197-212). Elsevier.
- Larach, M. A. (2001). *El comercio de los productos transgénicos: el estado del debate internacional*. CEPAL.
- Liang, C. (2016). Genetically modified crops with drought tolerance: achievements, challenges, and perspectives. In *Drought Stress Tolerance in Plants, Vol 2* (pp. 531-547). Springer, Cham.
- Maguey, H. (2018). *Crisis del agua*. Más de 80% Del Agua Se va En Uso Agrícola y de La Industria. <https://www.gaceta.unam.mx/crisis-agua-industria/>
- Martínez, M. (2013). Tecnologías para el uso sostenible del agua. *Tegucigalpa*: FAO.
- Méndez-Vázquez, J. R., Benavides-Mendoza, A., y González-Morales, S. (2021). Efecto del riego deficitario en la acumulación de compuestos antioxidantes en plantas de tomate. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 8(2), 1-9. <https://doi.org/10.19136/era.a8n2.2822>
- Muñoz, F. (2009). Importancia del agua en la nutrición de cultivos. *Carta Trimestral. Cenicaña*, 31, 16-18. https://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallg/home_4/mod_virtuales/modulo2/5.pdf
- North Carolina Zoo (NCZOO). (2019). Cultural practices of conserving water and soil in sustainable agriculture. 1st Term Teacher Training Manual. <https://www.nczoo.org/sites/default/files/2020-09/Term-1-Cultural-practices-field-trip-management.pdf>
- Ochoa-Noriega, C. A., Aznar-Sánchez, J. A., Velasco-Muñoz, J. F., y Álvarez-Bejar, A. (2020). The Use of Water in Agriculture in Mexico and Its Sustainable Management: A Bibliometric Review. *Agronomy*, 10(1957).
- Pérez, R. (2021). *El agua en la agricultura: importancia y manejo*. <https://www.iagua.es/blogs/ricardo-perez/agua-agricultura-importancia-y-manejo>
- Schaible, G. D., & Aillery, M. P. (2017). Challenges for US Irrigated Agriculture in the Face of Emerging Demands and Climate Change. In J. R. Ziolkowska & J. M. B. T.-C. for W. R. Peterson (Eds.), *Competition for Water Resources. Experiences and Management Approaches in the US and Europe* (pp. 44-79). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803237-4.00004-5>
- SIAP. (2013). *Uso del agua en México. Boletín semanal del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) de la SAGARPA*. <http://www.campomexicano.gob.mx/boletinsiap/013-e.html>
- SIAP. (2018). *En la agricultura, los sistemas de riego son utilizados para un aprovechamiento óptimo del agua*. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. <https://www.gob.mx/siap/articulos/en-la-agricultura-los-sistemas-de-riego-son-utilizados-para-un-aprovechamiento-optimo-del-agua?idiom=es>
- Shrivastava, P., & Kumar, R. (2015). Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 22(2), 123-131. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2014.12.001>
- Van Vliet, M. T. H., Flörke, M. y Wada, Y. 2017. Quality matters for water scarcity. *Nature Geoscience*, Vol. 10, Pp 800-802. doi.org/10.1038/ngeo3047
- Vélez-Sánchez, J. E., Balaguera-López, H. E., & Alvarez-Herrera, J. G. (2021). Effect of regulated deficit irrigation (RDI) on the production and quality of pear Triunfo de Viena variety under tropical conditions. *Scientia Horticulturae*, 278, 109880. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109880>
- Zarza (s/f). ¿Qué es la eutrofización?. <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-eutrofizacion>
- Worldometer (2022). Población mundial. <https://www.worldometers.info/es/poblacion-mundial/#ref-1>



MODELOS MATEMÁTICOS Y BIOREFINERÍAS: SINERGIA HACIA LA SUSTENTABILIDAD

MATHEMATICAL MODELS AND BIOREFINERIES: SYNERGY TOWARDS SUSTAINABILITY

Martínez-Guido Sergio Iván *, Gutiérrez-Antonio Claudia¹, Toledano-Ayala Manuel¹, García-Trejo Juan Fernando¹

¹ Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas s/n, Cp. 76010, Querétaro, Querétaro, México.

* Autor de correspondencia, correo: maarangel@hotmail.com

Resumen

A nivel mundial, el crecimiento poblacional ha impactado directamente en el incremento en las demandas de alimentos, combustibles, materias primas, y algunos otros productos químicos. Bajo este contexto, la satisfacción de las necesidades actuales sin comprometer los recursos disponibles para futuras generaciones, se ha convertido en un tema de suma relevancia; en la última década las comunidades científicas, gubernamentales y tecnológicas han enfocado sus esfuerzos en ello. En ese sentido, la conversión de biomásas mediante esquemas de biorefinerías permite aprovecharlas en su totalidad para generar productos de valor agregado, biocombustibles, así como bioenergía. Sin embargo, dada la gran variedad de productos que pueden generarse en una biorefinería, su síntesis no es una tarea trivial. Así, la optimización matemática resulta ser una herramienta poderosa que puede emplearse para realizar dicha tarea. Por ello, en este artículo se presenta información sobre los modelos matemáticos, así como las biorefinerías, en aras de mostrar como ambas estrategias pueden hacer sinergia en la implementación de procesos sustentables, rumbo a una economía circular.

Palabras claves: *optimización matemática, sustentabilidad, biorefinerías*

Abstract

Worldwide, population growth has had a direct impact on increasing demand for food, fuel, raw materials, and some other chemicals. In this context, meeting current needs without compromising the resources available to future generations has become a highly relevant issue; in the past decade, the scientific communities, government, and technology have focused their efforts on it. In this sense, the conversion of biomasses through biorefinery schemes allows to take full advantage to generate value-added products, biofuels, as well as bioenergy. However, given the wide variety of products that can be generated in a biorefinery, its synthesis is not a trivial task. Therefore, mathematical optimization turns out to be a powerful tool that can be used to accomplish that task. Therefore, this article presents information on mathematical models as well as biorefineries; in order to show how both strategies can make synergy in the implementation of sustainable processes, towards a circular economy.

Keywords: mathematical optimization, sustainability, biorefineries

1. Introducción

El desarrollo sustentable ha sido uno de los focos de atención para la humanidad entera en las últimas décadas; esto como medida de mitigación ante el creciente cambio climático y sus graves derivaciones (Zhang & Zhang, 2021). En este sentido, se han desarrollado diferentes estrategias para maximizar el aprovechamiento de las materias primas, minimizando los residuos o subproductos, e incorporando fuentes de energías alternas a los combustibles fósiles. Estas estrategias se encuentran alineadas al modelo de Economía circular, en el cual se busca reducir el uso de nuevos recursos. En este contexto, el procesamiento en esquemas de biorefinerías es una alternativa que permite aprovechar en su totalidad las materias primas para generar productos de valor agregado, biocombustibles, así como bioenergía. La definición de biorefinería surge en analogía al concepto de refinería de crudo convencional; en las petro-refinerías se procesa el petróleo para la obtención de combustibles (85% del total de la masa refinada), compuestos y materias primas petroquímicas (15% del total de la masa refinada) (Aristizábal-Marulanda & Cardona-Alzate, 2018); es decir se procesa una sola materia prima para generar una amplia gama de productos. Por lo que, en una biorefinería, una materia prima (biomasa) se convierte en una alta gama de diversos productos de valor agregado, biocombustibles, y bioenergía (eléctrica y/o térmica). En una biorefinería se incluyen diversos procesos de conversión, los cuales pueden ser físicos, mecánicos, termoquímicos, químicos, y biotecnológicos (Alexandri *et al.*, 2020).

Ahora bien, existe una variedad de biomásas con potencial a ser usadas en esquemas de biorefinerías, así como una disparidad en su disponibilidad; derivado de ello, surgen una serie de cuestiones o variables de decisión que deben ser atendidas en la síntesis y diseño de biorefinerías nuevas o existentes. Algunas de estas incógnitas incluyen la compensación de objetivos ambientales, sociales y económicos de dichos sistemas; también se consideran la cantidad de biomasa (tipo y disponibilidad) así como su distribución, la posible

necesidad de sitios de almacén, la capacidad de cada planta procesadora (biorefinería), los balances de materia y energía involucrados, la localización de los mercados, los tipos de transporte, además de cuestiones de seguridad a considerar durante todo el proceso.

Ante ello, ramas científicas como la optimización matemática han tomado mayor relevancia en la última década en sectores gubernamentales, empresariales y por otros competidores interesados. Lo anterior, como consecuencia de la inmensa cantidad de variables que deben ser consideradas al proponer una nueva biorefinería, o la transición de un proceso actual a una biorefinería. Dichas variables, en muchos de los casos, incluyen regulaciones y restricciones públicas enfocadas a la reducción de las emisiones (Pakseresht *et al.*, 2020). Bajo este contexto la investigación de operaciones se ha integrado como una herramienta de apoyo al desarrollo sustentable, con la meta de determinar el mejor curso de acción (óptimo) de un problema (con toma decisiones). Así, es posible obtener soluciones mediante el desarrollo de modelos matemáticos representativos de cada sistema en particular, y en algunos casos el conjunto de sistemas a resolver. Como resultado de la integración de la optimización matemática en el diseño y desarrollo de las biorefinerías se han generado herramientas atractivas con miras al desarrollo sustentable. Las herramientas versan sobre la formulación de ecuaciones matemáticas, las cuales permiten la representación operacional y funcional de la biorefinería en sí; lo anterior, con el objeto de obtener soluciones en forma de diagramas de proceso con valores óptimos para la biorefinería en cuestión, bajo estándares y políticas de mejora social, ambiental y económica, generando un panorama general para los tomadores de decisiones.

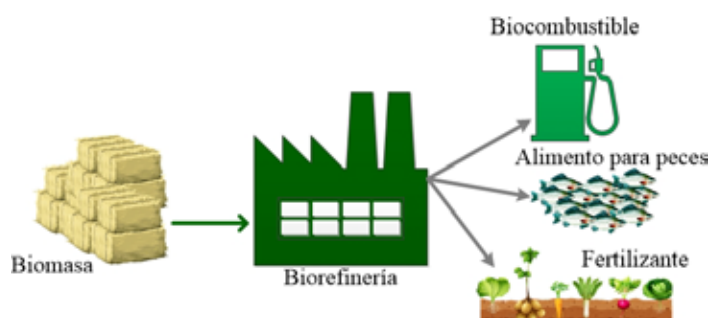
En este sentido, en el presente artículo se realiza una descripción detallada acerca de la clasificación de las biorefinerías, así como la aplicación de éstas sobre algunos casos de estudio particulares. Posteriormente, se definen algunos factores de gran relevancia dentro de la formulación de modelos de optimización matemática; seguida del planteamiento en el que se enmarca la sinergia entre ambas herramientas con aras de la sustentabilidad.

2. Biorefinerías

El concepto de biorefinería considera diferentes plataformas de procesamiento para la conversión de cualquier tipo de biomasa; con el objeto de obtener un alto espectro de bioproductos, y bioenergía considerando siempre rutas de producción sustentables (véase Figura 1).

Figura 1

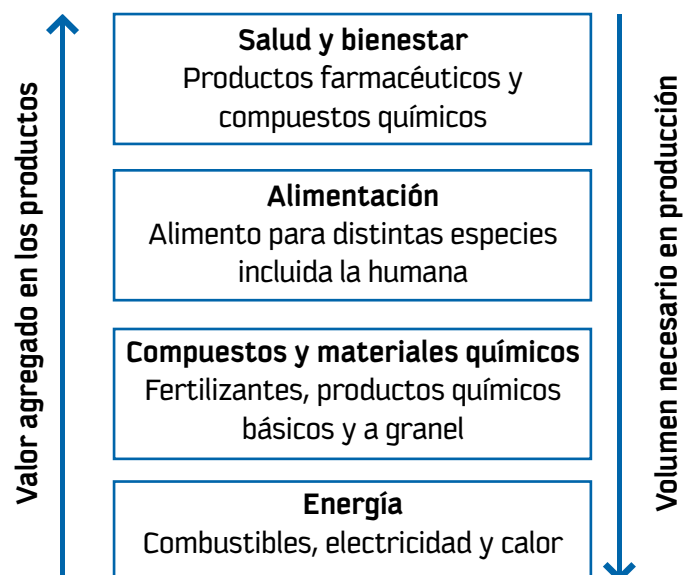
Esquema de una biorefinería



De acuerdo con Mussatto [2016], las biorefinerías se pueden clasificar con base al producto principal obtenido en 2 principales grupos: a) biorefinerías energéticas y b) biorefinerías no energéticas. El primer grupo tiene como meta la transformación de biomasa para la generación de biocombustibles para el sector transporte, mientras que los sub-productos obtenidos se venden como compuestos de valor agregado buscando incrementar el beneficio económico de cada planta. Por otro lado, en el segundo grupo de biorefinerías se usa la biomasa alimentada para la síntesis de compuestos químicos o materiales de alto valor agregado como principal interés, mientras que los subproductos energéticos generados en el proceso son reintegrados en las líneas principales de manufactura. En este sentido, el primer grupo tienen como enmienda el producir altos volúmenes; sin embargo, éstos tienen menor precio en comparación con las biorefinerías del segundo grupo, atendiendo al comportamiento observado en la Figura 2.

Figura 2

Valor agregado de productos generados en una biorefinería



Cabe mencionar que en ambos tipos de biorefinerías es posible considerar la generación de alguno o varios sub-productos mostrados en la Figura 2, con el objeto de incrementar el beneficio económico y cumplir estándares de sustentabilidad.

Alibardi *et al.* [2020] sugieren que la integración de biorefinerías promueve el desarrollo social, principalmente en comunidades con bajo índice de desarrollo humano; además, las biorefinerías son sistemas sostenibles [Dragone *et al.*, 2020], indistintamente del tipo de producto principal que se plante obtener. Adicionalmente, con la integración de biorefinerías es posible promover la implementación y desarrollo de la economía circular, al mismo tiempo que se reduce la presión sobre los recursos renovables y no renovables.

2.1 Aplicación de biorefinerías

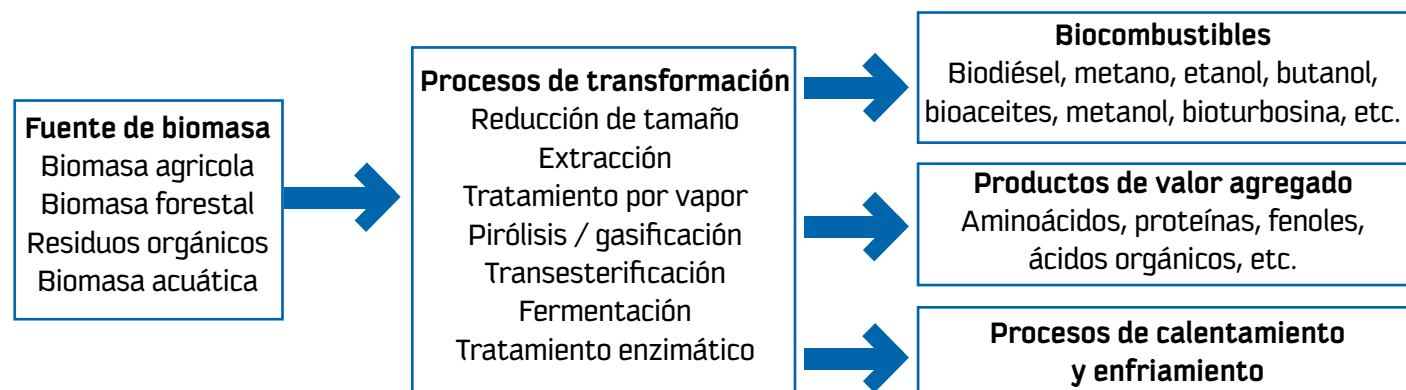
En las últimas dos décadas, diferentes tipos de biomasa (como las mostradas por la Figura 3) se han convertido en materias primas de interés como fuentes renovables de productos de valor agregado y combustibles; en este

contexto, las biorefinerías son el medio para generar, y posteriormente comercializar dichos productos. Adicionalmente, la biorefinerías son un esquema de procesamiento atractivo para la transición a una economía circular, basada en cero residuos; es decir, en

la que sea posible revalorizar los grandes volúmenes de biomasa residual forestal, agro-industrial, y alimenticia. Lo anterior será factible a través de tecnologías limpias basadas en la química verde, desarrollando con ello la bioeconomía (Orejuela-Escobar *et al.*, 2021).

Figura 3

Aplicación de biorefinerías a diferentes tipos de biomasa



Patel & Shah (2021) resaltan que un punto clave en la implementación de cualquier biorefinería es el pretratamiento usado sobre cada tipo de biomasa, ya que de este depende que se le dé un aprovechamiento integral a todos los componentes de los diferentes tipos de biomasa; lo que como consecuencia impactará directamente sobre el rendimiento de los productos, y el aspecto económico del proceso.

Los residuos lignocelulósicos han sido revalorizados mediante la integración de una biorefinería, ya que son los de mayor abundancia a nivel global (con aproximadamente 181.5 billones de toneladas al año). Por ejemplo, la revalorización del aserrín, un residuo forestal, a través de una biorefinería muestra que es posible la producción de ácidos carboxílicos de cadena corta y mediana, la generación de hidrógeno verde, y biometano (Sarkar *et al.*, 2022). Algunas otras materias primas lignocelulósicas como el bagazo de la caña de azúcar, bagazo de sorgo, rastrojo y mazorcas de maíz, y la paja de trigo han sido transformadas en productos de valor agregado (bio-aceites, ácido láctico, ácido succínico, furfural, xilitol, xilosa, vainillina), biocombustibles (biohidrógeno, metano, y etanol), así como cogeneración de electricidad mediante la aplicación de biorefinerías.

Sin embargo, no sólo biomasa sólida se han estudiado como materias primas en diversas biorefinerías; hoy en día se ha propuesto la integración de la biorefinería como una herramienta para el tratamiento de aguas residuales (Yang *et al.*, 2022). Para esta materia prima se han propuesto tratamientos biológicos como el cultivo de micro-algas; este tratamiento es una herramienta atractiva, debido a que a partir de este tipo de microorganismos pueden extraerse compuestos de valor agregado como aceites, e incluso pigmentos. Adicionalmente, en este tipo de biorefinería es posible la generación de biogás, fertilizantes y agua tratada. Se puede observar que existen diferentes tipos de biorefinerías que se han propuesto en la búsqueda de la mayor cantidad de productos de valor agregado, energéticos y fuentes de servicios posibles; sin embargo, incluso cuando se tienen casos altamente promisorios, existe una gran cantidad de variables a analizar dentro de cada biorefinería propuesta; ello se debe a que los procesos propuestos deben generar una mejora sustentable, al menor costo posible, y con el mejor desarrollo social. En este sentido, como se mencionó en la sección 1, la optimización matemática se ha convertido en una herramienta indispensable para alcanzar todos estos

objetivos. Ante ello, en la siguiente sección se describirán algunos conceptos que deben considerarse, para así evidenciar cómo es que las biorefinerías y el modelado matemático proveen de soluciones sostenibles.

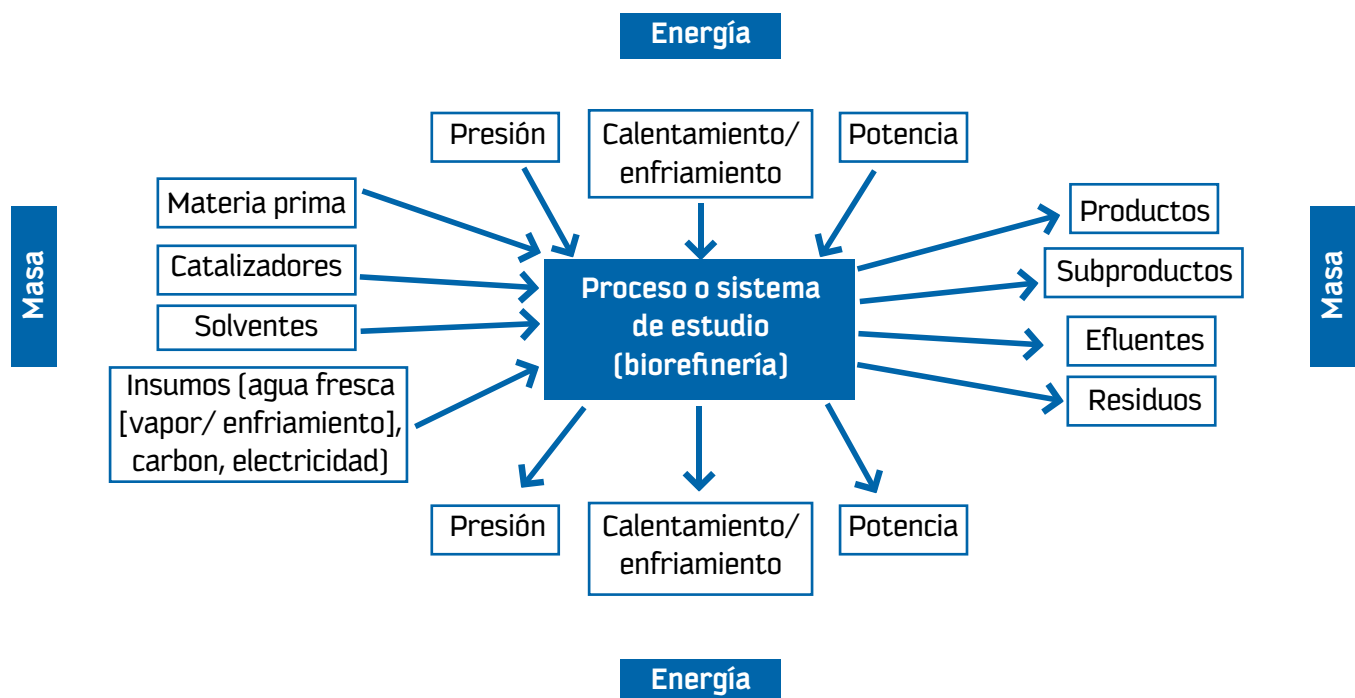
3. Los modelos de optimización matemática

De acuerdo con Edgar *et al.* (2001), la optimización matemática puede ser definida como el uso de métodos matemáticos para determinar soluciones con la más alta relación costo-eficiencia-sustentabilidad de cualquier problema de procesos; por ello, la optimización matemática es una herramienta indispensable para la toma de decisiones. Este tipo de instrumentos matemáticos pueden ser aplicados a un sinfín de problemas en términos de diseño, construcción, operación, y análisis de cualquier planta industrial (micro y macro), o incluso aplicable a redes de plantas. En este tipo de problemas, la cantidad de variables involucradas

hace imposible identificar una solución de manera trivial. Adicionalmente, en estos problemas, se presentan como objetivos simples o un conjunto de ellos (funciones objetivo) la maximización o minimización (según sea el caso) de aspectos económicos, rendimientos, emisiones, residuos, desarrollo social, entre otros; dichas funciones objetivo están sujetas a un sistema de ecuaciones (restricciones) dictado por la misma esencia del sistema (o proceso) en sí (El-Halwagi 1997), así como a balances como los mostrados en la Figura 4. Específicamente, las restricciones se deben representar (de forma matemática) mediante expresiones de igualdad o desigualdad. En este sentido, las restricciones en forma de igualdad físicamente representan balances de materia o energía, requerimientos termodinámicos, o ecuaciones de modelado del sistema. Por otra parte, las restricciones en forma de desigualdad pueden representar rangos permitidos de contaminantes, temperaturas, flujos, y presiones, o incluso algunas leyes de la termodinámica.

Figura 4

Balances generales de materia y energía en una biorefinería.



Por otro lado, si todas las ecuaciones del sistema a estudiar (restricciones y funciones objetivo) resultan tener una linealidad matemática (es decir que no presenta división de variables, exponenciales, logaritmos, derivadas, integrales o funciones trigonométricas), entonces el problema de optimización se identifica como un Problema Lineal (LP); de lo contrario se estará hablando de un Problema No Lineal (NLP). Así mismo, la naturaleza de las variables puede clasificar a los problemas de optimización matemática en Problemas Mixtos Enteros (MIP), cuando sólo se emplean variables enteras; o bien, si las variables son continuas reales, se generan Problemas Mixtos Enteros Lineales (MILPs) y Problemas Mixtos Enteros No Lineales (MINLPs).

A partir de todo lo descrito previamente, se puede deducir que la optimización matemática es una herramienta completa capaz de generar soluciones a problemas no triviales, como el diseño de biorefinerías. En este tipo de problemas se identifican todas las restricciones, variables y parámetros que tienen influencia en la función (funciones) objetivo propuesta(s); así, es posible generar soluciones de gran ayuda para los tomadores de decisiones. En la siguiente sección, se revisará como mediante la integración del concepto de biorefinería y modelos matemáticos ha sido posible encontrar soluciones sustentables a diferentes necesidades.

3.1 Optimización matemática en el diseño de biorefinerías

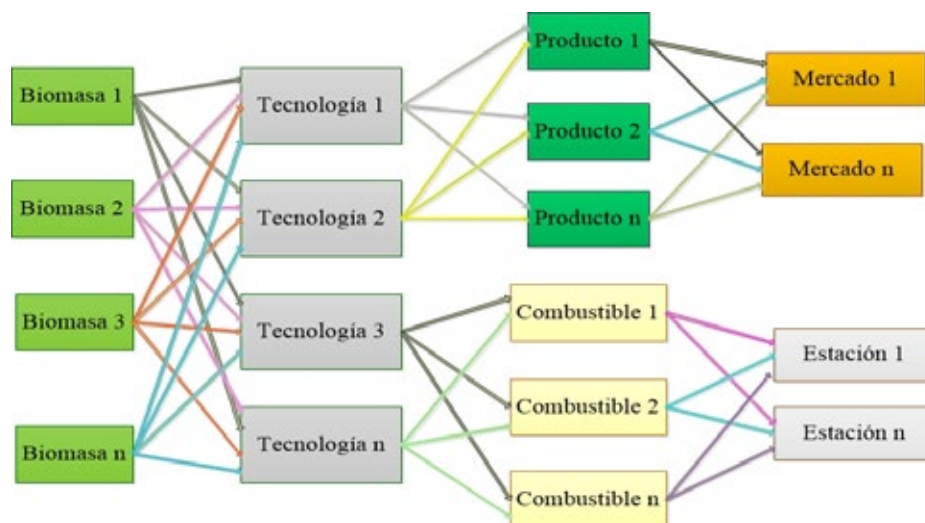
Previamente se ha descrito el funcionamiento general

de una biorefinería, las cuales son plantas industriales que pueden usar una infinidad de biomásas con el fin de obtener productos de alto valor agregado, energéticos y algunos otros servicios como calentamiento y enfriamiento. En este sentido, es posible identificar que, dado la diversidad de materias primas existentes, se requiere considerar primero la composición de cada fuente, la disponibilidad e incluso la frecuencia con la que se cuenta. Estos aspectos tendrán un impacto en la selección del pretratamiento, actividad que como tal tiene vinculados aspectos económicos, ambientales y de consumo energético para cada alternativa disponible. Subsecuentemente, se tiene el proceso de transformación (véase Figura 3), el cual se define a partir de todos los aspectos previamente mencionados, y se añaden variables de análisis que influyen la selección de una alternativa sobre otra.

Por otra parte, el objetivo final de una biorefinería es la comercialización de los productos; siendo ésta otra etapa de la cual se desprenden otros conjuntos de variables a tener en consideración para contribuir a la sustentabilidad y transición a una bio-economía. En este sentido, aspectos que van desde la fuente de materias primas, adquisición, transporte, procesos de transformación (revalorización), así como puntos logísticos contribuyen a la complejidad del diseño de una biorefinería (véase Figura 5); razón por la que se ha buscado una sinergia entre la optimización matemática y el concepto de biorefinería.

Figura 5

Superestructura de una biorefinería



En este contexto, de acuerdo a lo descrito por Holm-Nielsen & Ehimen (2014), es necesario implementar enfoques de optimización matemática para generar configuraciones óptimas de cada biorefinería o conjunto de ellos; esto a través de una metodología conformada en tres etapas principales.

La primera etapa considera el planteamiento de una superestructura, el cual es un diagrama de flujo que emula todas las posibles soluciones en términos de configuraciones posibles para cada biorefinería en cuestión. Posteriormente, se formula el modelo o programa matemático a codificar (o resolver), el cual está conformado por un conjunto de variables discretas y continuas, y que atiende a cada esencia del problema particular (restricciones y balances de materia y energía). Como tercera etapa se tiene la solución del modelo de optimización, caracterizada por soluciones enfocadas a programación disyuntiva (herramientas matemáticas aplicadas a la toma de decisiones), resolvedores enfocados a modelos mixtos enteros lineales y no-lineales, entre otros; los cuales tienen como meta determinar dentro de las posibles soluciones la óptima.

Esta metodología ha sido aplicada por diversos autores; algunos casos muy particulares pueden ser revisados en enfoques propuestos por Santibañez-Aguilar et al. (2011), Belletante et al. (2016), o Rosengart (2017), por dar algunos ejemplos.

4. Estudio de caso

En las últimas décadas diversas materias primas (o biomasas) han sido consideradas como fuentes alternas ante la creciente crisis energética y mitigación del constante cambio climático. Particularmente, la *Jatropha curcas* L (JCL) especie arbórea debido a su resistencia a sequías y mínimos requerimientos nutricionales (Liu & Mai, 2022) ha resultado una fuente promisoría para su aprovechamiento como materia prima de diversos biocombustibles. Bajo este contexto Deeba et al., (2012) a partir de aceite de JCL llevaron a cabo la producción de biodiesel a nivel laboratorio obteniendo rendimientos del 94%. Adicionalmente, los autores propusieron que es posible la producción de biogás a partir de los residuos

que la producción de aceite generaba. Posteriormente Wang, (2016) propuso una biorrefinería considerando los frutos de JCL como materia prima. Está fue simulada en ASPEN PLUS® considerando un flujo de alimentación de 100,000 kg/h, de donde fue posible obtener 19,375 kg/h de aceite y estimar 2,019 kg/h de biodiesel, 1,988 kg/h de propano, 10,797 kg/h de bioturbosina y 169 kg/h de hidrogeno. Similarmente, Romero-Izquiero et al., (2022) propusieron la síntesis de una biorefinería considerando el mismo fruto como materia prima, pero, en dicha simulación [llevada a cabo ASPEN PLUS®] se adiciono la intensificación de procesos. Por lo que a partir de alimentación de material fresco de 1,016,418 kg/h, fue posible estimar un rendimiento de aceite de 140,572 kg/h, y unas producciones de 34,640 kg/h de biodiesel, 1,988 kg/h de propano, 39,773 kg/h de bioturbosina y 169 kg/h de hidrogeno.

Por su parte Domínguez-García et al., (2017) proponen el diseño optimo de la cadena de suministro con la capacidad de satisfacer la demanda de biocombustible de aviones (bioturbosina) en México, considerando biorefinerías alimentadas con materias primas como la jatropha, camelina e higuierilla. Para ello, los autores proponen la formulación de un modelo matemático mediante el cual es posible determinar adicional a los precios de venta de dicho combustible, el diseño completo de la cadena de valor, así como parámetros relacionados con los procesos logísticos. A partir del modelo fue posible identificar que se satisfacía el 100% de la demanda de 13 estados de dicho biocombustible, si las materias primas eran usadas como fuente energética.

Bajo este contexto, de acuerdo con Zamarripa-Colmenero & Días-Padilla (2008) reportaron un potencial alto para la producción de JCL de 2.6 millones de ha, y 3.4 millones de ha con potencial medio. En este sentido, con base en los rendimientos reportados con el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera "SIAP" (2016) sería posible la producción de aproximadamente 3.26 millones de toneladas de fruto de JCL. A partir de este flujo, de acuerdo con los rendimientos generados en las simulaciones de Wang (2016) y Romero-Izquiero (2022) es posible estimar la extracción de 0.68 millones de toneladas de aceite, y rendimientos respectivos para cada biocombustible como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1
Producción de biocombustibles estimados.

Toneladas producidas por año		
	Wang [2016]	Romero-Izquierdo [2022]
Biodiesel	70,860	167,567
Propano	69,772	9,617
Bioturbosina	299,200	374,000
Hidrógeno	5,931	818

Bajo esta premisa productiva de cada tipo de biocombustible, tomando en consideración las ganancias netas reportadas por Domínguez-García *et al.*, (2017), la planificación de la cadena de suministro a partir de JCL es posible predecir los ingresos mostrados en la Tabla 2. Dichos resultados se obtienen a partir de la configuración de la cadena propuesta por dicho trabajo a través de la formulación matemática desarrollado.

Tabla 2
Potencial económico

Ganancias esperadas (USD/año)		
	Wang [2016]	Romero-Izquierdo [2022]
Biodiesel	73,978,244	174,939,738
Propano	61,539,245	8,481,937
Bioturbosina	260,304,000	325,380,000
Hidrógeno	NA	NA
	395,821,490	508,801,675

A partir del presente caso de estudio es posible identificar que el unir datos experimentales, parámetros generados a partir de la simulación de biorefinerías, así como la interacción con modelos de optimización matemática, conlleva a presentar soluciones sólidas en términos de nuevos procesos productivos que pueden ser de alto valor para los tomadores de decisiones.

Conclusiones

Se ha discutido la propuesta de las biorefinerías como estrategias para el uso de biomasa como materia prima en la generación de productos renovables de alto valor. Asimismo, se muestra la interacción existente entre herramientas de optimización matemática en el diseño y

análisis de este tipo de biorefinerías; también se incluyen las ventajas que este tipo de herramientas proveen en las etapas de diseño y/u operación de sistemas resilientes, transformándolos en sistemas sustentables y sostenibles.

Por otro lado, el uso de estas herramientas permite el análisis de diversos escenarios (operados bajo diferentes condiciones) para una misma biorefinería, mediante el uso de modelos matemáticos (sin la necesidad de instalación de la cadena de suministro en sí y los costos que ello conlleva). Lo anterior con el objeto de experimentar e identificar cuáles son las condiciones óptimas de manejo, resultados que hoy por hoy son imprescindibles para los tomadores de decisiones.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero proporcionado por la Secretaría de Educación Pública SEP, mediante el apoyo postdoctoral PRODEP-UAQ/332/21 otorgado a S.I. Martínez-Guido.

Referencias bibliográficas

Alexandri M., Demichelis F., Fiore S., Lübeck M., Pleissner D. Waste Biorefinery: Integrating biorefineries for waste valorization. ELSEVIER. Chapter 22, ISBN 978-0-12-818228-4, 2020.

Alibardi L., Astrup T.F., Asunis F., Clarke W.P., De Gioannis G., Dessì P., Lens P.N.L., Lavagnolo M.C., Lombardi L., Muntoni A., Pivato A., Poletti A., Pomi R., Rossi A., Spagni A., Sipiga D. Organic waste biorefineries: looking towards implementation. Waste Management. 114, 274-286, 2020.

Aristizábal-Marulanda V., Cardona-Alzate, C.A. Methods for designing and assessing biorefineries: Review. Biofuels Bioproducts & Biorefining. 13, 789-808, 2018.

Belletante S., Montastruc L., Negny S., Domenech S. Optimal design of an efficient, profitable and sustainable biorefinery producing acetone, butanol and ethanol: Influence of the in-situ separation on the purification structure. Biochemical Engineering Journal. 116, 195-209, 2016.

Bertran M.O., Frauzem R., Sanchez-Arcilla A.S., Zhang L., Woodley J.M., Gani R. A generic methodology

- for processing route synthesis and design based on superstructure optimization. *Computer & Chemical Engineering*. 106, 892-910, 2017.
- Deeba, F., Kumar, V., Gautam, K., Saxena, R.K., Sharma, D.K. Bioprocessing of *Jatropha curcas* seed oil and deoiled seed hulls for the production of biodiesel and biogas. *Biomass and Bioenergy*. 40, 13-18, 2012.
- Domínguez-García, S., Gutiérrez-Antonio, C., De-Lira-Flores, J.A., Ponce-Ortega, J.M. Optimal planning for the supply chain of biofuels for aviation in Mexico. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 19, 1387-1402. 2017
- Dragone G., Kerssemakers A.A.J., Driessen J.L.S.P., Yamakawa C.K., Brumano L.P., Mussatto, S.I. Innovation and strategic orientations for the development of advanced biorefineries. *Bioresource Technology*. 302, 122847, 2020.
- Edgar T.F., Himmelblau D.M., Lasdon L.S. *Optimization of Chemical Processes*. McGraw-Hill. Chapter 1, ISBN 007-039359-1, 2001.
- El-Halwagi M.M. *Pollution Prevention through Process Integration: Systematic Design Tools*. ELSEVIER. Chapter 1, ISBN 978-0-12-236845-5, 1997.
- Holm-Nielsen J.B., Ehimen E.A. *Biorefinery plant design, engineering and process optimization*. Woodhead Publishing. Chapter 4, ISBN 978-0-85709-521-3, 2014.
- Liu, G., Mai, J. Habitat shifts of *Jatropha curcas* L. in the Asia-Pacific region under climate change scenarios. *Energy*. 251, 123885, 2022.
- Mussatto S.I. *Biomass fraction technologies for ligno-cellulosica feedstock based biorefinery*. Elsevier. Chapter 1, ISBN 978-0-12-802323-5, 2016.
- Orejuela-Escobar L.M., Landázuri A.C., Goodell B. Second generation biorefining in Ecuador: Circular bioeconomy, zero waste technology, environment and sustainable development: The nexus. *Journal of Bioresources and Bioproducts*. 6, 83-107, 2021.
- Pakseresht M., Shirazi B., Mahdavi I., Mahdavi-Amiri N. Toward sustainable optimization with stackelberg game between green product family and downstream supply chain. *Sustainable Production and Consumption*. 23, 198-211, 2020.
- Patel A., Shah A.R. Integrated lignocellulosic biorefinery: Gateway for production of second generation ethanol and value added products. *Journal of Bioresources and Bioproducts*. 6, 108-128, 2021.
- Romero-Izquierdo, A.G., Gutiérrez-Antonio, C., Gómez-Castro, F.I., Hernández, S. Synthesis and intensification of a biorefinery to produce renewable aviation fuel, biofuels, bioenergy and chemical products from *Jatropha Curcas* fruit. *IET Renewable Power Generation*. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12388>. 2022
- Santibañez-Aguilar J.E., González-Campos J.B., Ponce-Ortega J.M., Serna-González M., El-Halwagi M.M. Optimal planning of a biomass conversion system considering economic and environmental aspects. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 50, 8558-8570, 2011.
- Sarkar O., Rova U., Christakopoulos P., Matsakas L. Organosolv pretreated birch sawdust for the production of green hydrogen and renewable chemicals in an integrated biorefinery approach. *Bioresource Technology*. 344, 126164, 2022.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera "SIAP". Generalidades de la Red *Jatropha*. Disponible en: <https://www.gob.mx/snics/acciones-y-programas/jatropha-jatropha-spp#:~:text=Usos%20y%20producci%C3%B3n%20nacional&text=El%20SIAP%20report%C3%B3n%20que%20para,poco%20m%C3%A1s%20de%200.4%20MDP>. 2016
- Wang, W.C. Techno-economic analysis of a bio-refinery process for producing Hydro-processed Renewable Jet fuel from *Jatropha*. *Renewable Energy*. 95, 63-73, 2016.
- Yang J., Van-Lier J.B., Li J., Guo J., Fang F. Integrated anaerobic and algal bioreactors: A promising conceptual alternative approach for conventional sewage treatment. *Bioresource Technology*. 343, 126115, 2022.
- Zamarripa-Colmenero, A., Días-Padilla, G. Áreas de potencial productivo de piñón *Jatropha Curcas* L., como especie de interés bioenergético en México. Disponible en: http://www.oleaginosas.org/art_211.shtml. 2008
- Zhang X., Zhang X. Sustainable design of reinforced concrete structural members using embodied carbon emission and cost optimization. *Journal of Building Engineering*. 44, 102940, 2021.



“ABATIMIENTO DE EXPANSIÓN EN SUELO APLICANDO CONCRETO PERMEABLE”

“EXPANSION ABATEMENT IN SOIL BY APPLYING PERMEABLE CONCRETE”

Verdín-Reyes Blanca Angélica ^{1*}, López- Lara Teresa ¹, Hernández- Zaragoza Juan Bosco ¹, Horta-Rangel Jaime Moisés ¹

¹ Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las campanas, S/N, Santiago de Querétaro, Qro., 76000, México

* Autor de correspondencia, correo: blanca-angelica.verdin@outlook.com

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo analizar si la aplicación de estructuras fabricadas con concreto permeable ayuda a disminuir el potencial de expansión de un suelo. Para ello, se extrajo una muestra de suelo en Querétaro, Querétaro y se sometió a ensayos geotécnicos para caracterizarlo. Posteriormente se estudiaron 3 dosificaciones distintas de concreto permeable de baja resistencia a la compresión, para determinar la mezcla óptima para la elaboración de las estructuras de concreto. Las dimensiones de las estructuras investigadas se establecieron en 8 cm de diámetro y alturas de 5 y 7 mm aproximadamente. Se realizaron pruebas de expansión al suelo natural y posteriormente al suelo con la incorporación de las estructuras de concreto permeable. Los resultados mostraron que el suelo en estudio corresponde a un limo inorgánico de alta compresibilidad o alta plasticidad (MH) y la estructura de concreto permeable más favorable fue la de 7 mm de altura, al abatir el 85% de la expansión.

Palabras clave: Arcilla, cimentación, concreto permeable, expansión, suelo expansivo.

Abstract

The objective of this research was to analyze if the application of structures made with permeable concrete helps to decrease the expansion potential of a soil. To do this, a soil sample was extracted in Querétaro, Querétaro, and subjected to geotechnical tests to characterize it.

Subsequently, 3 different dosages of permeable concrete of low compressive strength were studied to determine the optimal mixture for the elaboration of the concrete structures. The dimensions of the structures investigated were established in 8 cm of diameter and heights of 5 and 7 mm approximately. Expansion tests were carried out on the natural soil and subsequently on the soil with the incorporation of permeable concrete structures. The results showed that the soil under study corresponded to an inorganic silt of high compressibility or high plasticity (MH) and the most favorable permeable concrete structure was the 7 mm in height, by lowering 85% of the expansion.

Keywords: Clay, expansion, expansive soil. foundation, permeable concrete.

1. Introducción

Los suelos expansivos existen desde hace millones de años, sin embargo, los problemas que ocasionan este tipo de suelos no habían sido identificados y reconocidos hasta hace apenas unas décadas por varios especialistas. Si bien, aunque ya se han realizado varios tipos de remediaciones, estabilizaciones y diseño de cimentaciones especiales para este tipo de suelo, la problemática aún continúa sin resolverse satisfactoriamente.

En los problemas atribuidos a los suelos expansivos intervienen varios factores, como las características físicas y químicas de las arcillas, las condiciones ambientales donde se ejecutan las obras civiles, la topografía del terreno, las remediaciones o estabilizaciones previas a la construcción y las cimentaciones que se emplean en este tipo de suelo, pues es común que casi no se realicen este tipo de correcciones ni se empleen las cimentaciones adecuadas debido al alto costo que representan.

La distribución geográfica de los suelos expansivos a nivel mundial corresponde aproximadamente a 335 millones de hectáreas, encontrándose en países como Angola, Argelia, Argentina, Australia, Brasil, Canadá, Colombia, Cuba, Ecuador, España, Etiopía, Estados Unidos de América, Ghana, India, Irak, Irán, Kenia, México, Marruecos, Mozambique, Myanmar, Perú, Rusia, Sudáfrica, Turquía, Venezuela, entre otros [16].

En la República Mexicana se ha documentado la presencia de 16.5 millones de hectáreas de suelo expansivo (8.6% de su superficie), particularmente en Querétaro, Guanajuato, Michoacán, Tamaulipas, Morelos, Sonora, Baja California Norte, Veracruz, Chiapas, Campeche, entre otros.

Las pérdidas económicas debidas a problemas de suelos expansivos superan los 2000 millones de dólares al año, lo que supera el promedio anual de los daños causados por inundaciones, huracanes, sismos y tornados [18].

A nivel mundial se han desarrollado varias investigaciones para reducir la expansión de los suelos,

así como para su estabilización, como la de Abu-Zreig, et al, Flórez et al., Viswanadham et al. y Abd El Halim, A.A. y El Baroudy, A.A. [2,17,25,1].

Abu-Zreig, et al. realizaron un estudio para observar el efecto de exposición a altas temperaturas, en tres suelos arcillosos obtenidos del norte de Jordán [2]. Flórez et al. realizaron la estabilización química con cenizas volantes en los suelos expansivos de una zona de San José de Cúcuta, Colombia [17]. Viswanadham et al. estudiaron los suelos remoldeados expansivos, los cuales estaban reforzados con geofibras [25].

Abd El Halim, A.A. y El Baroudy, A.A. evaluaron como el aserrín fino puede modificar las propiedades hidrofísicas de la expansión de suelos obtenidos del delta medio del Nilo, Egipto [1].

En México se han realizado diversas investigaciones, a cargo de López-Lara et al. [2010], López-Lara et al. [2014], Rodríguez, N.A. y Rodríguez, J. C. para disminuir el potencial de expansión de los suelos [20, 21,24,23].

López-Lara et al. [2010], realizaron una investigación para medir el efecto del poliuretano [polímero] en la disminución del potencial de expansión de suelos [20]. López-Lara et al. [2014], presentaron una propuesta para disminuir la expansión de suelos, la cual consiste en estructuras huecas invertidas colocadas sobre suelos expansivos [21].

Rodríguez, N.P. presentó una metodología para abatir la expansión del suelo mediante la introducción de estructuras tubulares porosas [24].

Rodríguez, J. C. analizó la disminución de la expansión de un suelo mediante la combinación de un tratamiento químico con cal y la aplicación de sobrecarga [23].

En la presente investigación se ha propuesto un modelo de cimentación basado en la colocación de estructuras elaboradas con concreto permeable, sobre la superficie del suelo, con la finalidad de abatir la expansión de una manera económica y sobre todo fácil de construir e implementar.

A continuación, se expondrá la metodología empleada, los resultados obtenidos, la discusión de dichos resultados, las conclusiones pertinentes y las referencias utilizadas en todo el desarrollo de la investigación.

2. Metodología

El proyecto se efectuó en 5 etapas:

- Determinación de los parámetros del suelo natural
- Modelo suelo-estructura
- Análisis experimental
- Experimentación final
- Análisis de resultados

2.1. Determinación de los parámetros del suelo

a) Muestreo de suelo.

Las muestras de suelo que se emplearon en la presente investigación fueron extraídas en el espacio 60, en la calle Loma de Sangremal, Santiago de Querétaro, Querétaro, México. Las coordenadas de dicho terreno son 20°35'49.6" latitud norte y 100°27'47.1" longitud oeste. El suelo se obtuvo mediante el método de Pozo a Cielo Abierto (PCA), empleando la retroexcavadora, a una profundidad de 2.2 metros. La exploración y muestreo se realizó bajo los lineamientos de la norma ASTM-D420 [1993] [7].

b) Caracterización geotécnica.

El presente proyecto precisa de un suelo expansivo, por lo que es indispensable analizar sus propiedades a través de una caracterización geotécnica para corroborar que cumpla con los requerimientos solicitados. Para la caracterización geotécnica se requiere realizar diferentes pruebas, tales como análisis granulométrico, límites de consistencia, contenido de agua, determinación del peso específico de la masa del suelo y peso específico relativo de los sólidos del suelo.

• *Análisis granulométrico.* De acuerdo al tamaño predominante de partículas que componen un suelo, se pueden diferenciar gravas, arenas, limos o arcillas. Por lo general se emplean dos métodos para determinar la distribución de tamaño de partículas de un suelo: [1] análisis de tamiz para tamaños de partículas mayores de 0.075 mm de diámetro, y [2] análisis de hidrómetro para tamaños de partículas inferiores a 0.075 mm de diámetro [18]. El análisis del tamiz y el análisis del hidrómetro se realizaron acatando la norma ASTM-D422 [8].

• *Límites de Atterberg.* Mediante el límite líquido, el límite plástico, el índice de plasticidad y la contracción lineal se pueden conocer las características de la parte fina del suelo. Las pruebas se sujetan a la norma ASTM-D4318 [12]. Dependiendo del contenido de

humedad, el suelo se divide en cinco estados: líquido, semilíquido, plástico, semisólido y sólido [23].

• *Contenido de agua.* Es indispensable conocer la humedad natural del suelo extraído, mediante la norma ASTM-D2216 [1992] [10]. Se obtiene una muestra representativa del suelo muestreado de forma alterada y se registra su peso. Posteriormente se seca al horno durante 24 horas a una temperatura constante de 105° a 110° C. Al término de las 24 horas, la muestra se pesa nuevamente.

• *Peso específico por inmersión en agua.* Mide la relación entre el peso del suelo y su volumen (peso volumétrico), de acuerdo a la norma ASTM-D4531 [13]. Se empleó el método B o método de cera de parafina.

• *Peso específico relativo de sólidos.* “El peso específico relativo se define como la relación entre el peso específico de una sustancia y el peso específico del agua, a 4°C, destilada y sujeta a una atmósfera de presión” [18]. La prueba se ejecutó bajo la norma ASTM-D854 [9].

c) Clasificación del suelo.

Es necesario clasificar el suelo muestreado siguiendo los requerimientos de la norma ASTM-D2487 con base a los datos recabados en la caracterización geotécnica y sobre todo que el suelo extraído cumpla con la clasificación CH (arcilla de alta compresibilidad) u MH (limo inorgánico de alta compresibilidad) para la correcta ejecución de esta investigación [11].

d) Prueba de expansión.

Se requiere realizar la prueba de expansión a la muestra inalterada del suelo para determinar el porcentaje de expansión y la presión de expansión del suelo, para tener un parámetro de referencia a contrastar al implementar las estructuras de concreto permeable en el suelo y medir su efectividad. Dicha prueba se basará en la norma ASTM-D4546 [14]. Se eligió el método B, porque se analizará el suelo bajo la carga de sitio y una sobrecarga.

2.2. Modelo suelo-estructura

a) Dosificación de concreto.

Para la elaboración del concreto, primero se analizará la calidad del agregado pétreo, por lo que se determinará su granulometría [N.CMT.2.02.002/02] [27], peso volumétrico seco compacto [ASTM C 29/C 29M-97][5], densidad y absorción [ASTM C 127 - 01][4]. Se elaborarán

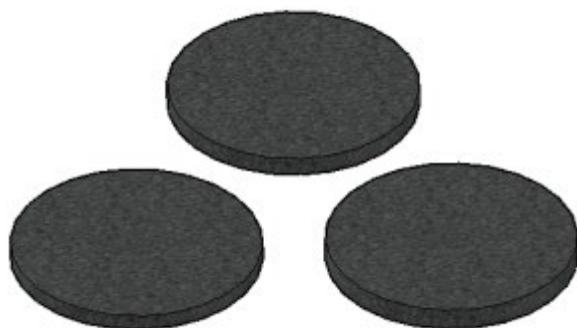
dosificaciones con relación agua/cemento de 0.3, 0.4 y 0.5 para observar cual es la mezcla que posee el mayor porcentaje de vacíos en estado endurecido [ASTM C642-06][6] y emplearla en la preparación de las estructuras de concreto permeable. La dosificación se realizará de acuerdo al apéndice 6, de la guía ACI 211.3R-02 [3].

b) Determinación de las dimensiones de las estructuras de concreto permeable.

Las dimensiones de las estructuras de concreto permeable estarán restringidas por el tamaño del anillo del consolidómetro, el cual posee 2 cm de alto por 8 cm de diámetro aproximadamente. La dimensión fija será el diámetro del anillo, de 8 cm de diámetro y la altura de las estructuras podrá variar dentro de los 2 cm de altura.

Figura 1

Simulación de las estructuras de concreto permeable.



c) Selección de la dosificación de concreto y las dimensiones de las estructuras de concreto permeable.

La dosificación a elegir en esta investigación corresponderá a la mezcla que posea el mayor porcentaje de vacíos en estado endurecido y las dimensiones de las estructuras de concreto permeable serán de 8 cm de diámetro y 5 y 7 mm de altura aproximadamente. Las alturas de las estructuras se seleccionaron de acuerdo a varios ensayos en laboratorio, donde se elaboraron con diferentes tamaño de agregado, donde se tomó en cuenta que dichas estructuras tuvieran el mínimo espesor posible, con el tamaño de agregado más grande y que mantuvieran adherencia entre agregados.

2.3. Análisis experimental

a) Descripción de variables.

Se pretende averiguar que estructura de concreto permeable puede disminuir más el porcentaje de expansión del suelo, donde el porcentaje de vacíos de la estructura es la variable independiente. Las estructuras de concreto se elaboraron con la dosificación que tuvo el mayor porcentaje de vacíos en estado endurecido y se utilizaron espesores de 5 y 7 mm aproximadamente. Cada prueba se repitió al menos 3 veces para cada espesor.

b) Elaboración de estructuras con concreto permeable.

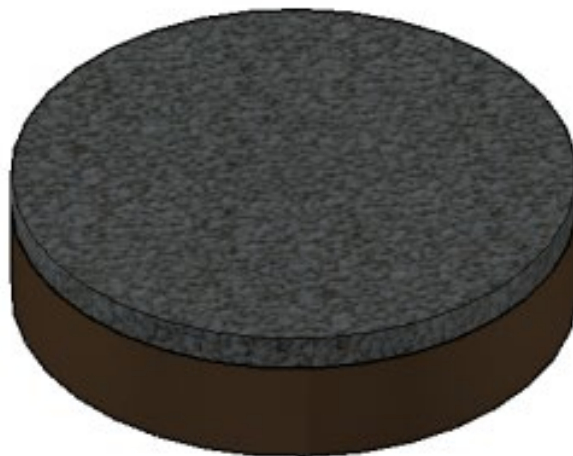
Se elaborarán especímenes cilíndricos con concreto permeable de baja resistencia a la compresión, con la dosificación y dimensiones anteriormente descritas. Dichas dosificaciones se escalarán al volumen requerido para las dimensiones deseadas. El tamaño máximo de agregado será el retenido de la malla N°8

c) Aplicación de las estructuras de concreto permeable.

Una vez elaborados los especímenes, se labrará una muestra de suelo en el anillo del consolidómetro, a las alturas correspondientes, para que en la parte superior sea colocada la estructura de concreto permeable.

Figura 2

Simulación de la pastilla de suelo, con la aplicación de la estructura de concreto permeable en su superficie



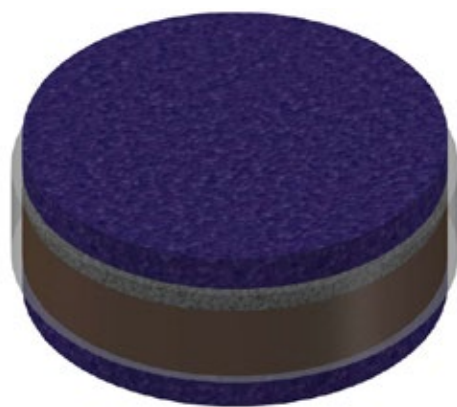
2.4.Experimentación final

a)Pruebas de expansión al suelo con la inclusión de las estructuras de concreto permeable.

Los especímenes de suelo junto con la estructura de concreto permeable colocada en su superficie, se llevarán al consolidómetro, para realizar las pruebas de expansión correspondientes.

Figura 3

Anillo de consolidación con extensiones, muestra de suelo, estructura de concreto permeable y piedras porosas



b)Determinación del comportamiento de disminución de la expansión.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede determinar qué porcentaje de expansión decreció al implementar las estructuras de concreto permeable.

2.5.Análisis de resultados

Se efectuará la comparación de los datos obtenidos en las pruebas iniciales de determinación de los parámetros del suelo y las pruebas de la experimentación final para verificar si se cumplió el objetivo de disminuir la expansión del suelo con la implementación de las estructuras de concreto permeable en su superficie.

3. Resultados y discusión

A continuación, se presentan los resultados de la granulometría vía seca y húmeda del suelo en estado

natural. En la tabla 1 se muestra el porcentaje de suelo que pasa a través de cada malla y en la figura 4 se presenta la curva granulométrica con los datos obtenidos.

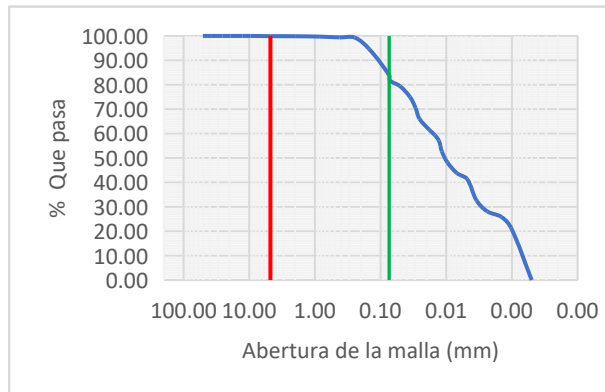
Tabla 1

Granulometría vía seca y húmeda

Malla		Porcentaje que pasa
Denominación	Abertura (mm)	
2"	50.80	100.00
1 1/2 "	38.10	100.00
1 "	25.40	100.00
3/4"	19.10	100.00
1/2"	12.70	100.00
3/8"	9.52	100.00
Nº 4	4.76	99.92
Nº10	2.00	99.88
Nº20	0.84	99.72
Nº40	0.42	99.40
Nº60	0.25	99.38
Nº100	0.149	94.60
Nº200	0.074	83.91
Hidrómetro	0.0715	81.68
	0.0507	79.45
	0.0357	74.98
	0.0293	70.52
	0.0256	66.06
	0.0182	61.59
	0.0149	59.36
	0.0130	57.13
	0.0123	54.90
	0.0117	52.67
	0.0096	48.20
	0.0068	43.74
	0.0048	41.51
	0.0034	32.58
	0.0024	28.12
	0.0015	25.89
	0.0010	21.42

Figura 4

Curva granulométrica vía seca y húmeda del suelo



En la tabla 2 se exponen los resultados de las propiedades medidas en la caracterización geotécnica del suelo, como límites de plasticidad por el método de la copa de Casagrande, humedad natural del suelo, peso específico relativo de sólidos y peso específico por inmersión en agua.

Tabla 2

Propiedades geotécnicas del suelo

Límite líquido [%]	76.39
Límite plástico [%]	38.50
Índice plástico [%]	37.89
Límite de contracción volumétrica [%]	22.7
Límite de contracción lineal [%]	19.97
Humedad natural del suelo [%]	34.46
Peso específico relativo de los sólidos	2.48
Peso específico [g/cm³]	1.50

Tabla 3

Granulometría del agregado pétreo

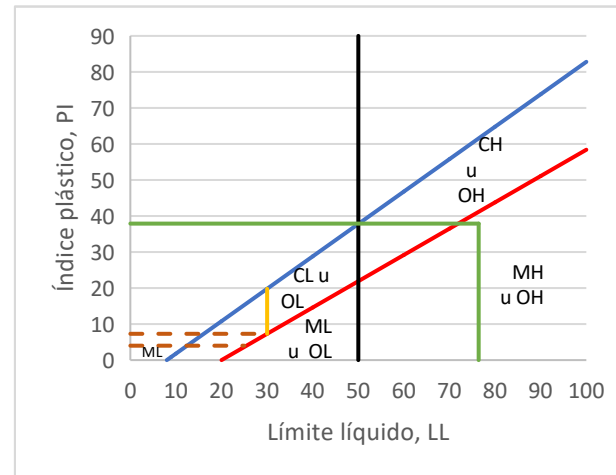
Denominación	Abertura (mm)	Porcentaje retenido acumulado	Porcentaje que pasa
1/2"	12.7	0.07%	99.93%
3/8"	9.5	1.16%	98.84%
1/4"	6.35	67.07%	32.93%
Nº 4	4.75	95.25%	4.75%
Nº 8	2.36	98.34%	1.66%
Nº 16	1.18	98.77%	1.23%
Nº 30	0.6	98.94%	1.06%
Nº 50	0.3	99.00%	1.00%
Nº 100	0.15	99.11%	0.89%
Pasa Nº100	0.074	100.00%	0.00%

3.1. Clasificación del suelo

De acuerdo a la carta de plasticidad, la clasificación del suelo corresponde a un limo inorgánico de alta compresibilidad o alta plasticidad (MH), como se observa en la figura 5.

Figura 5

Carta de plasticidad

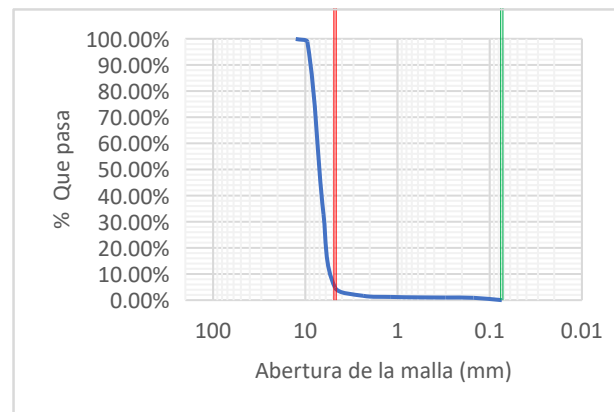


3.2. Resultados del agregado pétreo

A continuación, se exponen los resultados del agregado pétreo que se empleará en la fabricación del concreto permeable. En la tabla 3 se muestran los resultados de la granulometría vía seca del agregado y en la figura 6 se presenta la curva granulométrica con los datos obtenidos.

Figura 6

Curva granulométrica del agregado pétreo



En la tabla 4 se exponen los resultados de la caracterización del agregado pétreo.

Tabla 4

Propiedades geotécnicas del agregado pétreo

Parámetro	Valor
Peso volumétrico seco compacto (PVSC) (kg/m ³)	1588.11
Densidad aparente (g/cm ³)	2.65
Densidad aparente (saturada y superficialmente seca) (g/cm ³)	2.71
Densidad nominal (g/cm ³)	2.81
Absorción (%)	2.09
D ₁₀	5.4
D ₃₀	6.2
D ₆₀	7.5
Coefficiente de uniformidad (C _u)	1.389
Coefficiente de curvatura (C _c)	0.949
Clasificación del agregado pétreo	Grava mal graduada (GP)

En la tabla 5 se presentan las dosificaciones de concreto permeable que se utilizaron, donde se especifica la cantidad de cemento, agua y agregado pétreo que se emplearon, de acuerdo a la relación agua/cemento de 0.3, 0.4 y 0.5 respectivamente, para producir 1 m³ de concreto.

Tabla 5

Dosificaciones de concreto

A/C	Cemento (kg)	Agua (L)	Agregado (kg)
0.3	407.99	122.40	1604.80
0.4	351.13	140.45	1604.80
0.5	308.17	154.09	1604.80

En la figuras 7, 8 y 9 se pueden apreciar las diferentes mezclas de concreto permeable en estado fresco, acorde a las dosificaciones correspondientes, con las diferentes relaciones agua/cemento empleadas.

Fig. 7

Mezcla de concreto en estado fresco (A/C=0.3)



Fig. 8

Mezcla de concreto en estado fresco (A/C=0.4)



Fig. 9

Mezcla de concreto en estado fresco (A/C=0.5)



En la figura 10 se muestran los cilindros elaborados con las dosificaciones de concreto permeable, con las relaciones agua/cemento de 0.3, 0.4 y 0.5 respectivamente.

Fig. 10

Cilindros de concreto, A/C= 0.3, 0.4 y 0.5 (de izquierda a derecha)



En la tabla 6 se presentan los datos de la absorción, la densidad, los porcentajes de vacíos o el volumen de poros huecos y la resistencia a la compresión de los cilindros elaborados con las relaciones agua/cemento de 0.3, 0.4 y 0.5 respectivamente.

Tabla 6

Absorción, densidad, porcentaje de vacíos y resistencia a la compresión de las estructuras de concreto permeable

Parámetro	Relación A/C = 0.3	Relación A/C = 0.4	Relación A/C = 0.5
Absorción después de inmersión [%]	7.41	7.66	7.80
Absorción después de inmersión y hervido [%]	8.00	8.37	8.80
Densidad seca	2.27	2.23	2.20
Densidad después de inmersión	2.44	2.40	2.37
Densidad después de inmersión y hervido	2.45	2.42	2.39
Densidad aparente	2.77	2.74	2.72
Volumen de poros permeables [vacíos] [%]	18.14	18.66	19.33
f' c [kgf/cm²]	87.37	105.46	72.49

En las figuras 11 y 12, se muestran las estructuras de concreto permeable, elaboradas con la relación agua/cemento de 0.4. La figura 11 corresponde a la estructura de concreto permeable 1 y la figura 12 a la estructura de concreto permeable 2.

Fig. 11

Estructura de concreto permeable 1



Fig. 12

Estructura de concreto permeable 2



Las pruebas de expansión se realizaron con suelo en estado remoldeado, a una humedad promedio de 23.85%, recreando el peso específico natural del suelo (1.50 g/cm³), aplicando una carga de sitio de 3.3 T/m² y una sobrecarga de 1.5 T/m² (carga que simula el peso de una construcción).

En la tabla 7 se presenta el porcentaje de expansión del suelo natural y del suelo con la incorporación de las estructuras de concreto permeable de 5 y 7 mm de altura.

Tabla 7
Porcentaje de expansión

Ensayo	Expansión [%]
Suelo natural	3.44
Suelo con estructura de concreto permeable de 5 mm de altura	0.78
Suelo con estructura de concreto permeable de 7 mm de altura	0.53

En la tabla 8 se muestra la presión de expansión del suelo natural y del suelo con la incorporación de las estructuras de concreto permeable de 5 y 7 mm de altura.

Tabla 8
Presión de expansión

Ensayo	Presión de expansión [T/m ²]
Suelo natural	14.23
Suelo con estructura de concreto permeable de 5 mm de altura	11.53
Suelo con estructura de concreto permeable de 7 mm de altura	12.79

En las figuras 13, 14 y 15 se presentan las curvas de compresibilidad del suelo natural, del suelo con la estructura de concreto permeable de 5 mm de altura y del suelo con la estructura de concreto permeable de 7 mm altura, respectivamente. La línea roja representa la presión de expansión.

Fig. 13
Curva de compresibilidad del suelo natural remoldeado con carga de sitio y sobrecarga

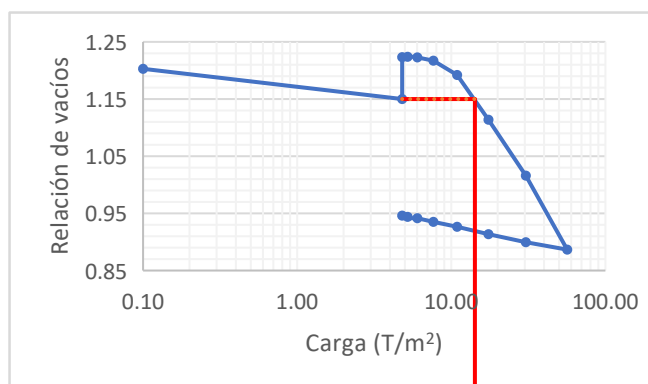


Fig. 14
Curva de compresibilidad del suelo remoldeado con la inclusión de la estructura de concreto permeable de 5 mm de altura, con carga de sitio y sobrecarga

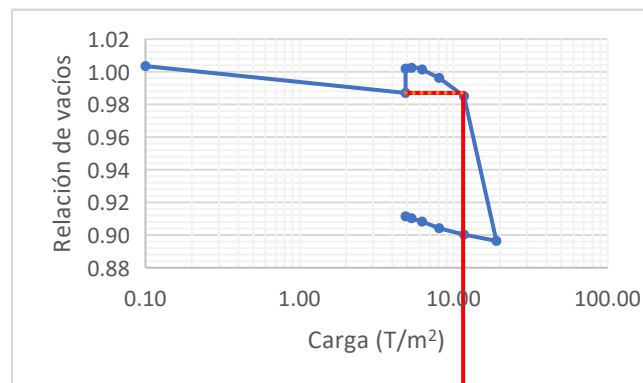
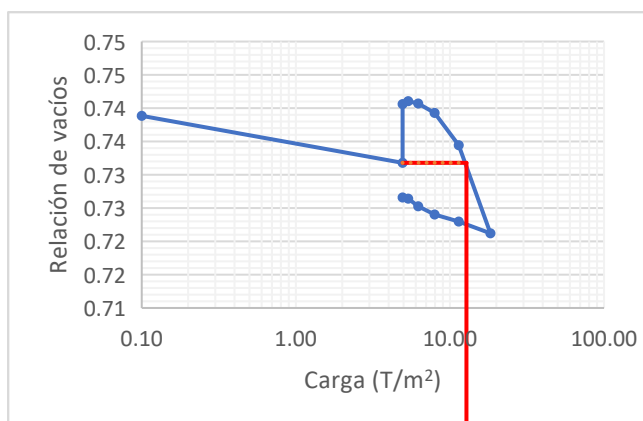


Fig. 15
Curva de compresibilidad del suelo remoldeado con la inclusión de la estructura de concreto permeable de 7 mm de altura, con carga de sitio y sobrecarga



De acuerdo a la granulometría del suelo, el 83.91% de la muestra pasa a través de la malla N°200, por lo que se considera que el suelo es fino. El límite líquido fue de 76.39%, el límite plástico de 38.50% y el índice plástico de 37.89%, y su clasificación, de acuerdo a la carta de plasticidad, fue como un limo inorgánico de alta compresibilidad o alta plasticidad (MH). El contenido de agua del suelo natural fue de 34.46%, el peso específico de la muestra fue de 1.50 g/cm³, el peso específico seco fue de 1.11 g/cm³ y el peso relativo de los sólidos fue de 2.48.

El agregado pétreo tuvo una clasificación como grava mal graduada, con un peso volumétrico seco

compacto de 1588.11 kg/m^3 , una densidad aparente de 2.71 kg/m^3 , una densidad nominal de 2.81 kg/m^3 y una absorción de 2.07. Con dichos datos se dosificaron 3 mezclas de concreto, con relación agua/cemento de 0.3, 0.4 y 0.5 respectivamente.

Dichas mezclas se emplearon en la fabricación de cilindros de concreto de 7.25 cm de diámetro por 14.5 cm de altura aproximadamente.

Se evaluó el porcentaje de vacíos en estado endurecido de dichos cilindros.

La mezcla con relación agua/cemento de 0.3 arrojó un volumen de vacíos de 18.14%, la mezcla A/C= 0.4, 18.66% y la mezcla A/C= 0.5, 19.33%. Sin embargo, aunque la mezcla A/C= 0.5 obtuvo el mayor porcentaje de vacíos, se presentó segregación del concreto al fondo del cilindro, por lo que se optó por emplear la mezcla A/C= 0.4.

Con la mezcla A/C= 0.4 se elaboraron las estructuras de concreto permeable, con diámetro promedio de 7.373 cm y altura de 0.488 cm y otra con diámetro promedio de 7.603 cm y altura de 0.726 cm.

La prueba del porcentaje de expansión se realizó con una humedad promedio de 23.85%, con suelo remoldeado. La muestra de suelo se obtuvo en el mes de noviembre de 2020. Dicha humedad conduce a un grado de saturación (Gw) de aproximadamente el 75%, representando un valor alto. Sin embargo, según el Reporte del clima en México (CONAGUA, 2020), el valor más bajo de precipitación se obtuvo en el mes de diciembre, con una lámina de 1.3 mm, seguida del mes de noviembre, con una lámina de 6.6 mm. Considerando lo anterior, se puede asumir que el suelo en el mes de noviembre se encontraba en sus niveles de humedad más bajos, pero aún podría disminuir más en diciembre, por lo que se optó por reproducir especímenes a una humedad de 23.85% aproximadamente, que corresponde al contenido de agua 5% menor que la humedad óptima del suelo, pues analizando la curva de compactación Proctor, se observó que dicha humedad posee un peso volumétrico seco similar al que se obtuvo con la humedad de campo.

Conclusión

Las estructuras de concreto permeable aplicadas sobre el suelo expansivo ensayado abaten la expansión debido a que el suelo se aloja dentro de los huecos de dicha estructura.

La estructura de concreto permeable de 5 mm de altura puede abatir el 77.33% de la expansión del suelo utilizando solo el 79.11% de los huecos disponibles en la estructura, mientras que la estructura de 7 mm de altura, puede abatir hasta el 84.59% de la expansión del suelo utilizando solo el 52% de los huecos disponibles. Lo anterior concluye que probablemente algunos huecos no se conectan por lo que se restringe el acceso del suelo. Se puede suponer que, si la estructura estuviera conectada en la totalidad de los huecos, el abatimiento de expansión sería total.

Se puede concluir que la aplicación de dichas estructuras reduce la expansión del suelo, dependiendo del volumen de huecos que tengan disponibles y conectados.

Además, las estructuras de concreto permeable tienen la capacidad de absorber agua, debido a las características del agregado pétreo y el cemento que se utilice en su fabricación, lo que contribuye a la disminución de expansión también.

Las estructuras de concreto permeable se diseñaron con un porcentaje de vacíos del 20%, sin embargo, es posible emplear dosificaciones hasta del 30% o superiores (ACI-211.3R-02, 2002), lo que permitiría reducir aún más el valor de la expansión del suelo.

Trasladando estos resultados a campo, se pueden elaborar placas de agregados pétreos prefabricados, de distintas dimensiones y volumen de huecos. Dichas placas se diseñarían con diferentes dosificaciones, dependiendo de las características del suelo sobre el que se van a colocar.

Por lo anterior esta nueva propuesta puede resolver el problema de la expansión del suelo sin tener que extraer el suelo y sin tener que colocar cimentaciones especiales, lo que contribuye a la sustentabilidad de este

tipo de materiales y a la disminución de costos para el tratamiento de dichos suelos.

Agradecimientos

Se efectúa un agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por haber provisto los fondos para llevar a cabo esta investigación. Se reconoce también a la Universidad Autónoma de Querétaro por el apoyo en la realización de este artículo.

Referencias bibliográficas

- [1] Abd El Halim, A.A. and El Baroudy A.A. 2014. Influence addition of Fine Sawdust on the Physical Properties of Expansive Soil in the Middle Nile Delta, Egypt. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2014, 483-490
- [2] Abu-Zreig M.M., Al-Akhras, N.M. y Attom M.F. 2001. Influence of heat treatment on the behavior of clayey soils, *Applied Clay Science* 20: 129-135.
- [3] ACI 211.3R-02 Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete. ACI Committee 211. Michael J. Boyle. January 11, 2002
- [4] American Society for Testing and Materials, Norma C 127, Volumen 04.02, 2003.
- [5] ASTM C 29/C 29M-97, Standard Test Method for Bulk density [“Unit Weight”] and Voids in Aggregate, Vol 04.02 American Standards of Testing of Materials, Edition 2003.
- [6] ASTM C642-06, Standard Test Method for Density, Absorption, and Avoirs in Hardened Concrete. ASTM Interntaional, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- [7] ASTM-D420. 1993. Standard Guide to Site Characterization for Engineering, Design, and Construction Purpose. Annual Book of ASTM Standards: Soil and Rock. p. 1-7. ASTM International, Philadelphia, EUA.
- [8] ASTM-D422. 1990. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of soils. Annual Book of ASTM Standards: Soil and Rock. p. 10-16. ASTM International, Philadelphia, EUA.
- [9] ASTM-D854. 1992. Standard Test Method for Specific Gravity of Soils. Annual Book of ASTM Standards: Soil and Rock. p. 80-83. ASTM International, Philadelphia, EUA.
- [10] ASTM-D2216. 1992. Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock. Annual Book of ASTM Standards: Soil and Rock. p. 177-180. ASTM International, Philadelphia, EUA.
- [11] ASTM-D2487. 1993. Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). Annual Book of ASTM Standards: Soil and Rock. p. 206-216. ASTM International, Philadelphia, EUA.
- [12] ASTM-D4318. 1993. Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. Annual Book of ASTM Standards: Soil and Rock. p. 551-561. ASTM International, Philadelphia, EUA.
- [13] ASTM-D4531. 1992. Standard Test Method for Bulk Density of Peat and Peat Products. Annual Book of ASTM Standards: Soil and Rock. p. 676-677. ASTM International, Philadelphia, EUA.
- [14] ASTM-D4546. 1990. Standard Test Method for One-Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils. Annual Book of ASTM Standards: Soil and Rock. p. 693-699. ASTM International, Philadelphia, EUA.
- [15] Das, Braja M, 2015, Fundamentos de ingeniería geotécnica, Cengage Learning, cuarta edición
- [16] FAO [Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación] 2008. Base referencial mundial del recurso suelo. Informes sobre recursos mundiales de suelos 103.
- [17] Flórez, C.H., Zarate, R., Caicedo, Z.K. y Contreras, B.A. 2008. Estabilización química de suelos expansivos de San José de Cúcuta (Colombia) usando cenizas volantes.
- [18] Jones, D. E., and Holtz, W. G. 1973. Expansive soils-the hidden disaster. *Civil Eng., ASCE* 43(8):49-51.
- [19] Juárez, E., & Rico, A. 2005. “Mecánica de suelos Tomo 1”, [3ª ed.]. México, México: Limusa.
- [20] López-Lara T., Hernández-Zaragoza J.B., Horta-Rangel J., Coronado-Márquez A. Castaño-

- Meneses V.M. 2010. Polímeros para la estabilización volumétrica de arcillas expansivas, Revista Iberoamericana de Polímeros.
- [21] López-Lara, T., J. Hernández-Zaragoza, J. Horta-Rangel, N.P. Rodríguez-Morales, y C.A. Bimbela-Osuna. 2014. Análisis de estructuras huecas invertidas colocadas sobre suelos expansivos. XXVII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, Puerto Vallarta, Jalisco, México.
- [22] N.CMT.2.02.002/02, Calidad de agregados pétreos para concreto hidráulico. Libro: CMT.Características de los materiales. Parte: 2. Materiales para estructuras. Título: 02. Materiales para concreto hidráulico
- [23] Rodríguez, J.C. 2018. Abatimiento de la expansión mediante la modificación de suelos y aplicación de carga. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Querétaro.
- [24] Rodríguez, N.P. 2015. Uso de estructuras porosas para abatir la expansión de arcillas. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Querétaro.
- [25] Viswanadham B.V.S., Phanikumar B.R. y Mukherjee R.V. 2009. Swelling behavior of a geofiber-reinforced expansive soil, Geotextiles and Geomembranes. Vol. 27 (2009).





PROCESO PARA LA REALIZACIÓN DE UNA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA EN INVESTIGACIONES CLÍNICAS

PROCESS FOR THE DEVELOPMENT OF A LITERATURE REVIEW IN CLINICAL STUDIES

Hernández-Muñoz Adrián Enrique¹, Rangel-Alvarado Miguel Ángel Alexandro¹, Torres-García Lenin¹, Hernández-Martínez Gustavo², Castillo-Ixta Pierre Kalid², Olivares-Moreno Leticia Lizzet², Sánchez-Morales Andrea Guadalupe²

¹ Profesor adscrito a la Facultad de Medicina, Universidad Autónoma de Querétaro.

² Estudiante adscrito a la Facultad de Medicina, Universidad Autónoma de Querétaro.

* Autor de correspondencia, correo: maarangel@hotmail.com

Resumen

Introducción: Una Revisión Bibliográfica (RB) se define como el proceso metodológico para recuperar la información de investigaciones originales, con el fin de identificar el estado actual del conocimiento acerca de un tema específico. Este proceso permite la construcción de marcos teóricos para investigaciones clínicas y la generación de artículos de revisión. Ante ello, el objetivo del presente documento fue describir las etapas para llevar a cabo un proceso de RB.

Metodología: Se realizó un artículo de revisión narrativa, generando una búsqueda bibliográfica que contemplara manuscritos que describieran los procesos de una RB en investigaciones cuantitativas. Se excluyeron artículos que describieran los procesos de una RB aplicados a los Metaanálisis, o para revisiones de índole cualitativa.

Resultados: La RB se compone de cinco etapas que inician con la generación de una pregunta de revisión, seguido por la identificación de las fuentes de información, la utilización de criterios de selección, así como estrategias de búsqueda. Posteriormente, se clasifica y se agrupa la información encontrada en matrices de sistematización.

Conclusión: Una adecuada y ordenada RB tendrá como resultado una revisión sistemática organizada, con fundamentos suficientes para la redacción de argumentos estructurados y que tengan relevancia para nuevas investigaciones clínicas y médicas.

Palabras clave (DeCS): *revisión; revisión bibliográfica; revisión sistemática; investigación; investigaciones clínicas.*

Abstract

Introduction: A Literature Review (LR) is defined as the methodological process to retrieve information from original studies, in order to identify the current state of knowledge about a particular topic. This process allows the construction of theoretical frameworks for clinical studies and the generation of review articles. Given this, the objective of this document was to describe the stages to carry out a BR process.

Methodology: A narrative review article was carried out, generating a bibliographic search that included manuscripts that described the processes of a BR in quantitative research. Articles describing the processes of a BR applied to meta-analyses or for qualitative reviews were excluded.

Results: The BR consists of five stages that begin with the generation of a review question, followed by the identification of information sources, the use of selection criteria, as well as search strategies. Subsequently, the information found is classified and grouped in systematization matrices.

Conclusion: An adequate and orderly LR will result in an organized systematic review, with sufficient foundations for the writing of structured arguments that are relevant for future medical and clinical studies.

Keywords (MeSH): *review; literature review; systematic review; research; clinical studies*

1. Introducción

“Si no existe una investigación previa entonces nuestros análisis son meramente descriptivos y fácilmente pueden convertirse en erróneas especulaciones [...] El objetivo es desarrollar teorías que nos permitan ir más allá de una errónea y a veces excéntrica interpretación del mundo y llegar a un marco común que pueda servirnos hacia opiniones y debates más correctos”.

Doctor Alan Sears (2004). *A good book, In theory*.

La investigación es un proceso que surge cuando un observador se plantea un problema o una pregunta específica, la cual por medio de marcos teóricos y metodológicos genera objetivos para describir, comprender y analizar un problema de interés (Vizmanos-Lamotte *et al.*, 2009). No obstante, el proceso para plantear esta pregunta de investigación radica en delimitar correctamente una *idea preliminar*, fundamentada no solo en argumentos teóricos, sino además en cuestiones metodológicas específicas (Cabrejos-Díaz, 2015).

Para poder afinar esta *idea preliminar*, el investigador debe de realizar un proceso que le brinde una visión específica y amplia del conocimiento, así como el estado actual de este mismo sobre un tema que le interese. Todo esto con el fin de que, con la información encontrada, se generen bases teóricas para el planteamiento y la metodología de una investigación (Vizmanos-Lamotte *et al.*, 2009). A este proceso de identificación, selección y extracción de la información se le conoce como revisión bibliográfica.

De acuerdo con lo anterior, una Revisión Bibliográfica (RB) se define como un proceso de investigación documental que, a diferencia de otros diseños que trabajan sobre pacientes, analiza los

datos recogidos de investigaciones y publicaciones originales (Argimón-Pallas y Jiménez-Villa, 2019). Consiste en la identificación y recolección de la evidencia científica más reciente y actualizada sobre un área determinada, logrado por un proceso específico de búsqueda, seguido de la agrupación y extracción de la información (Goris, 2015).

Por lo tanto, en términos generales una RB consiste en responder una idea de investigación clínica, valorando la información disponible de investigaciones ya publicadas. Por medio de un procedimiento de búsqueda, se identificará lo que se ha publicado sobre un área, se reconocerá si la investigación que desea plantear ya ha sido realizada previamente, y se encontrarán las evidencias más actuales sobre las cuales se puede centrar nuevas investigaciones clínicas (Arrimón-Pallas y Jiménez-Villa, 2019; Boote y Beile, 2005).

Asimismo, las ventajas de realizar una RB es que el investigador interesado pueda tamizar la información encontrada, sin generar búsquedas con múltiples resultados sobre un solo tema. Esto último puede suceder debido a que el conocimiento clínico se genera diariamente y si se considera la existencia de más 30, 000 manuscritos enviados a revistas médicas al año, hay una probabilidad de que si el investigador no tiene una técnica de búsqueda adecuada no podrá identificar cuáles son los estudios más adecuados para su proyecto, y no podrá generar como tal conclusiones correctas para sus proyectos de investigación (Araujo-Alonso, 2011; Centro Cochrane Iberoamericano, 2011).

Por ello mismo, para poder realizar adecuadamente una RB es necesario conocer sus principales etapas, desde la definición de un objetivo de búsqueda, hasta identificar la información en diferentes fuentes de información, y saber cómo se puede sintetizar la

información de los artículos recuperados [Boote y Beile, 2005; Mays y Pope, 2005; Robles-Silva, 2015; Sheldon, 2005]. Considerando lo anterior, el objetivo del presente documento es describir las etapas que existen para llevar a cabo un proceso de RB adecuado, sobre todo en las investigaciones clínicas.

2. Metodología

Para cumplir los objetivos del artículo se procedió a realizar una búsqueda intencionada en el índice multidisciplinario PubMed, así como en bases de datos latinoamericanas como Scielo y Redalyc. Igualmente, se consultaron motores de búsqueda como Google Académico, al igual que directorios académicos tales como Dialnet, Latindex e Imbiomed. El proceso de identificación de la información se llevó a cabo de la siguiente manera: se realizó una recopilación de la evidencia acerca de los procesos para realizar una RB.

Se utilizaron las siguientes palabras clave: *Literature Review* (Revisión Literaria/Bibliográfica), *Review Article* (Artículos de revisión), *Systematic Review* (Revisiones Sistemáticas), *Clinical Studies* (Investigaciones Clínicas) tanto en tesauros como en motores de búsqueda. Asimismo, se realizaron combinaciones por medio de conectores booleanos AND y OR, considerándose documentos de revisión del área clínica y capítulos de libros. No obstante, no se realizó ningún proceso de tamizaje o selección específica de la información, dada la naturaleza metodológica del manuscrito.

Sin embargo, si se excluyeron aquellas investigaciones de Ciencias de la Salud de índoles cualitativas, socio médicas o psicosociales. Y, con la información encontrada, se redactó un documento de revisión narrativo basado en el marco metodológico propuesto por Grant y Booth. La razón de esto último, es porque este tipo de revisiones poseen un

estilo de redacción basado en el discurso, sin buscar cuantificar la información sino exponerla como tal [Grant y Booth, 2009].

3. Resultados

Etapas para la realización de una RB

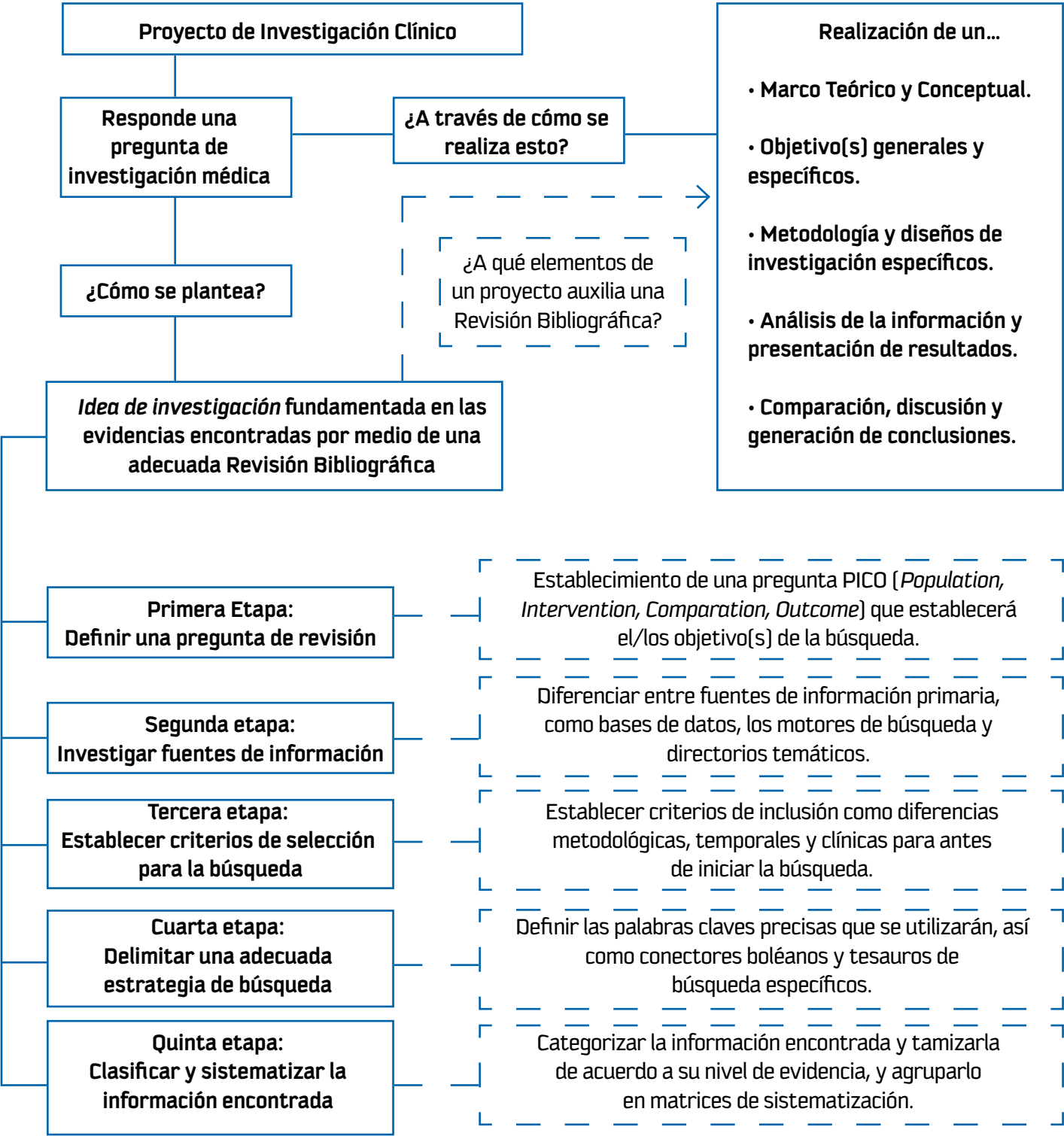
Cómo se mencionó previamente, el procedimiento para llevar a cabo una RB es similar al de cualquier investigación: la resolución de una pregunta por medio de la generación de objetivos, la identificación de la población que se desea estudiar y, finalmente, la interpretación de los resultados encontrados [Argimon-Pallás y Jiménez-Villa, 2019; Hernández-Sampieri, Fernández-Collado y Baptista-Lucio, 2006].

Con esto en mente, a lo largo de los años se han desarrollado guías y métodos de estrategia que destacan el desarrollo de esquemas metodológicos para una correcta búsqueda de la información [Manterola y Otzen, 2014]. Ejemplo de ello son las directrices de la Declaración PRISMA y de la Colaboración Cochrane [Centro Cochrane Iberoamericano, 2011; Salinas, 2020], las cuales señalan las distintas formas en que se realizan procesos de búsqueda de la información tanto en una RB, como en Revisiones Sistemáticas de la literatura y Metaanálisis [Goris, 2015; Sears, 2005; Robles-Silva, 2015].

Por otro lado, a pesar de que existen diferentes propuestas para realizar una RB, una forma sencilla consiste en la realización de cinco etapas (Ver Diagrama de Flujo 1). Iniciando con una pregunta de revisión específica, se continúa con la identificación de fuentes para la obtención de la información, así como la determinación de criterios específicos de selección y estrategias de búsqueda precisas. Finalmente, se clasificará la información encontrada de acuerdo a su diseño metodológico, extrayéndose en matrices de sistematización con el fin de tener un acceso más fácil a la información encontrada [Argimón-Pallás y Jiménez-Villa, 2019].

Diagrama de Flujo 1

Diagrama de flujo para la realización de las etapas de una RB*



* RB: Revisión Bibliográfica

Diagrama de flujo realizado por los autores del manuscrito

3.1.Primer etapa: definir una pregunta de revisión

El primer paso consiste en la definición de un objetivo o pregunta de revisión, pues genera las necesidades de información que guiarán la RB. Para ello, es necesario contestar las siguientes cuestiones: ¿Cuál es la población de artículos que se va a recuperar y cual circunstancia clínica deberán estar estudiando para así ser incluidos? ¿Cuáles serán los diseños de investigación que deben de tener las investigaciones seleccionadas? ¿Se considerará un valor de comparación? y, ¿Cuál sería la variable respuesta que se esperaría encontrar? [Argimón-Pallás, y Jiménez-Villa, 2019; Cuello-García, y Pérez-Axiola, 2015].

Estas cuestiones generan la base de la pregunta PICO (*Population, Intervention, Comparison, Outcome*) que igualmente es utilizada en Revisiones Sistemáticas y Metaanálisis. El objetivo del esquema **PICO** es definir, lo más precisamente posible, la situación clínica, daño etiológico o prueba diagnóstica que se quiere revisar [Martín-Zurro, y Cano-Pérez, 2008]. No obstante, la opción de *Comparación* -La cual contrasta los resultados de las investigaciones contra otros estudios- puede ser opcional sobre todo cuando no se están revisando y recuperando estudios de índole experimental [Cuello-García, y Pérez-Axiola, 2015; Cardona-Arias, Higuita-Gutiérrez y Ríos-Osorio, 2016].

3.2.Segunda etapa: identificar las fuentes de información

Al haber finalizado la identificación del objetivo de referencia, se iniciará la localización de los estudios existentes del tema en las diferentes fuentes de información. La implementación del acceso abierto a la información ha permitido que la mayor parte de investigadores prefieran más una búsqueda de datos en revistas de acceso abierto, bases de datos, motores de búsqueda o en directorios temáticos [Castrillón-Estrada *et al.*, 2008]. Teniendo en cuenta la importancia de la búsqueda electrónica, es esencial que un investigador conozca la diferencia entre estas fuentes primarias [Ver Tabla 1].

Tabla 1
Diferentes ejemplos de fuentes de información electrónicas utilizadas en una RB

Bases de datos	Motores de búsqueda	Directores temáticos
• Scopus.	• Google Académico.	• Latindex.
• Embase.	• Scirus.	• Imbiomed.
• MEDLINE.	• Highwire Press.	• Ulrich.
• OVID.	• MD Consult.	
• EBSCO.		
• CINAHL.		
• Scielo.		
• Lilacs.		

Con respecto a las bases de datos, las más utilizadas dentro del área de la salud son Scopus, Embase y MEDLINE [Barrios *et al.*, 2017]. Scopus es la base de datos más amplia en literatura arbitrada, Embase abarca publicaciones biomédicas y MEDLINE, con su interfaz PubMed, incluye investigaciones de varios campos de la salud [Goossen *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2019].

Otras bases de datos son OVID, EBSCO, Scielo y LILACS [Justesen, *et al.*, 2021], y cada una de ellas ofrece la ventaja de recopilar la información encontrada por medio de motores de búsqueda internos con tesauros de búsqueda integrados, logrando así una recuperación más precisa de la información [Universidad de Chile, 2017].

Una alternativa al uso de bases de datos serían los motores de búsqueda; definidos como plataformas gratuitas de recuperación de la información tales como Google Académico [Google Scholar], Scirus,

Highwire Press y MD Consult [Justesen et al., 2021]. Finalmente, los directorios temáticos consisten en una lista de la información por orden cronológico, geográfico y temático, categorizada en árboles jerárquicos. Algunos de los directorios temáticos más utilizados son Latindex, Imbiomed y Ulrich [Castrillón-Estrada *et al.*, 2008].

3.3. Tercera etapa: establecer criterios de selección para la búsqueda

Habiendo identificado las fuentes de obtención de la información, el siguiente paso es la definición de los criterios de selección. Este paso debe realizarse por medio de criterios explícitos y claros, de tal forma que el proceso sea reproducible por otros investigadores [Argimón-Pallás y Jiménez-Villa, 2019]. Una manera sencilla es considerar criterios metodológicos y temporales específicos, así como la selección de investigaciones con un tamaño muestral mínimo – Sobre todo con el fin de excluir estudios con muestras pequeñas.

Al hablar de criterios de selección específicos, estamos generando un proceso similar a la pregunta PICO, donde se definen los artículos que se elegirán e incluirán en la RB. A fin de saber qué población es la más adecuada para nuestra revisión, es esencial definir aspectos metodológicos de las investigaciones tales como el tamaño muestral que utilizaron, la duración del estudio e incluso el contexto temporal en el que fueron realizados [Castrillón-Estrada *et al.*, 2008; Institute TJB, 2015]. Este último se define como el periodo temporal de cuando se iniciaron las publicaciones sobre un tema específico, o cuando dejaron de hacerse sobre este mismo.

Un ejemplo de lo anterior es la Revisión Panorámica [*Scoping Review*] que realizaron Kimbell y Murray para identificar cuáles habían sido las investigaciones cualitativas que estudiaron la experiencia de vida de pacientes con enfermedad hepática avanzada [Kimbell y Murray, 2013]. Ambos autores consideraron que el límite temporal para la selección de su revisión serían artículos publicados de 1990 hasta el año 2013, ya que previo a dicho periodo no se había explorado la experiencia del enfermo con daño hepático desde enfoques fenomenológicos.

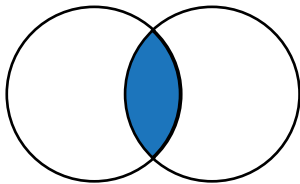
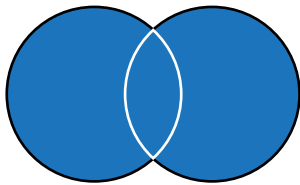
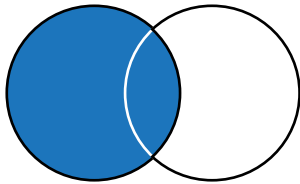
3.4. Cuarta etapa: delimitar una adecuada estrategia de búsqueda

Después de identificar las fuentes de información que se consultarán para la RB, así como los criterios de selección a considerar, es necesario que el siguiente paso consista en establecer una estrategia de búsqueda para limitar el número de investigaciones recuperadas. Esto se puede lograr por medio de palabras clave [*Keywords*], que permitan encontrar resultados más precisos, y reduzcan el número de trabajos irrelevantes o inadecuados a la RB [Hevia *et al.*, 2017; Rumsey, 2008].

De igual forma, la utilización de un tesoro de búsqueda como herramienta de control del vocabulario –Tal como el tesoro MeSH de PubMed o DeCS para bases de datos latinoamericanas– elimina las probabilidades de sinonimias o errores ortográficos resultantes de una mala redacción de las palabras clave [Barrios *et al.*, 2017]. Igualmente, y con el fin de hacer una búsqueda más exclusiva, el uso de conectores booleanos tales como AND/OR/NOT (Ver Tabla 2), permiten establecer relaciones entre dos o más términos [Pinillo León y Cañedo Andalia, 2005].

Tabla 2

Definiciones de los conectores boléanos y sus aplicaciones con palabras clave

Operador Boléano	Descripción	Esquema
AND*	Es un punto de intersección entre dos o más palabras clave, pues reduce y especifica la búsqueda	
OR**	Conector boléano que contempla no solo la intersección de las palabras claves, sino estas también.	
NOT***	Conector boléano que contempla una o varias palabras clave, pero excluye otras	

*AND: Y, **OR: O, ***NOT: NO

Posteriormente, es recomendable que se realice un registro de las combinaciones realizadas y de las investigaciones encontradas en hojas de cálculo realizadas por el mismo investigador (Pinillo León y Cañedo Andalia, 2005; Rumsey, 2008). Esto último evita la generación de sesgos, como aquellos que surgen al recuperar investigaciones que ya se habían encontrado previamente. Ante ello, se recomienda el uso de flujogramas para una correcta elección e inclusión de la información (Cardona-Arias et al., 2016).

3.5. Quinta etapa: clasificar y sistematizar la información encontrada

Una vez que se localizaron y seleccionaron los artículos e investigaciones, es necesario extraer y ordenar su información para que pueda ser leída e interpretada con facilidad (Centro Cochrane Iberoamericano, 2011).

Esta última etapa es fundamental, ya que consiste en organizar de manera sistemática la evidencia encontrada; sin embargo, antes de ello es necesario clasificar y tamizar la información de acuerdo a su diseño de investigación (Cuello-García, y Pérez-Gaxiola, 2015).

De acuerdo con su diseño metodológico, los resultados de cada observación se pueden clasificar según su nivel evidencia (Ver Diagrama de Flujo 2). La evidencia es alta si su diseño es experimental o de documentación, así como baja si se contemplan diseños observacionales (Cuello-García, y Pérez-Gaxiola, 2015; Kapoor, 2016). Hay otras escalas como la Clasificación Escocesa de los Niveles y Grados de Recomendación de la Evidencia (SIGN Classification) que clasifica numérica y alfabéticamente de mayor a menor la información recogida (Martín-Zurro y Cano Pérez, 2008).

Diagrama de Flujo 2

Clasificación de los diseños de investigación de acuerdo a su nivel de evidencia

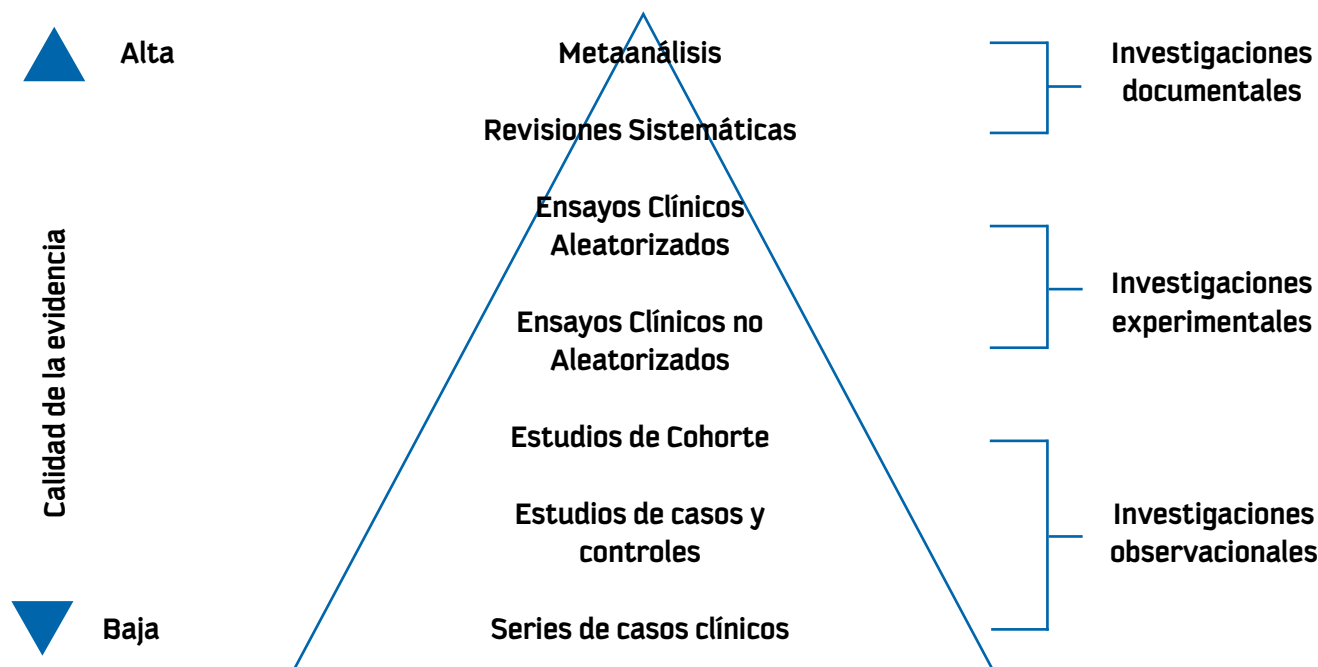


Diagrama de flujo realizado por los autores del manuscrito

Después de haber clasificado las investigaciones de acuerdo a su nivel de evidencia, se debe extraer la información que presentan y sistematizar sus resultados. Para ello se sugiere la realización de tablas o matrices de sistematización en procesadores de texto o en hojas de cálculo, las cuales presenten una estructura segmentada de la información con el fin de extraer los puntos clave de cada una de las investigaciones realizadas (Argimón-Pallás y Jiménez-Villa, 2019; Gómez-Luna et al., 2014).

Se sugiere que las matrices de sistematización se

dividan en columnas (Ver Tabla no 4), conteniendo la primera los datos de los autores, así como el año y lugar de publicación de la investigación. Esto último es con el propósito de determinar el contexto temporal y las situaciones geográficas que pudieron haber limitado los resultados encontrados. Posteriormente, se sugiere que en la siguiente columna se describan los objetivos generales y específicos de cada artículo, los cuales nos permiten determinar la utilidad de la información encontrada con respecto a nuestra propia revisión (Popay et al., 2006).

Tabla 4

Componentes de las matrices de sistematización realizadas durante una RB

Primer columna	Segunda Columna	Tercer Columna	Cuarta columna
Redactar los datos de los autores como sus nombres, año y país	Escribir los objetivos generales y específicos que se llevaron a cabo en la investigación	Describir los siguientes elementos: • Diseño de investigación utilizado. • Cálculo de muestra y muestreo. • Criterios de inclusión, exclusión y eliminación. • Variable dependiente y las independientes. • Instrumentos utilizados. • Escalas de medición. • Análisis estadístico.	Resaltar los resultados más importantes del estudio, iniciando por aquellos descriptivos seguido por los analíticos.

La siguiente columna deberá incluir la metodología realizada en los artículos, el diseño que plantearon para su investigación y el análisis estadístico que se utilizó. La determinación de ellos nos permitirá conocer las ventajas y desventajas de las investigaciones previas, junto con la identificación de posibles errores metodológicos (Mays y Pope, 2005). De igual forma nos permite identificar la validez interna y externa de los estudios que vamos encontrando (Cardona-Arias *et al.*, 2016).

Finalmente, en la última columna, se describirán los resultados encontrados y este proceso debe de repetirse con cada una de las investigaciones encontradas (Argimón-Pallás y Jiménez-Villa, 2019; Hernández-Barbosa *et al.*, 2016). El objetivo de esta última etapa de la RB es que el investigador tenga la suficiente evidencia posible para poder estructurar los argumentos de su investigación, por lo que se sugiere que este proceso se repita con cada una de las investigaciones originales recuperadas en un mismo documento de Word o Excel pero dividido en renglones (Gómez-Luna *et al.*, 2014).

4. Discusión

4.1. Sesgos que se deben de evitar al momento de realizar una RB

Como se ha comentado previamente, la utilidad de las RB es proveer al investigador de la información más actualizada sobre un tema de interés. Sin embargo, hay que considerar que, como todo diseño de investigación, las RB pueden presentar sesgos y errores al momento de realizarse. Uno de los sesgos más frecuentes es el de publicación, donde al considerarse solo los estudios publicados se pueden generar conclusiones sesgadas. Otro tipo son los de localización de los estudios, generado por el sesgo de idioma y de las bases de datos, sobre todo cuando solo se consideran revistas indexadas (Hernández-Sampieri, Fernández-Collado, y Baptista-Lucio, 2006).

Otros tipos de sesgos son los de publicación múltiples, sobre todo al haber auto citación. Los sesgos de datos ausentes, se definen como aquellos que surgen de solo encontrar resultados positivos en los artículos encontrados. Para evitar ello, es necesario realizar desde un inicio una buena estrategia de búsqueda, planteando desde un inicio un objetivo de revisión concreto y siguiendo criterios específicos de búsqueda que permitan obtener la información más reciente y específica del tema de interés (Cuello-García y Pérez-Axiola, 2015).

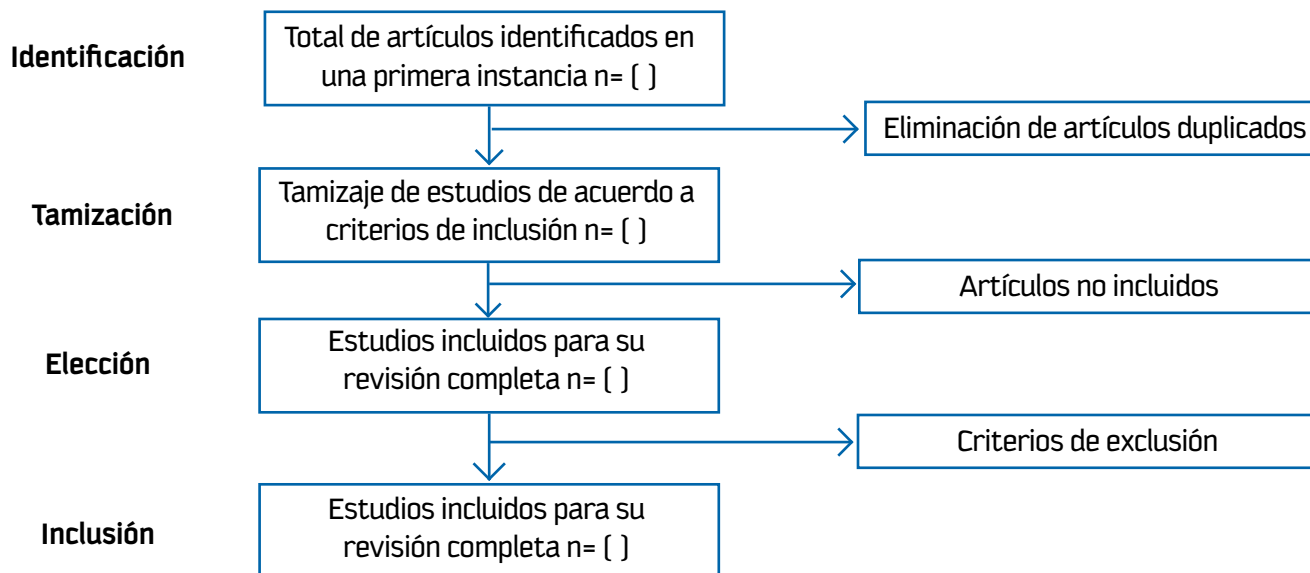
Considerando lo anterior, un método alternativo para evitar sesgos, y ser más preciso con los criterios de búsqueda, es la generación de un flujograma de búsqueda

entre la tercera y cuarta etapa de la RB (Ver Diagrama de Flujo 3). Este permite ir anotando la cantidad de artículos identificados en una primera instancia, lo cual evita sesgos de duplicación. Seguido de ello, se tamiza la información

de acuerdo a los criterios metodológicos contemplados, eligiendo los estudios de mayor importancia de acuerdo a su validez interna y externa, y finalizando con la inclusión de estudios que conformarán la RB.

Diagrama de Flujo 3

Algoritmo de selección o flujograma para la selección de artículos en una RB*



*RB: Revisión Bibliográfica

Diagrama de flujo realizado por los autores del manuscrito

4.2. Ventajas y desventajas de una RB en las investigaciones clínicas

La investigación y divulgación científica es una actividad fundamental en las Ciencias de la Salud y una adecuada RB ayuda a que se amplíe el conocimiento que se tiene sobre un tema médico en específico (Salinas, 2020). Utilizándose para conocer las causas de un padecimiento, comprender los aspectos sobre un proceso fisiopatológico, así como explicar narrativamente acerca de nuevas pruebas diagnósticas o tratamientos farmacológicos. Una RB permite que todo esto se pueda exponer de una manera narrativa, generando de esta manera una investigación documental (Grant y Booth, 2009; Salinas, 2020).

Igualmente, los beneficios de una RB no solo se limitan a los estudios clínicos, ya que puede apoyar a los otros tipos de investigación cuantitativos del campo médico tales como las investigaciones educativas, operativas, epidemiológicas y biomédicas,

inclusive cualitativas (Hernández-Muñoz, Hernández-Muñoz, y Mata-Maqueda, 2018; Becker, 1986). No obstante, a diferencia de las Revisiones Sistemáticas y los Metaanálisis, la falta de un proceso riguroso y estructurado en su metodología –Así como la carencia de un método de análisis de los resultados obtenidos– hacen que se dificulte su reproducibilidad (Salinas, 2020).

Ante ello, se sugiere que, si el objetivo es hacer una búsqueda intencionada de la literatura junto con un análisis preciso de sus resultados, entonces deberá de hacerse una Revisión Sistemática de la literatura la cual considera no solo la Declaración PRISMA, sino además las guías de la Colaboración Cochrane para las Revisiones Sistemáticas y Metaanálisis (Cardona-Arias *et al.*, 2016). Sobre todo, en investigaciones que abarquen intervenciones terapéuticas o nuevos tratamientos farmacológicos, así como análisis de la homogeneidad entre diversos ensayos clínicos de un mismo tema (Salinas, 2020).

Conclusión

De acuerdo a los datos expuestos, una adecuada y ordenada RB tendrá como resultado una revisión sistemática organizada. Esto le dará al investigador los fundamentos suficientes para la redacción de argumentos estructurados para una investigación, una revisión o un manuscrito (Benet-Rodríguez *et al.*, 2014). La implementación de las cinco etapas mencionadas previamente, permitirá al investigador extraer y sistematizar la información, evitando a su vez cualquiera de los sesgos que surgen con este proceso (Argimon-Pallás y Jiménez-Villa, 2019). Es, a través de esto, que podemos entender no solo la importancia de seguir las recomendaciones que se plantean, sino además el apoyo que proveen las RB a cualquier proyecto de investigación clínico.

Dedicatoria

Dedicado a todo el personal de la FMUAQ, que me dieron la oportunidad de ser Docente desde hace año y medio. Asimismo, este trabajo está dedicado a cada una y cada uno de los estudiantes que están actualmente concluyendo 7mo, 6to y 5to semestre de la Licenciatura en Medicina, pues depositaron su confianza en mí cuando les di clases y me permiten ver como diariamente se vuelven mejores profesionistas y personas.

Dr. Adrián E. Hernández Muñoz MD, mayo del 2022.

Referencias bibliográficas.

- Araujo-Alonso, M. (2011). Fundamentos y limitaciones de la revisión de la literatura biomédica. *MEDWAVE*, 11(10), 1-10.
- Argimon-Pallás, J., y Jiménez-Villa, J. (2019). Revisiones Sistemáticas. *Métodos de investigación clínica y epidemiológica*. Madrid, España: Elsevier, 101-109.
- Barrios, I., Benítez, E., Rojas, R., Zárate, K., & Lird, M. (2017). Herramientas informáticas para el estudiante de medicina investigador. *Medicina Clínica y Social*, 1(2), 119-125.
- Becker, H. (1986). *Terrorized by literature. Writing for social scientists How to start and finish your thesis, book, or article*. Chicago: University of Chicago Press, 138-149.
- Benet-Rodríguez, M. (2015) La revisión sistemática de la literatura científica y la necesidad de visualizar los resultados de las investigaciones. *Revista Logos, Ciencia & Tecnología*, 7(1), 101-103.
- Boote, D., y Beile, P. (2005). Scholars before researchers: On the centrality of the dissertation literature review in research preparation. *Education Research*, 34(6), 3-15.
- Cabrejos-Díaz, F. (2015). La tesis de postgrado: Concepción del marco teórico. *Pueblo Continente*, 25(1), 317-324.
- Cardona-Arias, J.A., Higuera-Gutiérrez, L.F., Ríos-Osorio, L.A. (2016). Revisiones sistemáticas de la literatura científica: la investigación teórica como principio para el desarrollo de la ciencia básica y aplicada. Colombia, Bogotá: Universidad Cooperativa de Colombia.
- Castrillón-Estrada, J. et al. (2008). Bases de datos, motores de búsqueda e índices temáticos: herramientas fundamentales para el ejercicio médico. *Salud Uninorte*, 24 (1), 96-119.
- Centro Cochrane Iberoamericano, traductores. (2011). Manual Cochrane de Revisiones Sistemáticas de Intervenciones, versión 5.1.0 (2011). Barcelona: Centro Cochrane Iberoamericano.
- Cuello-García, C., y Pérez-Gaxiola, G. (2015). Medicina Basada en la Evidencia: Fundamentos y su enseñanza en el contexto clínico. D.F., México: Editorial Médica Panamericana.
- Gómez-Luna, E. *et al.* (2014). Metodología para la revisión bibliográfica y la gestión de información de temas científicos, a través de su estructuración y sistematización. *DYNA*, 81(184), 158-63.
- Goossen, K., Hess, S., Lunny, C. y Pieper, D. (2020). Combinaciones de bases de datos para recuperar revisiones sistemáticas en resúmenes de revisiones: un estudio metodológico. *Metodología de investigación médica BMC*, 20 (1), 1-10.
- Goris, S. (2015). Utilidad y tipos de revisión de literatura. *ENE Revista de Enfermería*, 9(2), 1-10.
- Grant, M. J., & Booth, A. (2009). A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies. *Health information & libraries journal*, 26(2), 91-108.
- Hernández-Barbosa, R. *et al.* (2016). Sistematización

- de trabajos de grado: Propuesta investigativa para la reconstrucción de rutas de conocimiento. *Actualidades Investigativas en Educación*, 15(2), 1-20.
- Hernández-Muñoz, A.E., Hernández-Muñoz, K.M., y Mata-Maqueda, I. (2018). Características, ventajas y limitantes en las variantes metodológicas de los Casos y Controles: artículo de revisión narrativa. *Revista DIGITAL CIENCIA@UAQRO*, 11(1), 110-122.
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., y Baptista-Lucio, P. (2006). *Elaboración del marco teórico: Revisión de la literatura y construcción de una perspectiva teórica*. México, D.F.: McGraw Hill, 63-97.
- Hevia, J., Huete, Á., Alfaro, S., & Palominos, V. (2017). Herramientas útiles y métodos de búsqueda bibliográfica en PubMed: guía paso a paso para médicos. *Revista médica de Chile*, 145(12), 1610-1618.
- Institute TJB. (2015). Methodology for JBI scoping review. En *Joanna Briggs Institute Reviewers' Manual: 2015 edition / Supplement* (pp. 6-14). Adelaide, South Australia: The Joanna Briggs Institute.
- Justesen, T., Freyberg, J. y Schultz, A. (2021). Selección de bases de datos y métodos de recopilación de datos en revisiones sistemáticas de investigación cualitativa sobre diabetes mellitus: un estudio exploratorio. *Metodología de investigación médica BMC*, 21(1), 94.
- Kapoor, M. C. (2016). Types of studies and research design. *Indian journal of anaesthesia*, 60(9), 626.
- Kimbell, B., y Murray, S. A. (2013). What is the patient experience in advanced liver disease? A scoping review of the literature. *British Medical Journal supportive & palliative care*, 1, 1-10.
- Li, L., Smith, H.E., Atun, R. y Tudor Car, L. (2019). Estrategias de búsqueda para identificar estudios observacionales en MEDLINE y Embase. *La base de datos Cochrane de revisiones sistemáticas*, 3 (3), MR000041.
- Manterola, C., y Otzen, T. (2014). Análisis Crítico de la Literatura Biomédica. *International Journal of Morphology*, 32, 599-607.
- Mays, N., y Pope, C. (2005). Systematically reviewing qualitative and quantitative evidence to inform management and policy-making in the health field. *The Journal of Health Services Research & Policy*, 10, 6-20.
- Pinillo León, A., y Cañedo Andalia, R. (2005). El MeSH: una herramienta clave para la búsqueda de información en la base de datos Medline. *Acimed*, 13(2), 1-10.
- Popay, J. et al. (2006). *Applying the guidance: A narrative synthesis of studies of the effectiveness of interventions for promoting smoke alarm ownership and function. Guidance on the conduct of narrative synthesis in systematic reviews*. London: ESRC, 25-66.
- Robles-Silva, L. (2015). Prólogo. Temas selectos de salud pública: Revisiones Panorámicas. México, México: iMedPub, 1-4.
- Rumsey, S. (2008). *Discovering relevant materials. How to Find Information in Two Penn Plaza*. New York: McGraw Hill, 29-48.
- Salinas, M. (2020). Sobre las revisiones sistemáticas y narrativas de la literatura en Medicina. *Revista chilena de enfermedades respiratorias*, 36(1), 26-32.
- Sears, A. (2005). *So many theories, so little time in A good book in theory: A guide to theoretical thinking*. North York, Ontario: UTP, 135-157.
- Sheldon, T. (2005). Making evidence synthesis more useful for management and policy-making. *The Journal of Health Services Research & Policy*, 10, 6-20.
- Universidad de Chile. (2017). *Bases de datos especializadas en ciencias Biomédicas*. Dirección de Servicios de Información y Bibliotecas (SISIB). Recuperado el 10 de junio de 2017 de <http://www.uchile.cl/bibliotecas>
- Vizmanos-Lamotte, B. et al. (2009). Guía para elaborar un anteproyecto de investigación. *Revista de Educación y Desarrollo*, 11, 39-46.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
DIRECCIÓN DE POSGRADO

