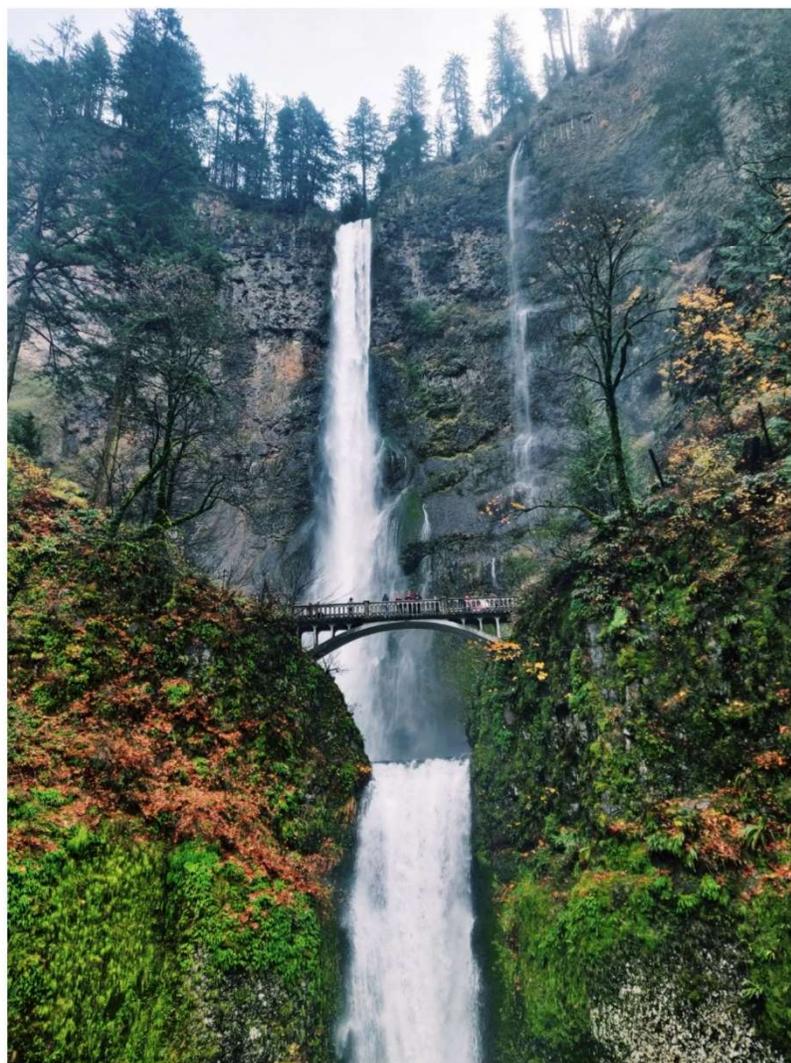




Ciencia Nicolaita

85



septiembre
de 2022

Revista Científica
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Ciencia Nicolaita

ISSN: 2007-7068

Marco Antonio Landavazo Arias
Coordinador de la Investigación Científica

Pedro Corona Chávez
Editor

Comité Editorial

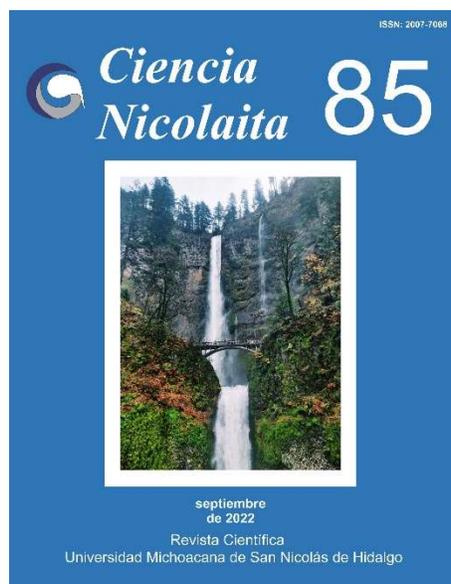
Luca Tessieri, Instituto de Física y Matemáticas; **Sabina Irene Lara Cabrera**, Facultad de Biología; **Martina Medina Nava**, Facultad de Biología; **María de Lourdes González Arqueros**, Conacyt – Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra; **Jeannette Sofía Bayuelo Jiménez**, Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales; **José Miguel Cervantes Alfaro**, Facultad de Medicina; **Jorge Alejandro Verduzco Martínez**, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas y de Materiales; **Claudio Rubén Fuerte Esquivel**, Facultad de Ingeniería Eléctrica; **Jesús Cirilo Trujillo Jiménez**, Facultad de Ingeniería Mecánica; **Elia Mercedes Alonso Guzmán**, Facultad de Ingeniería Civil.

Comité Editorial Externo

Daniele Colosi, Escuela Nacional de Estudios Superiores, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, México; **Carlos Alonso Maya Lastra**, Columbia University, Department of Ecology, Evolution and Environmental Biology, USA; **Rafael Ángel Reyna Hurtado**, Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Campeche, México; **Zayre Ivonne González Acevedo**, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Baja California, México; **Ramón Marcos Soto Hernández**, Colegio de Postgraduados, Postgrado en Botánica, Estado de México; **María Esther Olvera Cortés**, Centro de Investigación Biomédica de Michoacán, Instituto Mexicano del Seguro Social, México; **Ignacio Alejandro Figueroa Vargas**, Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México; **Enrique Acha Daza**, Profesor Emérito de la Universidad de Tampere, Finlandia; **Víctor Manuel Ambríz Díaz**, Instituto Tecnológico de Chihuahua; **Luis Fernando Guerrero Baca**, Universidad Autónoma Metropolitana, México.

Equipo Editorial: Sergio Ramírez Murillo, Naborina Villaseñor Santoyo.

Administrador página web: Hugo César Guzmán Rivera.



Ciencia Nicolaita

ISSN: 2007-7068

Revista Ciencia Nicolaita Número 85, septiembre de 2022

<https://www.cic.cn.umich.mx/cn>

Directorio	2
Contenido	3
Presentación Pedro Corona Chávez Editor	5
Azospirillum brasilense induce la producción del antimicrobiano 6-metoxi-2- benzoxazolinona (MBOA) en el follaje y la raíz de plántulas de trigo (<i>Triticum aestivum</i> L.) Elda Castro Mercado y Ernesto García Pineda https://doi.org/10.35830/cn.vi85.617	6
El abismo entre las propiedades de los micromateriales y nanomateriales Gerardo A. Rosas Trejo https://doi.org/10.35830/cn.vi85.618	17
Estado del desarrollo y aplicaciones de la tecnología del concreto J.V. González-Aviña., L.G. López Yépez, A. Durán-Herrera https://doi.org/10.35830/cn.vi85.619	27

El momento magnético débil anómalo del Top en el contexto del Modelo Bestest Little Higgs Jorge Isidro Aranda Sánchez, Eligio Cruz Albaro, Alejandro Gutiérrez Rodríguez, Fernando Iguazú Ramírez Zavaleta https://doi.org/10.35830/cn.vi85.625	44
Evaluación de la calidad del agua de manantiales ubicados en la comunidad El Platanal, Michoacán, México Claudia Alejandra Reyes Toscano, Ruth Alfaro Cuevas Villanueva, Guadalupe Vázquez Mejía, Raúl Cortés Martínez, Dulce María Bocanegra Ramírez https://doi.org/10.35830/cn.vi85.658	53
Simulación del hábitat potencialmente utilizable (HPU) por la especie <i>Chondrostoma polylepis</i>, en un río, utilizando el sistema PHABSIM Ezequiel García Rodríguez https://doi.org/10.35830/cn.vi85.667	73
Página legal y créditos	84

Presentación

Ciencia Nicolaita es una revista científica editada en versión electrónica por la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, que acepta para su publicación artículos originales, resultado de investigaciones que demuestren rigor en su metodología, resultados y discusión.

Ciencia Nicolaita se propone difundir contribuciones en las áreas del conocimiento de Físico Matemáticas, Ciencias Biológicas, Ecología y Ambiente, Ciencias de la Tierra, Ciencias Agro y Químico Biológicas, Ciencias de la Salud, Ingeniería Química, Metalurgia y Materiales, Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Mecánica y Arquitectura e Ingeniería Civil.

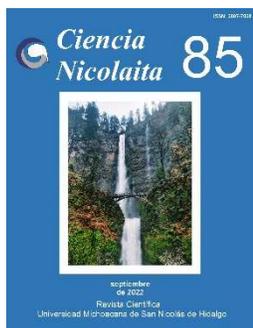
Por otro lado, como una nueva propuesta de revista institucional, Ciencia Nicolaita ofrece la oportunidad de publicar diversas formas de comunicación de la ciencia, desde **volúmenes monográficos** relacionados con las diversas áreas del conocimiento, **artículos in extenso** con datos científicos originales que demuestren rigor en su metodología, resultados y discusión, **artículos de revisiones del trabajo científico** de investigadores nicolaitas o de externos por invitación, **artículos de análisis** y debates científicos actuales, **reseñas** de temas relevantes obtenidas a partir de obra (libros), entrevistas, congresos y simposios nacionales e internacionales, **artículos de educación** de cada área científica con referencias críticas en el desarrollo de técnicas o materiales de enseñanza y **noticias documentadas** de la comunidad científica universitaria (premios, congresos, patentes, logros).

El número 85 de la revista Ciencia Nicolaita contiene seis publicaciones que son una muestra de la diversidad de áreas de conocimientos, como de sus formas de comunicación que responden al llamado de la convocatoria y formato que se propone. Se presentan tres investigaciones originales con datos que han seguido un cierto rigor metodológico. El trabajo de Castro mercado y García Pineda expone los resultados de una investigación de base en el área de químico-biológica; Reyes Toscano nos muestra la caracterización de la calidad del agua del Río Duero y García Rodríguez nos muestra las variables que condicionan la especie *Chondrostoma polylepis*. Así mismo se presentan dos artículos de revisión científica. Por su parte Rosas Trejo nos presenta una revisión acerca de la vanguardia del estudio de los materiales y nanomateriales; mientras que González y Colaboradores nos exponen el estado del conocimiento en la tecnología de concretos. El número 85 de la revista Ciencia Nicolaita culmina con un excelente ensayo teórico realizado por Aranda y colaboradores sobre el momento magnético de los materiales de acuerdo a un modelo teórico.

Consideramos que el número 85 de la revista Ciencia Nicolaita cumple con la nueva propuesta de abrir las posibilidades de comunicación científica institucional y esperamos que el contenido de este número pueda ser bien recibido y aprovechado por investigadores, docentes y estudiantes

Pedro Corona Chávez

Editor



Ciencia Nicolaita 85

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

***Azospirillum brasilense* induce la producción del antimicrobiano 6-metoxi-2- benzoxazolinona (MBOA) en el follaje y la raíz de plántulas de trigo (*Triticum aestivum* L.)**

***Azospirillum brasilense* induces the production of antimicrobial 6-metoxi-2-benzoxazolinona (MBOA) in the foliage and root of wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.)**

Elda Castro Mercado y Ernesto García Pineda*

Para citar este artículo: Elda Castro Mercado y Ernesto García Pineda*, 2022. *Azospirillum brasilense* induce la producción del antimicrobiano 6-metoxi-2- benzoxazolinona (MBOA) en el follaje y la raíz de plántulas de trigo (*Triticum aestivum* L.). Ciencia Nicolaita no. 85, 6-16. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi85.617>



Historial del artículo:

Recibido: 4 de marzo de 2022

Aceptado: 4 de julio de 2022

Publicado en línea: septiembre de 2022



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: egpineda@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>



***Azospirillum brasilense* induce la producción del antimicrobiano 6-metoxi-2-benzoxazolinona (MBOA) en el follaje y la raíz de plántulas de trigo (*Triticum aestivum* L.)**

***Azospirillum brasilense* induces the production of antimicrobial 6-metoxi-2-benzoxazolinona (MBOA) in the foliage and root of wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.)**

Elda Castro Mercado y Ernesto García Pineda*

Instituto de Investigaciones Químico Biológicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Ciudad Universitaria, Edif. A1', Morelia, Michoacán CP 58040, México

Resumen

Los Benzoxazinoides (Bx) son compuestos químicos derivados de ácidos hidroxámicos, con propiedades aleloquímicas y antimicrobianas. En este estudio se reporta el efecto de *Azospirillum brasilense* sobre la producción de Bx en plántulas de trigo. El análisis por Cromatografía de Gases acoplada a Espectrometría de Masas (CG/EM) de extractos de plántulas de cuatro días de germinación, identificó a la benzoxazolinona 6-metoxi-2-benzoxazolinona (MBOA). El metabolito se acumuló más en follaje que en raíz, en condiciones naturales. En follaje, su acumulación fue mayor 24 h después de la inoculación con *A. brasilense*, y en respuesta a la concentración de inóculo. El crecimiento de la bacteria en presencia de MBOA disminuyó ligeramente su crecimiento. Se discute la posible función de MBOA en relación a su papel durante la interacción de la bacteria con la plántula de trigo.

Palabras clave: Benzoxazinoides, Aleloquímico, Cromatografía de gases, Cromatografía en placa fina.

Abstract

Benzoxazinoids (Bx) are chemical compounds derived from hydroxamic acids with allelochemical and antimicrobial properties. In this study, the effect of *Azospirillum brasilense* on Bx production in wheat seedlings is reported. The benzoxazolinone 6-methoxybenzoxazolin-2-one (MBOA) was identified in extracts of seedlings, four days after germination, by GC/MS analysis. In natural conditions, the metabolite was higher accumulated in foliage than in root. In foliage, their accumulation increased 24 h after inoculation with *A. brasilense*, and in response to inoculum concentration. The growth of the bacterium in presence of MBOA slightly decreased its growth. The probable function of MBOA in relation with its role during the interaction of the bacteria with wheat seedling is discussed.

Keywords: Benzoxazinoids, Allelochemical, Gas chromatography, Thin layer chromatography

Introducción

Los estudios sobre cambios globales en el metabolismo (metaboloma) son importantes para comprender los detalles moleculares de la interacción entre rizobacterias que promueven el crecimiento vegetal (RPCV) y las plantas (Alberton et al., 2020). Las RPCV colonizan las raíces de una gran diversidad de plantas, y como resultado modulan sus rutas metabólicas (Ramamoorthy et al., 2001; Jourdan et al., 2008). En consecuencia, modifican los perfiles del metabolismo primario y secundario en las raíces, los brotes y en la savia del xilema (Osbourn et al., 2003; Mishra et al., 2006; Walker et al., 2011; Chamam et al., 2013; Rozier et al., 2016; Lade et al., 2018).

Azospirillum es una de las RPCV más estudiadas debido a su capacidad para mejorar la productividad de diferentes especies vegetales de interés económico (Bashan et al., 2004). El establecimiento de *Azospirillum* en las raíces de las plantas es un paso crítico en la promoción del crecimiento vegetal (Okon y Kapulnik, 1986; Bashan et al., 2004). Esta rizobacteria se localiza en la rizósfera y coloniza la superficie de las raíces de las plantas, sin embargo, algunas cepas tienen la capacidad para colonizar el interior de la raíz (Patriquin et al., 1983; Baldani et al., 1986; Döbereiner et al., 1995). Asimismo, puede colonizar diferentes zonas de la raíz, incluyendo las raíces laterales y los pelos de la raíz (Vande-Broek et al., 1993). Además, la inoculación con *Azospirillum* altera el metabolismo vegetal, resultando en cambios en la producción de metabolitos secundarios (Chamam et al., 2013).

A. brasilense es la especie más utilizada para mejorar el crecimiento vegetal, y la producción de granos en cereales (Cassán et al., 2016). Por ejemplo, la inoculación de *A. brasilense* en semillas de trigo incrementa la producción de granos entre 6.1 % y 18 % (Díaz-Zorita y Fernández-Canigia, 2009; Hungría et al., 2010).

Los Benzoxazinoides (Bx) son metabolitos secundarios sintetizados por miembros de la familia Poaceae, la cual incluye al trigo, el maíz y el arroz. Además, son considerados como moléculas de defensa. Estos compuestos, modifican su concentración en

respuesta a la inoculación con cepas de *Azospirillum* (Park et al., 2004; Walker et al., 2011).

Los Bx son compuestos hidroxámicos que contienen un grupo químico hidroxilamino unido a un ácido carboxílico. Se han aislado de trigo y de maíz (Wahlroos y Virtanen, 1959) y, además de su actividad como compuestos de defensa, tienen actividades alelopáticas (compuestos químicos que influyen en el crecimiento, supervivencia o reproducción de otros organismos; Singh et al., 2009), fungicidas (Martyniuk et al., 2006), insecticidas (Escobar et al., 1999) y mutagénicas (Hashimoto y Shudo, 1996). Su modo de acción se atribuye a la formación de un enlace *N*-covalente con aminoácidos y ácidos nucleicos (Hashimoto y Shudo, 1996). Su producción es alta durante la germinación, con concentraciones fungistáticas presentes en tejido de hoja, lo que sugiere que estos compuestos contribuyen activamente a la defensa durante la edad temprana de la plántula (Copaja et al., 1999). Además, su concentración también se incrementa después del ataque por patógenos y en respuesta a compuestos que estimulan la defensa, por lo que son considerados como fitoalexinas (Oikawa et al., 2001, 2004).

Los Bx agrupan a las benzoxazolinonas, tales como la 6-metoxi-2-benzoxazolinona (MBOA); a los ácidos hidroxámicos, que incluyen a los compuestos 2,4-dihidroxi-1,4-benzoxazin-3-ona (DIBOA), 2,4-dihidroxi-7-metoxi-1,4-benzoxazin-3-ona (DIMBOA), sus correspondientes glucósidos (DIBOA-Glu y DIMBOA-Glu) y lactámicos tales como 2-hidroxi-1,4-benzoxazin-3-ona (HBOA) (Hanhineva et al., 2011). Los ácidos hidroxámicos se acumulan en las plantas en forma de β -glucósidos. En los cereales, se encuentran principalmente en la raíz y las hojas (Villagrasa et al., 2006).

En trigo, la aglucona (forma química no glucosilada) más abundante es el DIMBOA (Nakagawa et al., 1995) y cuando la raíz la exuda se convierte rápidamente en MBOA, la cual es más resistente a la degradación (Macías et al., 2004). Actualmente se desconoce el efecto de la inoculación de plántulas de trigo con *A. brasilense* sobre la acumulación de Bx.

En este estudio se analizó el efecto de diferentes concentraciones de inóculo y el tiempo de exposición



de *A. brasilense* sobre la producción de Bx en plántulas de trigo, así como su efecto sobre el crecimiento de la rizobacteria.

Material y métodos

Para el estudio se utilizaron semillas de trigo (*Triticum aestivum* L.) del cultivar Nana F2007, donadas por el Dr. Mario González Chavira, del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campus Celaya, México.

La cepa de *Azospirillum brasilense* Sp245 (Baldani *et al.*, 1986) fue donada por la Dra. Gladys Alexandre, de la Universidad de Tennessee, USA. La bacteria se mantuvo en medio Luria-Bertani (LB) con 10 g L⁻¹ de triptona, 5 g L⁻¹ de extracto de levadura, 5 g L⁻¹ de NaCl, 0.186 g L⁻¹ de MgSO₄, 0.277 g L⁻¹ de CaCl₂ y 15 g L⁻¹ de agar.

Para la preparación del inóculo, las bacterias se crecieron en 50 mL de medio LB líquido durante 20 h (fase exponencial), a 27°C, con agitación constante [(100 revoluciones por minuto [rpm]) (Labnet 211DS, Edison, NJ, U.S.A.). El cultivo se lavó dos veces con una solución de NaCl al 0.9 % y se centrifugó a 4300 rpm, durante 10 min (Terlab, Zapopan, Jal, México). Las células se resuspendieron en 1 mL de buffer de MgSO₄ 0.01 M, y se ajustaron a la concentración final deseada por conteo de Unidades Formadoras de Colonias (UFC) por mL.

El compuesto 6-methoxy-2-benzoxazolinone (Cat. 543541) se adquirió comercialmente de la empresa Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, U.S.A.).

Germinación de las semillas y tratamientos

Las semillas se lavaron con una solución de dodecil sulfato de sodio (SDS) al 1 %, en agitación durante 3 min. Posteriormente, se desinfectaron con una solución de hipoclorito de sodio (NaClO) al 1% durante 5 min, en agitación constante. Se lavaron 4 veces con agua destilada estéril (ADE) y se germinaron en cajas Petri, cubiertas con papel filtro humedecido con ADE, durante un periodo de 3 a 4 días, a 28°C, en oscuridad.

Para los tratamientos, cinco plántulas de tres días de germinación se transfirieron a matraces de 100 mL, conteniendo 10 mL de diferentes concentraciones de inóculo (1 y 3x10⁶ UFC/mL). El inóculo se preparó diluyendo la cantidad deseada de bacterias en

ADE. Los controles se trataron de la misma forma, sin la adición de bacterias. Las plántulas se colocaron en los matraces de tal manera que solo las raíces de las plantas estuvieron en contacto con el inóculo. La interacción de la raíz con la rizobacteria se incubó a diferentes tiempos (24 y 48 h), y posteriormente se realizó la extracción de Bx.

Extracción y análisis de Bx

Para la extracción de los Bx, el tejido vegetal se maceró en un mortero con 1 mL de ADE. El macerado se transfirió a un tubo de 1.5 mL, se agitó en vortex durante 30 s, y se centrifugó a 12,000 rpm durante 5 minutos. El sobrenadante se transfirió a un tubo nuevo. Se realizó una extracción con dietil éter [(C₂H₅)₂O] (1:1 v/v) por agitación durante 30 s. y se centrifugó a 12,000 rpm, durante 5 minutos. Se retiró la fracción orgánica de [(C₂H₅)₂O], se colocó en un tubo de 1.5 mL y el solvente se evaporó en un Thermomixer a 60°C.

Para la identificación de los compuestos, el extracto se disolvió en (C₂H₅)₂O y se sometió a un análisis por cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masa (CG/EM) (Hewlett Packard 5890 Series II, Palo Alto, CA, U.S.A.). Se utilizó una columna capilar de sílica con 5 % de fenilmetil silicona [(C₇H₈osi)N] (HP-1, Hewlett Packard, Wilmington, DE, U.S.A.). Las condiciones de corrida fueron: helio a 15 psig (libras por pulgada cuadrada de calibre), con un programa de temperatura de 45°C (3 min) a 300°C (1 min) at 10°C/min. Los resultados se analizaron en la librería de espectros de masas del software Xcalibur™ 2.2 de Thermo Scientific (Waltham, MA, U.S.A.).

Para la identificación de Bx por cromatografía en placa fina (CPF), el extracto se re-suspendió en 50 µL de acetato de etilo (C₄H₈O₂) y se aplicó en una placa fina. La cromatografía se desarrolló en un sistema de solventes compuesto por 10 mL de metanol y 90 mL de cloroformo (CHCl₃) (1:9 v/v). La placa se reveló por aspersion con una mezcla de cloruro férrico (FeCl₃) al 5% en etanol al 95%. Los Bx se localizaron por la presencia de manchas de color azul violeta (Baker and Smith, 1977).

Para la cuantificación, se raspó cuidadosamente la zona de ubicación del MBOA en la placa fina sin revelar y se eluyó con 1 mL de metanol (CH₃OH). Se centrifugó y el sobrenadante se analizó a 264 nm en un

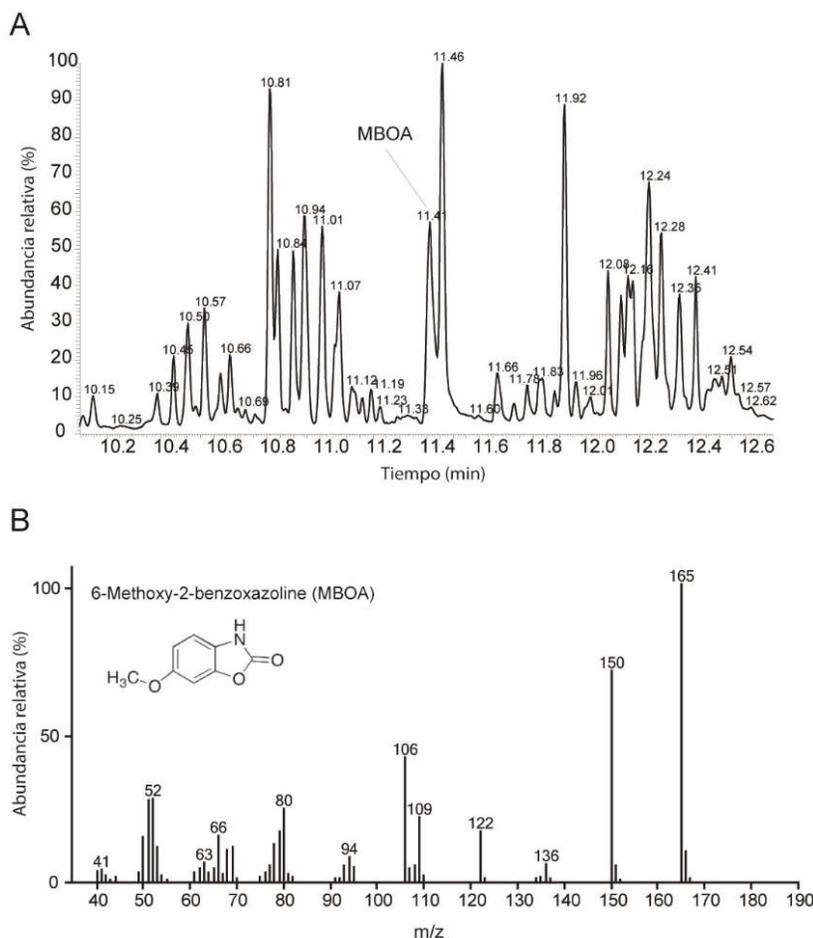


Figura 1. Análisis por cromatografía de gases (A), e identificación del benzoxazinoide 6- metoxi-2-benzoxazolinona (MBOA) por espectrometría de masas (B).

espectrofotómetro, longitud de onda UV absorbida por el compuesto (Nakagawa et al., 1995).

Para analizar la liberación por hidrólisis de MBOA del precursor glucosilado, el macerado acuoso inicial se incubó a diferentes tiempos (0, 1 y 1.5 h) para permitir la hidrólisis y posteriormente se realizó su extracción.

Análisis estadístico

Todos los experimentos se repitieron tres veces, con una $n = 3$ por lote. Los datos se reportan como la media de cada lote experimental. Los análisis del efecto del MBOA sobre el crecimiento de la bacteria fueron realizados con una $n = 10$. Los datos se reportan con media \pm DE en cada lote. A estos se les realizó un análisis de varianza (ANOVA) ($p \geq 0.05$), utilizando el programa STATISTICA 13.3

(<http://www.statsoft.com>) (StatSoft, Inc., OK, U.S.A).

Resultados

Identificación de Bx

Un extracto inicial se sometió a análisis por CG/EM. Un pico con un tiempo de retención de 11.41 min (Figura 1A), se identificó como la benzoxazolinona 6-metoxi-2-benzoxazolinona (MBOA) (Figura 1B). Sin embargo, por razones desconocidas, no se identificaron otros Bx reportados para la planta.

Localización y producción MBOA

Se analizó la acumulación natural de MBOA por cromatografía en placa fina en dos tejidos de la plántula: raíz y follaje. Se observó la acumulación del metabolito en ambos tejidos, sin embargo, por la intensidad de la zona revelada en la placa, la cantidad fue diferente en los dos tejidos. Su acumulación fue mayor en el tejido de follaje, en relación a la raíz (Figura 2A).

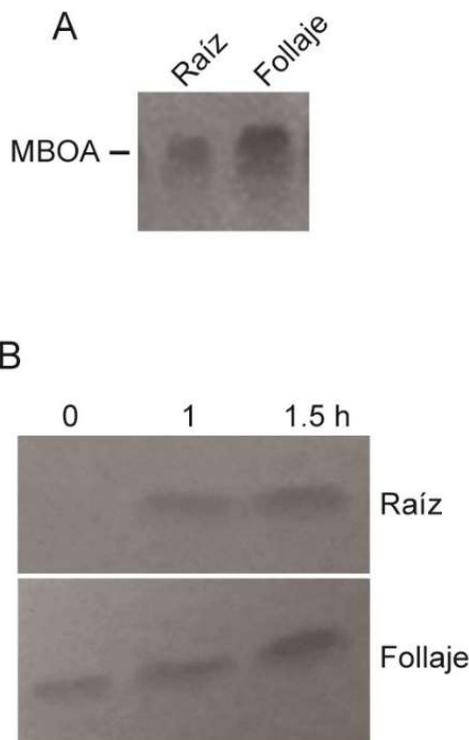


Figura 2. Producción de MBOA en diferentes tejidos de plántulas de trigo (A) y después de la incubación del extracto acuoso a diferentes tiempos (B). El análisis se realizó por cromatografía en placa fina.

Los Bx se acumulan formando complejos con glucosa, los cuales son solubles en agua. En respuesta a la infección, la glucosa se separa por hidrólisis enzimática y se libera la aglucona (Walker *et al.*, 2010). Se analizó la acumulación de MBOA por hidrólisis del precursor glucosilado. El análisis por CPF mostró que la cantidad de MBOA se incrementó en raíz y follaje, en relación con el tiempo de incubación del extracto (hidrólisis; Figura 2B). Lo anterior sugiere que su acumulación está relacionada con la liberación de la glucosa de la forma glucosilada en relación con el tiempo de hidrólisis.

***A. brasilense* estimula la acumulación de MBOA**

Para analizar la acumulación de MBOA en respuesta a la inoculación con *A. brasilense*, las plántulas de trigo se inocularon, y se incubaron a diferentes tiempos (24 y 48 h).

La acumulación de MBOA disminuyó en la raíz, pero incrementó en follaje 24 h después de la inoculación. Se observó la misma tendencia en su acumulación en la raíz 48 h después de la inoculación (Figuras 3A-C).

La concentración de bacteria incrementa la acumulación de MBOA

Se realizó un experimento para analizar el efecto de la concentración de inóculo sobre la acumulación de MBOA con dos concentraciones de bacteria, 1 y 3×10^6 UFC/mL. En ambos tejidos, raíz y follaje, se observó un incremento en la acumulación de MBOA, y el incremento correlacionó con la concentración de inóculo. La concentración más alta de bacteria acumuló la mayor cantidad del metabolito (Figuras 4A, B).

Efecto del MBOA sobre el crecimiento de *A. brasilense*

Se realizó un experimento para analizar el efecto de la adición exógena del MBOA, sobre el crecimiento de *A. brasilense*. Para el ensayo se adquirió el compuesto químico comercial, y se adicionó al medio de crecimiento de la bacteria en diferentes concentraciones (0, 25 y 50 $\mu\text{g/mL}$). Después de 24h de incubación del cultivo, se cuantificó el crecimiento de la bacteria por espectrofotometría. Con la concentración más baja se observó un ligero incremento en el

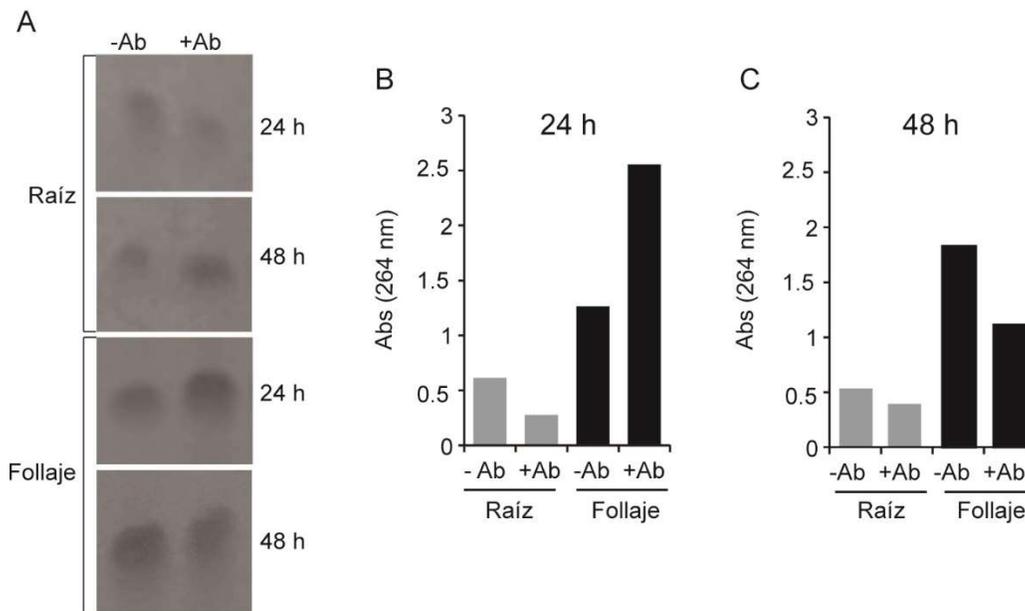


Figura 3. Efecto de la inoculación de *A. brasilense* sobre la producción de MBOA en plántulas de trigo. A. Análisis por cromatografía en placa fina. B. Cuantificación por espectrofotometría. Ab = *Azospirillum brasilense*.

crecimiento de la bacteria (aprox. 2 %) y con la concentración más alta el crecimiento mostró una notoria disminución (18%) (Figura 5). Los resultados sugieren que el MBOA puede afectar el crecimiento de *A. brasilense* dependiendo de la concentración utilizada.

Discusión

Se ha reportado que la concentración de Bx es más alta en plántulas jóvenes, de pocos días de germinación y decrece gradualmente con la edad. Este perfil de acumulación sugiere que están involucrados en la defensa en edades tempranas de las plantas

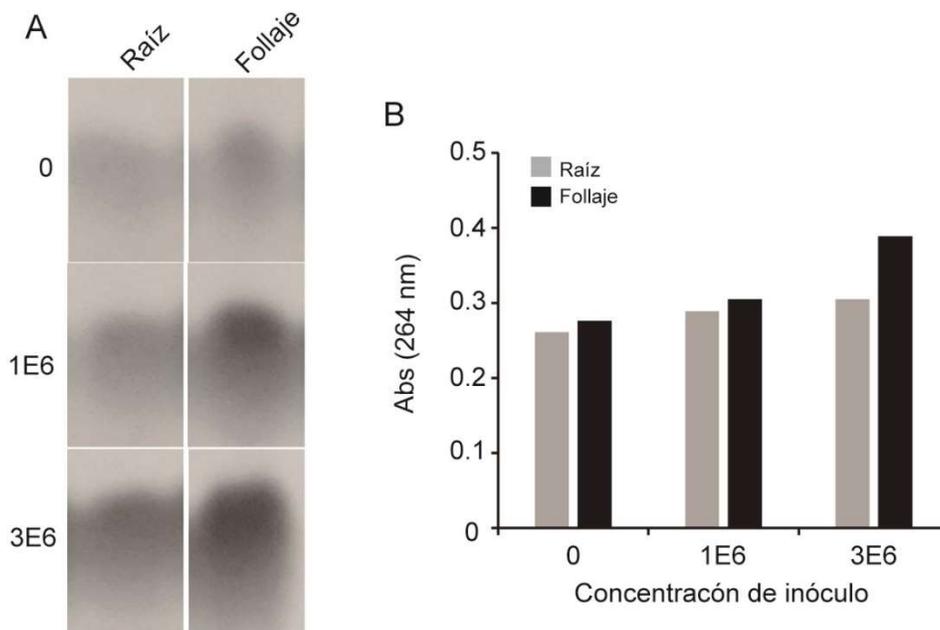


Figura 4. Efecto de la concentración de inóculo sobre la producción de MBOA. A. Análisis por cromatografía en placa fina en diferentes tejidos. B. Cuantificación por espectrofotometría.

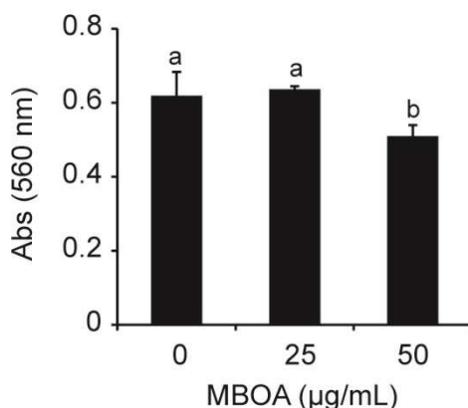


Figura 5. Crecimiento de *A. brasilense* en diferentes concentraciones de MBOA. Los datos representan la media \pm DE. Las letras sobre las barras indican las diferencias entre los tratamientos de acuerdo al análisis de ANOVA ($P \geq 0.05$).

(Masayuki *et al.*, 2021), lo que les permitiría crecer en una condición más sana.

En este estudio, se identificó a la benzoxazinona 6-metoxi-2-benzoxazolinona (MBOA), un benzoxazinoide producido por plántulas de trigo. Este es un derivado más tóxico que su precursor, el 4-*O*-methyl-DIMBOA-Glc (HDMBOA) y resulta de la degradación de esta glucona (Mazayuki *et al.*, 2021).

Existen pocos reportes del efecto de rizobacterias sobre la producción de Bx en cereales. Un estudio describe la variación en la producción de Bx en maíz inoculado con *Azospirillum* (Walker *et al.*, 2012). En nuestro estudio se reporta que la inoculación de plántulas de trigo con *A. brasilense* incrementa la producción de MBOA en el follaje, pero no en la raíz. Probablemente como resultado de la estimulación de la Resistencia Sistémica Inducida (RSI), un fenómeno de estimulación de compuestos de defensa en la planta promovido por rizobacterias. Este tipo de resistencia se manifiesta en zonas alejadas del sitio de colonización por la rizobacteria (van Loon *et al.*, 1998). Además, el incremento fue dependiente de la concentración del inóculo, como lo mostró la intensidad del compuesto analizado por CPF. La contribución del incremento de MBOA en follaje a la resistencia de la plántula de trigo es desconocida hasta ahora.

El MBOA, al igual que otros benzoxazinoides, es secretado por las raíces de los cereales hacia la rizósfera, lo cual altera a las comunidades bacterianas y fúngicas asociadas a la raíz, disminuyendo el crecimiento vegetal, incrementando las defensas de la planta, y suprimiendo la herbivoría. Lo anterior revela

una función importante del MBOA, en la función de la microbiota asociada a la raíz (Hu *et al.*, 2018).

En adición, se ha reportado que el DIMBOA, el principal benzoxazinoide exudado por la raíz de plántulas de maíz, estimula la atracción de la rizobacteria benéfica *Pseudomonas putida* KT2440 hacia la raíz, sugiriendo su importancia para el reclutamiento de microorganismos benéficos por la planta (Neal *et al.*, 2012).

Si bien los Bx tienen propiedades antimicrobianas, las bacterias benéficas parecen tolerar su producción por la planta. Lo anterior se demostró en un ensayo del crecimiento *in vitro* de bacteria *P. putida* KT2440 en presencia de diferentes concentraciones de DIMBOA. La bacteria creció de manera similar al control a una concentración de DIMBOA de 0.5 mM. En contraste, el crecimiento de *Agrobacterium tumefaciens*, otra bacteria de suelo, se afectó incluso a concentraciones menores. Al parecer la tolerancia se debió a la capacidad para degradar el metabolito (Neal *et al.*, 2012). Si bien no existen reportes en la literatura sobre el efecto de Bx en *A. brasilense*, es probable que, al igual que en otras bacterias benéficas, tenga la capacidad de tolerar ciertas concentraciones producidas por la planta de trigo, lo cual podría favorecer la colonización de la raíz. Se requieren más estudios para analizar esta posibilidad. Estos resultados contribuyen a comprender el mecanismo para establecer una relación benéfica planta-rizobacteria.

Conclusiones

La inoculación de la rizobacteria benéfica *A. brasilense* estimula la acumulación de MBOA en plántulas

de trigo. La rizobacteria es tolerante a diferentes concentraciones del compuesto.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Coordinación de la Investigación Científica de la UMSNH por el apoyo financiero otorgado para la realización de este estudio.

Referencias

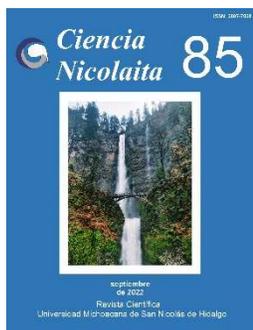
- Alberton, D., Valdameri, G., Moure, V.R., Monteiro, R.A., Pedrosa, F.O., Müller-Santos, M., and de Souza, E.M., 2020, What did we learn from plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR)-grass associations studies through proteomic and metabolomic approaches? *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 607343. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.607343>.
- Baker, E.A., and Smith, I.M., 1977, Antifungal compounds in winter wheat resistant and susceptible to *Septoria nodorum*, *Analytical and Applied Biology*, 87, 67-73. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1977.tb00660.x>.
- Baldani, V.L.D., Alvarez, M.A., Baldani, J.A., and Döbereiner, J., 1986, Establishment of inoculated *Azospirillum* spp. in the rhizosphere and in roots of field-grown wheat and sorghum, *Plant Soil*, 90, 35-46.
- Bashan, Y., Holguin, G., and de-Bashan, L.E., 2004, *Azospirillum*-plant relationships: physiological, molecular, agricultural, and environmental advances (1997-2003), *Canadian Journal of Microbiology*, 50, 521-577. <https://doi.org/10.1139/w04-035>.
- Cassán, F.D., and Díaz-Zorita, M., 2016, *Azospirillum* sp. in current agriculture: From the laboratory to the field, *Soil Biology and Biochemistry*, 103, 117-130. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.08.020>.
- Chamam, A., Sanguin, H., Bellvert, F., Meiffren, G., Comte, G., Wisniewski-Dye, F., Bertrand, C., and Prigent-Combaret, C., 2013, Plant secondary metabolite profiling evidences strain-dependent effect in the *Azospirillum-Oryza sativa* association, *Phytochemistry*, 87, 65-77. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2012.11.009>.
- Copaja, S.V., Nicol, D. and Wratten, S.D., 1999, Accumulation of hydroxamic acids during wheat germination, *Phytochemistry*, 50, 17-24. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(98\)00479-8](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(98)00479-8).
- Díaz-Zorita, M., and Fernández-Canigia, M.V., 2009, Field performance of a liquid formulation of *Azospirillum brasilense* on dryland wheat productivity, *European Journal of Soil Biology*, 45, 3-11. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2008.07.001>.
- Döbereiner, J., Baldani, V.L.D., and Reis, V.M., 1995, Endophytic occurrence of diazotrophic bacteria in non-leguminous crops. In: Fendrik I, Del Gallo M, Vanderleyden J, de Zamaroczy M (eds) *Azospirillum* VI and related microorganisms. Springer, Berlin, pp 3-14.
- Escobar, C.A., Sicker, D., and Niemeyer, H.M., 1999, Evaluation of DIMBOA analogs as antifeedants and antibiotics towards the aphid *Sitobion avenae* in artificial diets, *Journal of Chemical Ecology*, 25, 1543-1554. <https://doi.org/10.1023/A:1020832731546>.
- Hanhineva, K., Rogachev, I., Aura, A. M., Aharoni, A., Poutanen, K., and Mykkanen, H. J., 2011, Qualitative characterization of benzoxazinoid derivatives in whole grain rye and wheat by LC-MS metabolite profiling, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59, 921-927. <https://doi.org/10.1021/jf103612u>.
- Hashimoto, Y., and Shudo, K., 1996, Chemistry of biologically active benzoxazinoides, *Phytochemistry*, 43, 551-559. [https://doi.org/10.1016/0031-9422\(96\)00330-5](https://doi.org/10.1016/0031-9422(96)00330-5).
- Hu, L., Robert, C.A.M., Cadot, S., Zhang, X., Ye, M., Li, B., Manzo, D., Chervet, N., Steinger, T., van der Heijden, M.G.A., Schlaeppi, K., and Erb, M., 2018, Root exudate metabolites drive plant-soil feedbacks on growth and defense by shaping the rhizosphere microbiota, *Nature Communications* 9, 2738. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05122-7>.
- Hungria, M., Campo, R.J., Souza, E.M., and Pedrosa, F.O., 2010, Inoculation with selected strains of *Azospirillum brasilense* and *A. lipoferum* improves yields of maize and wheat in Brazil, *Plant Soil*, 331, 413-425. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0262-0>.
- Jourdan, E., Ongena, M., and Thonart, P., 2008, Molecular characteristics of the rhizobacteria triggered plant immunity, *Biotechnologie Agronomie Societe Et Environnement*, 12, 437-449.
- Lade, S. B., Roman, C., Cueto-Ginzo, A. I., Serrano, L., Sin, E., Achon, M. A., Medina, V., 2018, Host-specific proteomic and growth analysis of maize and tomato seedlings inoculated with *Azospirillum brasilense* Sp7, *Plant Physiology and Biochemistry*, 129, 381-393. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.06.024>.
- Macias, F. A., Oliveros-Bastidas, A., Marin, D., Castellano, D., Simonet, A.M. and Molinillo, J.M.G., 2004, Degradation studies on benzoxazinoids. Soil degradation dynamics of 2,4-dihydroxy-7-methoxy-(2H)-1,4-benzoxazin-3 (4H)-one (DIMBOA) and its degradation products,



- phytotoxic allelochemicals from Gramineae, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52, 6402–6413. <https://doi.org/10.1021/jf0488514>
- Martyniuk, S., Stochmal, A., Macias, F.A., Marin, D. and Oleszek, W., 2006, Effects of some benzoxazinoids on in vitro growth of *Cephalosporium gramineum* and other fungi pathogenic to cereals and on *Cephalosporium stripe* of winter wheat, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54, 1036–1039. <https://doi.org/10.1021/jf050901x>.
- Masayuki, S., Fujii, M., and Fujimaki, T., 2021, Increased benzoxazinoid (Bx) levels in wheat seedlings via jasmonic acid treatment and etiolation and their effects on Bx genes including Bx6, *Biochemistry and Biophysics Reports*, 27, 101059. <https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2021.101059>.
- Mishra, R. P. N., Singh, R. K., Jaiswal, H. K., Kumar, V., and Maurya, S., 2006, Rhizobium mediated induction of phenolics and plant growth promotion in rice (*Oryza sativa* L.), *Current Microbiology*, 52, 383–389. <https://doi.org/10.1007/s00284-005-0296-3>.
- Nakagawa, E., T. Amano, N. Hirai, and Iwamura, H., 1995, Non-induced cyclic hydroxamic acids in wheat during juvenile stage of growth, *Phytochemistry*, 38, 1349–1354.
- Neal, A.L., Ahmad, S., Gordon-Weeks, R., and Ton, J., 2012, Benzoxazinoids in root exudates of maize attract *Pseudomonas putida* to the rhizosphere, *PLoS ONE* 7(4): e35498. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0035498>.
- Oikawa, A., Ishihara, A., Hasegawa, M., Kodama, O., and Iwamura, H., 2001, Induced accumulation of 2-hydroxy-4,7-dimethoxy-1,4-benzoxazin-3-one glucoside (HDMBOA-Glc) in maize leaves, *Phytochemistry*, 56, 669–675. [https://doi.org/10.1016/s0031-9422\(00\)00494-5](https://doi.org/10.1016/s0031-9422(00)00494-5)
- Oikawa, A., Ishihara, A., Tanaka, C., Mori, N., Tsuda, M. and Iwamura, H., 2004, Accumulation of HDMBOA-Glc is induced by biotic stresses prior to the release of MBOA in maize leaves, *Phytochemistry*, 65, 2995–3001. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2004.09.006>.
- Okon, Y., and Kapulnik, Y., 1986, Development and function of *Azospirillum*-inoculated roots, *Plant Soil*, 90, 3–16.
- Osborn, A. E., Qi, X., Townsend, B., and Qin, B., 2003, Dissecting plant secondary metabolism-constitutive chemical defences in cereals, *New Phytologist*, 159, 101–108. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00759.x>.
- Park, W.J., Hochholding, F., and Gierl, A., 2004, Release of the benzoxazinoids defense molecules during lateral- and crown root emergence in *Zea mays*, *Journal of Plant Physiology*, 161, 981–985. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2004.01.005>.
- Ramamoorthy, V., Viswanathan, R., Raguchander, T., Prakasam, V., and Samiyappan, R., 2001, Induction of systemic resistance by plant growth promoting rhizobacteria in crop plants against pests and diseases, *Crop Protection*, 20, 1–11. [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(00\)00056-9](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(00)00056-9).
- Patriquin, D.G., Dobereiner, J., and Jain, D.K., 1983, Sites and processes of association between diazotrophs and grasses, *Canadian Journal of Microbiology*, 29, 900–915.
- Rozier, C., Erban, A., Hamzaoui, J., Prigent-Combaret, C., Comte, G., Kopka, J., Czarnes, S., and Legendre, L., 2016, Xylem sap metabolite profile changes during phytostimulation of maize by the plant growth-promoting rhizobacterium, *Azospirillum lipoferum* CRT1, *Metabolomics*, 6, 3. <https://doi.org/10.4172/2153-0769.1000182>.
- Singh, P., Shrivastava, A.K., Suman, A., Arya, N., Tiwari, P., Rai, R.K., Singh, J., and Singh, A.K., 2009, Allelopathic effects of hydroxamic acids from sugarcane leaves on germination and growth of crops, *Allelopathy Journal*, 23, 203–212.
- van Loon, L.C., Bakker, P.A., and Pieterse, C.M., 1998, Systemic resistance induced by rhizosphere bacteria, *Annual Review of Phytopathology*, 36, 453–83. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.36.1.453>.
- Vande Broek, A., Michiels, J., Van Gool, A., and Vanderleyden, J., 1993, Spatial-temporal colonization patterns of *Azospirillum brasilense* on the wheat root surface and expression of the bacterial nifH gene during association, *Molecular Plant-Microbe Interaction*, 6, 592–600.
- Villagrasa, M., Guillamón, M., Labandeira, A., Taberner, A., Eljarrat, E., and Barceló, D., 2006, Benzoxazinoid allelochemicals in wheat: distribution among foliage, roots and seeds, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54, 1009–1015. <https://doi.org/10.1021/jf050898h>.
- Wahlroos, O., and Virtanen, A.I., 1959, The precursors of 6-methoxy-benzoxazolinone in maize and wheat plants, their isolation and some of their properties, *Acta Chemica Scandinavica*, 13, 1906–1908.

Walker, V., Bertrand, C., Bellvert, F., Moenne-Loccoz, Y., Bally, R., and Comte, G., 2011, Host plant secondary metabolite profiling shows a complex, strain-dependent response of maize to plant growth-promoting rhizobacteria of the genus *Azospirillum*, *New Phytologist*, 189, 494–506. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03484.x>.

Walker, V., Couillerot, O., von Felten, A., Bellvert, F., Jansa, J., Maurhofer, M., Bally, R., Moënné-Loccoz., and Y, Comte, G., 2012, Variation of secondary metabolite levels in maize seedling roots induced by inoculation with *Azospirillum*, *Pseudomonas* and *Glomus* consortium under field conditions, *Plant Soil*, 356, 151–163. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0960-2>.



Ciencia Nicolaita 85

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

El abismo entre las propiedades de los micromateriales y nanomateriales

The abyss between the properties of micromaterials and nanomaterials

Gerardo A. Rosas Trejo

Para citar este artículo: Gerardo A. Rosas Trejo, 2022. El abismo entre las propiedades de los micromateriales y nanomateriales. Ciencia Nicolaita no. 85, 17-26. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi85.618>



Historial del artículo:

Recibido: 18 de abril de 2022

Aceptado: 15 de agosto de 2022

Publicado en línea: septiembre de 2022



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: grtrejo@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

El abismo entre las propiedades de los micromateriales y nanomateriales

The abyss between the properties of micromaterials and nanomaterials

Gerardo A. Rosas Trejo

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones en Metalurgia y Materiales. Edificio U, Ciudad Universitaria. Morelia, Michoacán, México.

Resumen

El desarrollo científico de los materiales ha estado a la vanguardia del desarrollo tecnológico en muchos campos de la ciencia, como la electrónica, la catálisis, el medio ambiente y ahora la medicina, entre otros. Durante el conocimiento básico de los materiales aparecen nuevas propiedades, conceptos y leyes que los rigen, encontrando prácticamente nuevas opciones para cualquier aplicación del desarrollo actual. Los nanomateriales abren una auténtica brecha en este campo debido a la gran diferencia de sus dimensiones con respecto a los micromateriales, acercándonos al control y manipulación de los átomos en el sólido, lo que sin duda permite ajustar sus propiedades y aplicaciones. Este artículo trata sobre algunas diferencias en las propiedades existentes entre la microtecnología representada por los micromateriales y la nanotecnología impulsada por los nanomateriales.

Palabras Clave: Microtecnología, nanotecnología, micromateriales, nanomateriales, estructura.

Abstract

Scientific materials development has been at the forefront of technological development in many fields of science, such as electronic, catalysis, environment, and now medicine, among others. During the basic knowledge of materials, new properties, concepts, and laws governing them have been known, therefore new options for any application of the current development. Nanomaterials open a genuine gap in this knowledge field due to the significant differences about dimensions concerning micromaterials, bringing us closer to the control and manipulation of atoms in the solid, which undoubtedly allows the adjustment of their properties and applications. This article deals some differences between microtechnology represented by the micromaterials and nanotechnology driven by the nanomaterials.

Keywords: Microtechnology, nanotechnology, micromaterials, nanomaterials, structure.

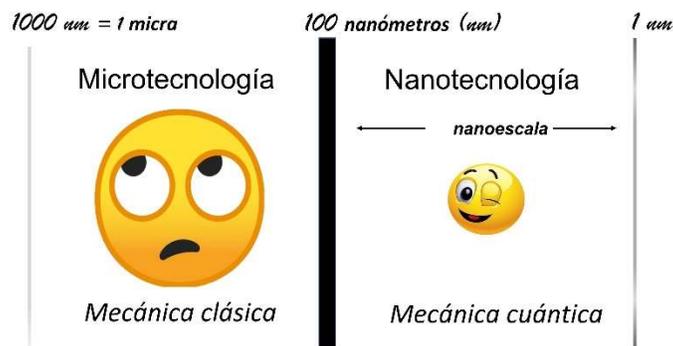


Figura 1. La línea que divide las características entre los micromateriales y nanomateriales.

Introducción

Con el desarrollo de la nanociencia y nanotecnología se abre una gran brecha natural en el estudio del estado sólido, que separa a los campos existentes entre los micromateriales y los nanomateriales. Se trata de una gran línea divisoria trazada por el desarrollo científico, marcada por la aguda diferencia de dimensiones y el cambio en las leyes que rigen las propiedades entre aquellos sólidos micrométricos y nanométricos (Figura 1). Propiedades, conceptos, formas de investigar y desarrollo del conocimiento, distinguen este abismo en el campo. La visión de esta brecha conceptual justo establece la comprensión entre las diferencias entre el comportamiento de la mecánica clásica y la mecánica cuántica (Kulkarni *et al.*, 2015). Esta gran brecha también separa o separará como siempre, a los países desarrollados de los emergentes.

Las llamadas nanociencias y nanotecnologías se encuentran relacionadas con muchas áreas del conocimiento, entre las que se encuentran las ciencias básicas, la electrónica, medio ambiental y la ciencia de los materiales (Roco *et al.*, 1999). Debe notarse que conceptualmente, en el estado sólido al hablar de las ciencias básicas se decía; matemáticas por ahí, física por acá, química más allá, biología, etc. No obstante, ahora en la nanociencia todas ellas se juntan para explicar los fenómenos que suceden en esta escala (Figura 2).

Con el desarrollo en el campo de la ciencia de los nanomateriales, no se presenta ningún cambio en los métodos de estudio, se espera encontrar nuevas y sobresalientes propiedades en cada nuevo material, ya que siempre han influido en el desarrollo tecnológico de muchas áreas, donde también algunas aplicaciones novedosas surgen día con día. Esta tendencia

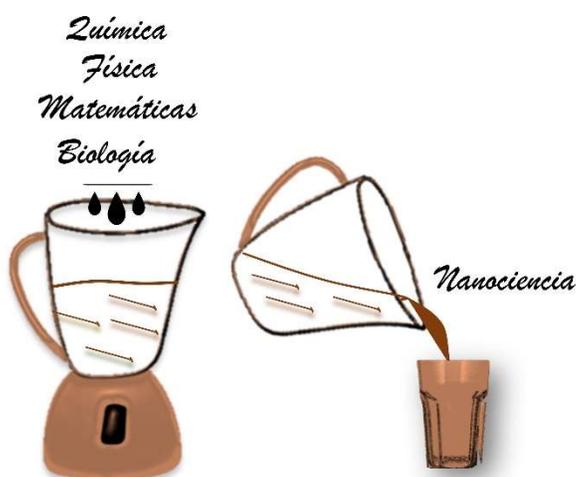


Figura 2. El gran conjunto de las ciencias básicas contribuyendo en la nanotecnología.

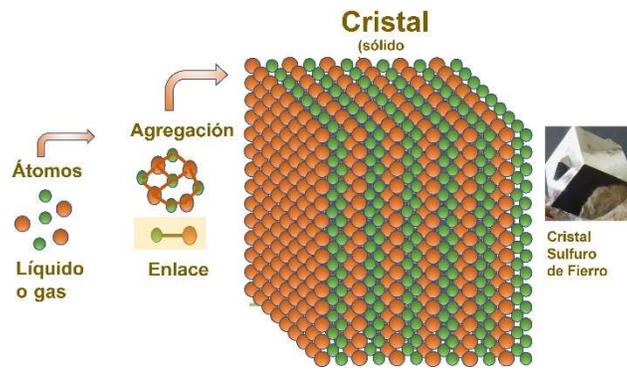


Figura 3. Agregación de los átomos para formar el cristal.

es una buena razón para que la nanociencia y la nanotecnología sean una sobresaliente área de exploración, innovación e inversión.

Cristales, el estado más común de agregación de átomos en la materia

Hagamos referencia a esas propiedades que marcan el desarrollo tecnológico en esta área. Comenzaremos por algo básico, recordar qué es un cristal. Un cristal es el estado más frecuente de agregación de la materia (los átomos), o bien los átomos se unen repetitivamente para formar el cristal (Figura 3). Como consecuencia del empaquetamiento repetitivo de esos átomos en el cristal, exhibirán propiedades de simetría, como caras planas y aristas bien rectas, como lo apreciamos en el cristal natural de sulfuro de hierro que aparece en la Figura 3.

Ahora bien, si observamos bajo un microscopio un fragmento de una mesa metálica o de un cuchillo de

mesa, lo más seguro es que descubramos los cristales que los componen (ver Figura 4a, cada segmentito es un cristal). Gran parte del estado sólido está representado por la integración de estos cristales, por ejemplo, la tierra, los metales, algunos plásticos, etc. Se debe hacer mención que los cristales cuando se encuentran como individuos (no como en el ejemplo del cuchillo mencionado) se desarrollan alcanzando un orden y simetría atómica, adoptando alguna forma simétrica, por ejemplo, cúbica (Figura 4b), en donde su característica inherente, son sus múltiples caras o planos y ejes de simetría.

En el ejemplo del cuchillo o de la mesa no se desarrollan esas características del cristal individual, porque cuando crecen todos juntos, cada uno representa un obstáculo para los demás, frenándose ese crecimiento entre todos y como consecuencia se presenta una interfase entre ellos llamada frontera cristalina (representada por la línea azul en la Figura 4a). Por tanto, en el proceso metalúrgico, donde muchos

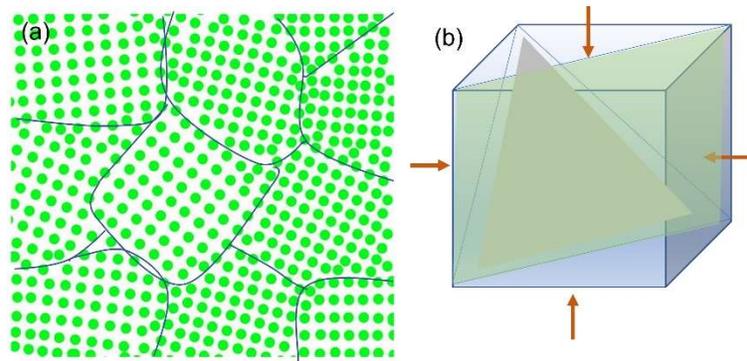


Figura 4. (a) Arreglo microscópico de los cristales en cualquier sólido metálico fabricado. Las líneas azules representan las fronteras entre los cristales crecidos, es en realidad el tope de crecimiento de cada cristal impedido por otros cristales, b) Forma cúbica de un cristal individual crecido, las flechas indican las diferentes caras de ese cristal. La forma individual de un cristal en su mínima expresión de volumen es llamada celda unitaria de ese cristal, la cual es extremadamente pequeña y se reproduce infinitamente en los ejes X, Y y Z formando el cristal crecido. Obviamente sino hubiera fronteras el cristal estaría mostrando esas facetas que se muestran con las flechas en esta figura, empero, habiendo fronteras el cristal es irregular en la periferia como se muestra en el inciso (a).

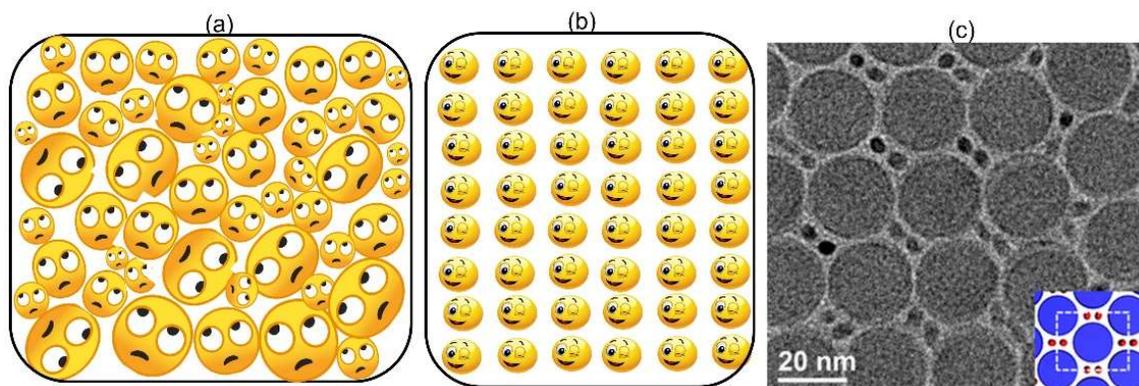


Figura 5. Analogía de la diferencia en la distribución de los cristales entre (a) un sólido micrométrico, se muestra en forma de caras a los cristales representativamente que se encuentran desorientados en un sólido micrométrico, tienen diferencias en tamaño y están en contacto por causa de la existencia de la frontera de grano. (b) sólido nanométrico, en el nanomaterial, los cristales por ser individuos se logran orientar en la misma dirección, lo cual permite aprovechar al máximo sus propiedades anisotrópicas, no existen fronteras entre los cristales (no se tocan entre ellos), pero existen interfaces invisibles (surfactantes o substratos) que permiten mantener esa orientación entre los cristallitos, además, esos cristales cuentan con el mismo tamaño y forma. (c) imagen real de una red ordenada de nanocristales (8).

cristales crecen juntos, esto impedirá que se desarrolle la figura geométrica que caracteriza a los cristales individuales.

En realidad, el que tenga muchas caras el cristal se debe a que, en alguna vista simétrica del mismo (o cara), encontramos diferente cantidad y tipo de átomos que la constituyen. Es decir, cada cara tiene una densidad de átomos diferente, y no será lo mismo, medir esa propiedad cualquiera, por ejemplo, eléctrica, magnética, óptica o mecánica, a lo largo de cada cara del cristal, pues tendrán valores distintos, o sea que cada cara del cristal es única enfrente de esa propiedad, esto es llamado la anisotropía de los cristales.

Cristales en un sólido micrométrico

Imaginemos en una analogía de la figura 4a, que representamos de manera didáctica mediante la Figura 5a, el arreglo en que se encuentran los microcristales en un sólido, que es parte de la microtecnología, en donde, cada cara representa un microcristal. Se forman núcleos y crecen unidos, compartiendo parte de su superficie en su periferia. Como consecuencia, se pueden presentar diferentes tamaños, formas y se ubican relativamente desorientados entre ellos. Esto evita aprovechar al máximo desde el punto de vista físico o químico sus características anisotrópicas, ya que todos orientados en distintas caras, no podrán ofrecer su mejor valor en la dirección

que se aplique tal propiedad, sino que habiendo muchas caras desorientadas, el valor de esa propiedad será un promedio de los valores de todas las caras, lo que puede representar un desaprovechamiento en las propiedades de los cristales derivado del orden micrométrico que subyace a los micromateriales (ver figura 5a).

Cristales en un sólido nanométrico

Ahora bien, en los llamados nanomateriales al ser individuos esenciales *per se*, estos varían en apariencia y se configuran como el caso de la figura 5b. Cuando se fabrican los monocristales en un nanomaterial, pueden orientarse en alguna dirección preferente controlando el tamaño y posición para aprovechar al máximo sus propiedades anisotrópicas.

Esencialmente es como si se tratase de un material monocristalino, en el cual cada nanocristal (análogamente representado por cada cara), se encuentra bien dimensionado y ubicado en el espacio integrando el nanomaterial, efectivamente es un estado periódico en X, Y, y Z en el que encontramos a los nanocristales, semejante al arreglo periódico en el que se encuentran los átomos del cristal. En este campo se presentan los conceptos y tecnologías de crecimiento de nanocristales tales como: nanotecnología ordenada, ensamblado o autoensamblado, en donde la competencia es actualmente, adelantada, vigorosa y persistente (Tritschler *et al.*, 2015).

Nanoestructuras

Se considera una nanoestructura, todo aquel individuo o cristal, que contenga alguna de sus dimensiones en el estado nano, es decir menor a 100 nm. En ese sentido se expresa una clasificación muy importante existente entre los nanomateriales (Sun *et al.*, 2017). Los nanomateriales están formados de cristales tan pequeños que literalmente, los átomos se pueden contabilizar en ellos (Thompson *et al.*, 2002). En un sólido a esta escala, las propiedades comienzan a cambiar drásticamente debido a los efectos cuánticos; por ejemplo, la atracción de la gravedad desaparece; los nanosólidos se mantienen suspendidos en solución (Nagarajan *et al.*, 2008). En otro ejemplo, un metal puede ahora comportarse como semimetal (Kannan *et al.*, 2021).

Algunas propiedades físicas de los nanomateriales

Una característica fascinante de los nanomateriales es la ajustabilidad de sus propiedades, en donde al cambiar las dimensiones de la partícula, las propiedades del mismo sólido pueden ser manipuladas de acuerdo con el interés. Por ejemplo, en un semiconductor cambia la emisión de la luz con el tamaño del nanocristal (color de la fluorescencia), lo que al mismo tiempo puede utilizarse para identificar a la partícula como marcador en varios propósitos (Khan *et al.*, 2019). Además, habrá también cambios drásticos entre otros materiales. Por ejemplo, el carbón que todos conocemos por ser muy ligero y quebradizo se comporta de manera opuesta en el estado

nano (Eatemadi *et al.*, 2014), en donde el conjunto de sus enlaces atómicos contenidos en el cristal, se pueden doblar extremadamente como lo hace el pasado acero inclusive superando sus propiedades mecánicas (Figura 6). Otro efecto cuántico en la nanoscala se conoce como "túnelaje" o efecto túnel, que es el fenómeno que permite, bajo forma de accesorio, el funcionamiento de los microscopios electrónicos modernos de transmisión y de barrido, así como en las memorias flash que se utilizan en computación (Rabouw *et al.*, 2017).

Similarmente, debido a la reducción excesiva de tamaño de partícula entre 1-100 nm, el área superficial se incrementa drásticamente, en donde la proporción de átomos encontrados en la superficie al interior aumenta, al grado de cambiar las propiedades fisicoquímicas del sólido. Por ejemplo, el punto de fusión disminuye progresivamente y al mismo tiempo, la disponibilidad electrónica afecta la reactividad. Así las propiedades superficiales dominan en el nanomaterial (Girard *et al.*, 2011).

Desde hace alrededor de tres décadas en el campo de estudio de los nanomateriales, se acumula una gran investigación en donde, una amplia colección de diferentes formas, tamaños y configuraciones de nanomateriales se han desarrollado (Biswas *et al.*, 2005). A través de estos años, se expone el arte de controlar todos los aspectos físicos del cristal, contrario a lo que sucede en la microtecnología; lo cual evidentemente está relacionado con la manipulación de los átomos en esta escala (Barhoum *et al.*, 2022). Así el control de los procesos de síntesis y preparación de estos materiales se ha vuelto cada vez más

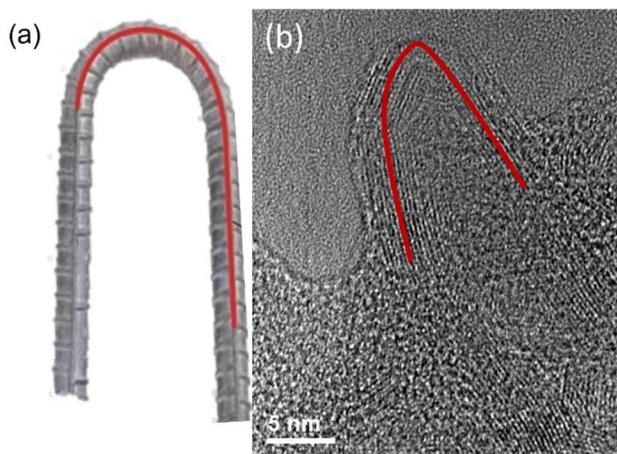


Figura 6 Átomos adoptando la forma de U en (a) nanotubo de carbón y (b) varilla de hierro (Patiño-Carachure *et al.*, 2020).

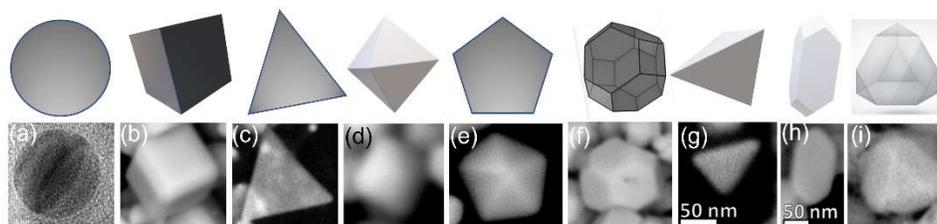


Figura 7. Diferentes formas sólidas de nanopartículas sintetizadas: a) esféricas (Landeros *et al.*, 2018), b) cúbicas (Aguilar *et al.*, 2019), c) triangulares (Herrero-Calvillo *et al.*, 2020 y Vidales *et al.*, 2017), d) octaédricas (Aguilar *et al.*, 2019), e) decaédricas (Mares-Briones *et al.*, 2017), f) cubo-octaédricas (Aguilar *et al.*, 2019), g) tetraédricas (Mares-Briones *et al.*, 2017), h) tetragonal deuteroprisma (Mares-Briones *et al.*, 2017) e i) tetraedro truncado (Aguilar *et al.*, 2019).

exigente y los resultados son en verdad ¡sorprendentes! Aunque los nanomateriales son utilizados también en forma desordenada, es decir, en donde sus dimensiones y posición dentro del sólido no son tan importantes en lo que es llamada la nanotecnología simple, aunque el manipular la formación de estos sólidos sigue siendo exigente.

Diversidad de nanomateriales

Las clasificaciones de los nanomateriales abundan. Solo en el campo de las nanopartículas (NPs) llamadas nanomateriales cero-dimensionales, se clasifican de acuerdo con la composición del material que la conforma: poliméricas, cerámicas, metálicas, de carbón, e híbridas (Chin *et al.*, 2022). Referente a su estructura pueden ser, de múltiple macla, macla simple, deformadas o cúbicas centradas en las caras (Esparza *et al.*, 2007). Con respecto a su forma las NPs pueden ser esféricas, cuadradas, octaedros, cubo-octaedros y huecas en cada una de las formas anteriores. Para darnos una idea de estas partículas algunos ejemplos se presentan en la Figura 7a-i, en donde en la parte superior aparece un esquema y en la inferior una imagen microscópica de cada una de ellas.

No obstante, un gran desarrollo en el estudio actual en este campo, son las NPs de configuración híbrida, en donde se encuentra que éstas se componen de dos o más tipos de nanopartículas. Aquí se ubican las NPs núcleo-coraza, núcleo con múltiple coraza, tipo mancuerna, frambuesa y parchadas, que pueden encontrarse en diferentes formas, sólidas y huecas (Figura 8). Estas partículas híbridas son el desarrollo más reciente que llama la atención, debido a sus múltiples funciones que pueden ejercer de acuerdo con la composición química y también a sus diferencias en forma, además del aumento en su área superficial.

En estas partículas hay verdaderamente una variedad de posibilidades de aplicación, dado que se pueden combinar partes orgánicas-inorgánicas, metálicas-metálicas, metálicas-semiconductoras y metálicas-cerámicas. Las funciones que pueden ejercer estas partículas van desde médicas como en terapia, transporte y entrega de fármacos, sensores y diagnóstico. Otras aplicaciones se encuentran en las áreas medioambientales, electrónica y en energía.

Por otro lado, está bien reconocido que los nanomateriales se exponen a transformaciones químicas que podrían cambiar sus propiedades, esto es obvio

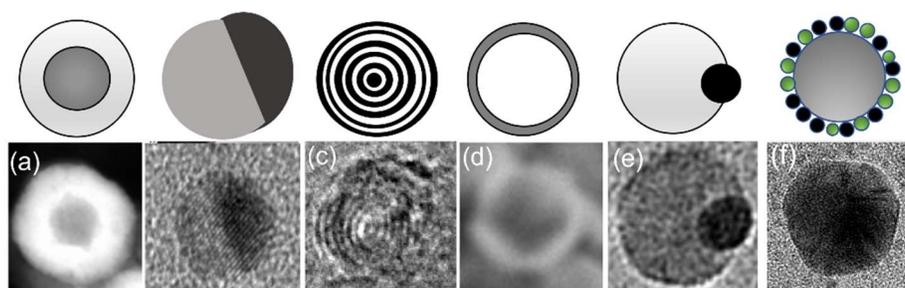


Figura 8. Diversas configuraciones existentes de nanopartículas híbridas: a) núcleo con una coraza (Higareda *et al.*, 2021 y Aguilar *et al.*, 2012), b) doble cara, Janus (Vidales *et al.*, 2017), c) multicoraza (Patiño-Carachure *et al.*, 2017), d) esférica hueca (Aguilar *et al.*, 2019), e) mancuerna (Ruíz-Baltazar *et al.*, 2015) y f) satelitales (Vidales *et al.*, 2017).

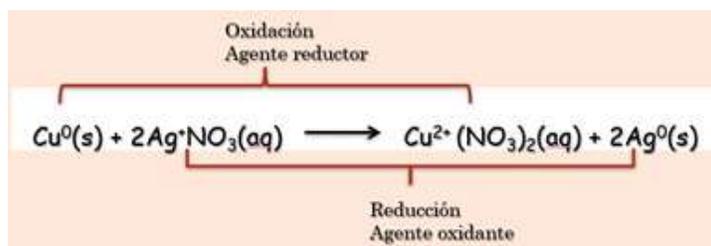


Figura 9. Reacción de intercambio galvánico para la síntesis de Nps del tipo núcleo-coraza.

desde el punto de vista que todas las reacciones suceden en forma iónica. Sin embargo, las NPs al ser tan pequeñas pueden reaccionar fácilmente transformándose de unos materiales a otros y por lo tanto, en forma paralela, esto permite controlar las características de los nanocrisales. Los fenómenos como el intercambio galvánico y el efecto Kirkendall (Anderson et al., 2014), que ya eran conocidos, pero que se acentúan en el estado nano se han aprovechado para formar múltiples reacciones entre los sólidos y controlar la composición y características físicas de los nanocrisales (Anderson et al., 2014). Para estos casos, además de las diferencias en los potenciales de ionización, influyen como siempre el pH del medio, la polaridad del disolvente, temperatura, etc. La figura 9 muestra un mecanismo clásico del efecto galvánico entre dos metales en solución, para formar partículas del tipo núcleo-coraza. En esta reacción espontánea participan nanopartículas de Cu, en cuya superficie los átomos se oxidan por la diferencia el potencial iónico de la plata (Ag), depositándose unos cuantos átomos de Ag sobre la superficie de Cu (Aguilar et al., 2012) y desalojando átomos de Cu del sólido a la solución.

Conclusiones

Cómo se deduce del avance del estudio de los materiales, el campo de estudio de la nanotecnología es una oportunidad en donde una simple e intuitiva aproximación se impone: “no se ve que hay, pero es probable que haya”, y no debemos escapar las ventajas que ofrece, dado que siempre esperamos encontrar algo nuevo y maravilloso que nos haga ser partes del descubrimiento en la existencia implícita.

Referencias

Aguilar Hernández, M. S., 2012, Estructura y morfología de nanopartículas Cu-Ag sintetizadas por cementación

MSc: tesis Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas. 45 p.

Aguilar, M. S., & Rosas, G., 2019, Facile synthesis of Cu₂O particles with different morphologies. *Journal of Solid-State Chemistry*, 270, 192-199. ISBN: 00224596 (print), ISBN: 1095726X (web).

<https://doi.org/10.1016/j.jssc.2018.11.019>

Aguilar, M. S., Esparza, R., & Rosas, G., 2019, Time-dependent facile synthesis of CuO hedgehog-like nanostructures and their catalytic activity. *Journal of Solid State Chemistry*, 277, 46-53. ISBN: 00224596 (print), ISBN: 1095726X (web).

<https://doi.org/10.1016/j.jssc.2019.05.034>

Anderson, B. D., & Tracy, J. B., 2014, Nanoparticle conversion chemistry: Kirkendall effect, galvanic exchange, and anion exchange. *Nanoscale*, 6, 21, 12195-12216. ISSN: 20403364 (print) ISSN: 2009-2020 (web).

<https://doi.org/10.1039/C4NR02025A>

Barhoum, A., García -Betancourt, M. L., Jeevanandam, J., Hussien, E. A., Mekkawy, S. A., Mostafa, M., & Bechelany, M., 2022, Review on Natural, Incidental, Bioinspired, and Engineered Nanomaterials: History, Definitions, Classifications, Synthesis, Properties, Market, Toxicities, Risks, and Regulations. *Nanomaterials*, 12, 2, 177. ISSN 2079-4991 (web)

<https://doi.org/10.3390/nano12020177>

Biswas, P., & Wu, C. Y., 2005, Nanoparticles and the environment. *Journal of the air & waste management association*, 55, 6, 708-746. ISSN 1096-2247 (print), ISSN 2162-2906 (web).

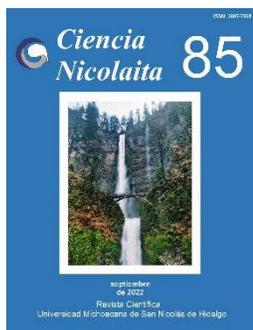
<https://doi.org/10.1080/10473289.2005.10464656>

Chin, B. L., Juwono, F. H., & Yong, K. S., 2022, Nanotechnology and Nanomaterials for Medical Applications. *Nanotechnology for Electronic Applications*, 63-87. Springer, Singapore. ISSN 2524-5384 (print), ISSN 2524-5392 (web).



- Eatemadi, A., Daraee, H., Karimkhanloo, H., Kouhi, M., Zarghami, N., Akbarzadeh, et al. 2014, Carbon nanotubes: properties, synthesis, purification, and medical applications. *Nanoscale Research Letters*, 9, 393, 1-13. 1556-276X (web) <https://doi.org/10.1186/1556-276X-9-393>
- Esparza Muñoz R. A., 2007, Estudio de materiales nanoestructurados para su aplicación en una celda de combustible tipo PEM: Dc Thesis, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas. 56 p.
- Girard, H. A., Petit, T., Perruchas, S., Gacoin, T., Gesset, C., Arnault, J. C., & Bergonzo, P., 2011, Surface properties of hydrogenated nanodiamonds: a chemical investigation. *Physical chemistry chemical physics*, 13(24), 11517-11523. ISSN 1463-9076 (print), ISSN 1463-9084 (web). <https://doi.org/10.1039/C1CP20424F>
- Herrero-Calvillo, R., Santovena-Urbe, A., Esparza, R., & Rosas, G., 2020, A photocatalytic and electrochemical study of gold nanoparticles synthesized by a green approach. *Materials Research Express*, 7, 1, 015019. ISBN: 2014-2020
- Higareda, A., Rosas, G., Pérez, R., & Esparza, R., 2021, Characterization and Electrocatalytic Features of PtPd and PdPt Bimetallic Nanoparticles for Methanol Electro-oxidation. *ChemNanoMat*, 7, 8, 958-965. ISSN: 2199692X (print) ISSN: 2199-692X (web). <https://doi.org/10.1002/cnma.202100109>
- Höller, R. P., Jahn, I. J., Cialla-May, D., Chanana, M., Popp, J., Fery, A., & Kuttner, C., 2020, Biomacromolecular-assembled nanoclusters: key aspects for robust colloidal SERS sensing. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12, 51, 57302-57313. ISSN: 1944-8244 (print); 1944-8252 (web). <https://doi.org/10.1021/acscami.0c16398>
- Kannan, K., & Yang, B. L., 2021, Metal-to-Semimetal Transition in Platinum Nanotubes: Dependence on Thickness. *Physical Chemical Letters*, 12, 9, 2183-2190 ISSN: 1089-5639 (print), ISSN: 1520-5215 (web) <https://doi.org/10.1021/acs.jpcllett.1c00166>
- Khan, I., Saeed, K., & Khan, I., 2019, Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian journal of chemistry*, 12, 7, 908-931. ISSN 1878-5352 (print), ISSN 1878-5379 (web) <https://doi.org/10.1016/j.arabj.2017.05.011>
- Kulkarni, S. K., & Kulkarni, S. K., 2015, Nanotechnology: principles and practices. Springer pp.1-29 ISBN 978-3-319-09170-9, ISBN 978-3-319-09171-6.
- Landeros Paramo J. L., 2018, Síntesis verde de nanopartículas TiO₂-Ag mediante extractos de *Origanum vulgare* y *Sedum praealtum*: MSc thesis, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas 34 p.
- Mares-Briones, F., & Rosas, G., 2017, Structure and stability of gold nanoparticles synthesized using *Schinus molle* L. extract. *Journal of Cluster Science*, 28, 4, 1995-2003. 1040-7278 (print) 1572-8862 (web). <https://doi.org/10.1007/s10876-017-1197-x>
- Nagarajan, R., 2008, Nanoparticles: building blocks for nanotechnology. ACS Symposium Series, 996, Chapter 1pp 2-14, ISBN-10: 146134770X, ISBN-13:978-1461347705.
- Patiño-Carachure, C., Flores-Chan, J. E., Gil, A. F., & Rosas, G., 2017, Synthesis of onion-like carbon-reinforced Al-CuFe quasicrystals by high-energy ball milling. *Journal of Alloys and Compounds*, 694, 46-50. ISSN: 1991-2021 (print) ISSN: 0925-8388 (web). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.09.261>
- Patiño-Carachure, C., Martínez-Vargas, S., Flores-Chan, J. E., & Rosas, G., 2020, Synthesis of carbon nanostructures by graphite deformation during mechanical milling in air. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 28, 11, 869-876. <https://doi.org/10.1080/1536383X.2020.1776264>
- Rabouw, F. T., & Mello Donega, C. D., 2017, Excited-state dynamics in colloidal semiconductor nanocrystals. *Photoactive Semiconductor Nanocrystal Quantum Dots*, Springer, Cham. *Top Current Chemistry* (Z) 374:58, ISBN 978-3-319-51191-7, ISBN 978-3-319-51192-4.
- Roco, M. C., 1999, Nanoparticles and nanotechnology research. *Journal of Nanoparticle Research*, 1(1), 1-6. ISSN: 1388-0764 (print); 1572-896X (web) DOI:10.1023/A:1010093308079
- Ruíz-Baltazar, A., Reyes-López, S. Y., Esparza, R., Estévez, M., Hernández-Martínez, Á., Rosas, G., & Pérez, R., 2015, Synthesis and characterization of bifunctional α -Fe₂O₃-Ag nanoparticles. *Advances in Condensed Matter Physics*, 2015. ISSN: 2199692X (print) ISSN: 2199-692X (web). <https://doi.org/10.1155/2015/320873>
- Sun, Z., Liao, T., & Kou, L., 2017, Strategies for designing metal oxide nanostructures. *Sci. China Mater.* 60, 1-24. ISSN:0024-9297 (print) 2199-4501 (web), <https://doi.org/10.1007/s40843-016-5117-0>
- Thompson, D., 2002, Nanotechnology: Basic science and emerging technologies. *Gold Bull* 35, 135-136 ISBN 1-58488-339-1, <https://doi.org/10.1007/BF03214856>

- Tritschler, U., Pearce, S., Gwyther, J., Whittell, G. R., & Manners, I., 2017, 50th anniversary perspective: Functional nanoparticles from the solution self-assembly of block copolymers. *Macromolecules*, 50, 9, 3439-3463. 0024-9297 (print) 1520-5835 (web). <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.6b02767>
- Vidales Rodríguez I. G., 2017, Biosíntesis y caracterización de nanopartículas bimetálicas de oro-paladio usando extracto de tamarix gallica para aplicaciones fotocatalíticas: MSc thesis Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas 85p.
- Zhou, L., Zhuang, Z., Zhao, H., Lin, M., Zhao, D., & Mai, L., 2017, Intricate hollow structures: controlled synthesis and applications in energy storage and conversion. *Advanced materials*, 29, 20, 1602914. ISSN: 0935-9648 (print). 1521-4095 (online). <https://doi.org/10.1002/adma.201602914>



Ciencia Nicolaita 85

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Estado del desarrollo y aplicaciones de la tecnología del concreto

Development status and applications of concrete technology

J.V. González-Aviña., L.G. López Yépez*, A. Durán-Herrera

Para citar este artículo: J.V. González-Aviña., L.G. López Yépez*, A. Durán-Herrera, 2022. Estado del desarrollo y aplicaciones de la tecnología del concreto. Ciencia Nicolaita no. 85, 27-43. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi85.619>



Historial del artículo:

Recibido: 11 de marzo de 2022

Aceptado: 28 de mayo de 2022

Publicado en línea: septiembre de 2022



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: llopezy@uanl.edu.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Estado del desarrollo y aplicaciones de la tecnología del concreto

Development status and applications of concrete technology

J.V. González-Aviña., L.G. López Yépez*, A. Durán-Herrera

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil, Departamento de la Tecnología del Concreto, Pedro de Alba S/N, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L., México.

Resumen

El concreto es uno de los materiales más utilizados en la industria de la construcción esto debido a la fácil consecución de los materiales que lo conforman y a su facilidad de fabricación. El estado actual de la tecnología de este material se ha podido alcanzar por la gran cantidad de trabajos desarrollados previamente en los diferentes materiales que lo integran, lo que ha permitido entender el funcionamiento de dichos componentes cuando al combinarse producen el concreto que se conoce hoy en día. En este trabajo se muestra la evolución del avance de los materiales con los cuales se fabrica el material hasta llegar a las características y aplicaciones de los concretos especiales que se usan actualmente.

Palabras clave: Tecnología del concreto, Concretos especiales, Componentes del concreto

Abstract

Concrete is one of the most used materials in the construction industry due to the easy availability of the materials that make it up and its easy manufacturing. The current status of the technology of this material has been achieved by the large number of works that have been previously developed in the different materials that compose it, which has allowed us to understand the operation of these components that, when they are mixed become the common known concrete. This work shows the evolution and changing materials in order to achieve manufactured material with characteristics and applications of the special concretes that are currently used.

Keyword: Concrete technology, special concrete, concrete compounds



1. Introducción

El concreto es uno de los materiales de construcción más antiguos y utilizado en el mundo (Kosmatka, 2016). Las razones de la permanencia del concreto a lo largo del tiempo han sido varias, pero entre las más importantes se encuentran la alta disponibilidad y el bajo costo de sus componentes. Además, la versatilidad y adaptabilidad del concreto han permitido, que el material pueda moldearse en una variedad de formas y tamaños para satisfacer requisitos arquitectónicos cada vez más retadores, y sus propiedades pueden ser optimizadas modificando su composición para cumplir con los requisitos ingenieriles. El concreto se ha considerado como un material que ha formado literalmente el “soporte” de nuestra sociedad moderna (Mindess, 2003), debido a que se puede decir con certeza que muchos de los logros de nuestra civilización han dependido de este material, al igual que muchos de los logros perdurables de las civilizaciones anteriores fueron posibles al uso de materiales cementantes que le precedieron al cemento portland con el que hoy en día se produce el concreto moderno. Aun hoy en día, las mejoras en el desempeño del concreto se basan en algunas tecnologías muy utilizadas por culturas antiguas, como lo son los materiales cementantes.

1.1 Desarrollo histórico de los cementantes

A lo largo de la historia del ser humano, se han utilizado una variedad de materiales cementantes de diferente naturaleza. Para darle una visión más clara sobre la importancia de los cementantes en el desarrollo de la Tecnología del Concreto, en este trabajo, se presenta una revisión del desarrollo de cementantes a base de compuestos de cal (cementos calcáreos), así como de los cementos hidráulicos que son aquellos cementos calcáreos que reaccionan químicamente con el agua para endurecerse y formar un producto resistente al agua, debido a que estos cementantes son los precursores del concreto moderno.

1.1.1 Cementos no-hidráulicos. Los primeros materiales cementantes calcáreos que se utilizaron fueron el yeso y la caliza. El primer uso de un "protoconcreto" se remonta al Neolítico, en una época en la

que los seres humanos vivían en cuevas naturales de piedra caliza (Malinowski, 1991). El descubrimiento de las propiedades cementantes de la cal, se dio probablemente cuando se utilizaba fuego para calentar la cueva o simplemente cocinar. Debido a que, la cal calcinada se hidrata muy fácilmente en presencia de agua y se endurece en el aire. La producción de cal es bastante simple, el proceso implica el calentamiento de piedra caliza hasta 850°C, una temperatura que se obtiene fácilmente quemando madera. La cal calcinada o cal viva al hidratarse únicamente necesita del CO₂ presente en la atmosfera para transformarse en carbonato de calcio y endurecer.

El mortero de cal fue utilizado en Egipto solo en la época de la ocupación romana, sin embargo, su uso se dio con anterioridad en Creta, Chipre, Grecia y el Medio Oriente (6000-12,000 A.C.) (Gourdin, 1975). El mortero se preparaba utilizando piedra caliza calcinada con arena. Los griegos usaban una proporción de arena a cal de 1:7, mientras que los romanos usaban en su mezcla una proporción de 2:1 o incluso 3:1. Los romanos perfeccionaron el arte de la preparación de morteros de cal, observando el beneficio del mezclado y del apisonamiento del material. Sin embargo, uno de los principales inconvenientes de la cal como cementante, es que en servicio pierde parte de su resistencia cuando entra en contacto con el agua, debido a su disolución parcial. Este inconveniente, ha limitado el uso de la cal en la construcción, y ha puesto atención esencialmente en las condiciones ambientales de exposición del material.

El yeso desde el punto de vista de procesamiento, es el material de construcción más simple. Las propiedades cementantes del yeso se descubrieron hace 10,000 a 20,000 años (Stark, 1999). Sin embargo, la fecha precisa del descubrimiento es difícil de establecer, debido a la falta de durabilidad del yeso en un ambiente húmedo. La producción del yeso es bastante simple, los depósitos de yeso se encuentran en muchos lugares en la superficie terrestre debido a que son el resultado de la evaporación de lagos o mares. La deshidratación del yeso requiere un calentamiento a bajas temperaturas, entre 120 y 160° C, y su rehidratación ocurre en cuestión de minutos a temperatura ambiente. El endurecimiento del mortero de yeso, se debe a la recombinación del yeso

calcinado con el agua de cristalización que había sido expulsada durante el proceso de calcinación, esto ocasiona la rehidratación del yeso, lo que forma una microestructura de agujas entrelazadas, que le dan resistencia a las pastas o morteros producidos con este material.

Muchos estudios arqueológicos han demostrado que los egipcios usaban yeso como cementante en morteros. Los egipcios utilizaron los morteros de yeso en la construcción de la pirámide de Keops (3000 A.C.; Regourd, 1988). El mortero se preparaba utilizando yeso impuro calcinado y arena, el cual al mezclarse con una pequeña cantidad de agua endurecía. Actualmente, el yeso es principalmente utilizado como material decorativo debido a que tiene una debilidad como material de construcción ya que pierde casi toda su resistencia en condiciones de humedad por ser altamente higroscópico en ambientes muy húmedos lo que lo disuelve de manera rápida.

1.1.2 Cementos hidráulicos. La cal hidráulica se obtiene a partir de la calcinación de la piedra caliza que contenía impurezas arcillosas. Además, las civilizaciones antiguas observaron que al añadir estas calizas finamente molidas a una mezcla de cal hidráulica y arena, producían morteros que no solo eran más resistentes que los morteros de cal, sino que también eran resistentes al agua. Por su lado, los griegos utilizaron una ceniza volcánica de la isla de Santorini (Metha, 1981). Así mismo los fenicios utilizaron los desechos de la arcilla cocida (Papadakis, 1970) y los Romanos en cambio utilizaron una ceniza volcánica encontrada alrededor de la bahía de Nápoles, a la que generalmente se llamaba puzolana por su cercanía al pueblo Pozzuoli (Vitruvius, 2017). Es el nombre moderno de esta ciudad el que se ha adoptado para darle el nombre de puzolana a los materiales que en presencia de humedad e hidróxido de calcio contribuyen a incrementar la resistencia y el nivel de densificación del compuesto, lo que conduce a una mayor durabilidad. Una puzolana es un material natural que reacciona con la cal hidratada a temperatura ambiente para formar silicato de calcio hidratado insoluble, con estructura química similar a los que resultan por la hidratación del cemento Portland. Los romanos entendieron muy bien el potencial económico y militar de la cal hidráulica y lo utilizaron en todo su imperio, permitiendo construir carreteras, puentes y revestir acueductos. Los romanos utilizaron estos

morteros hidráulicos para hacer una forma de concreto. Un ejemplo es el Panteón de Agripa, el cual fue construido principalmente con concreto de cal hidráulica en el siglo II, y actualmente es la estructura mejor conservada del mundo antiguo (Mark, 1986).

En general, el conocimiento de la tecnología para la producción y utilización de los materiales cementantes disminuyó a lo largo de la Edad Media, lo cual se debió a que se perdió el arte de quemar cal y la adición puzolanica. No fue sino hasta el siglo XVIII que se comenzó a trabajar para tratar de comprender la naturaleza de estos materiales cementantes. En 1756, John Smeathon, tras recibir el encargo de reconstruir el faro de Eddystone, ubicado en la costa Cornualles en Inglaterra, reconoció que los morteros de cal no resistirían la acción del agua (Bogue, 1952). Smeathon llevó a cabo una extensa serie de experimentos con diferentes calizas y puzolanas, y encontró que las mejores calizas para su uso en morteros eran las que contenían una alta proporción de material arcilloso. Finalmente, Smeathon utilizó un mortero preparado a partir de una cal hidráulica mezclada con puzolana importada de Italia. El faro de Eddystone, así reconstruido, se mantuvo durante 126 años antes de ser reemplazado por una estructura más moderna.

1.1.3 Desarrollo del cemento Portland. Después del trabajo de investigación de Smeathon, siguieron otros descubrimientos que sucedieron con bastante rapidez (Aitcin, 2008). En 1796, James Parker obtuvo una patente en Inglaterra sobre un cemento hidráulico natural, que fue producido a partir de la calcinación de la piedra caliza impura que contenía arcilla. En 1813, Vicat preparó en Francia cal hidráulica artificial calcinando mezclas sintéticas de calizas y arcillas. Asimismo, James Frost introdujo el mismo enfoque en Inglaterra en 1822 y finalmente, Joseph Aspdin en 1824 obtuvo una patente de cemento Portland. El nombre Portland fue acuñado por Aspdin debido a la similitud en la coloración del cemento endurecido con el de la piedra caliza de origen natural extraída en la isla de Portland, Inglaterra. El cemento producido por Aspdin se preparó mezclando un poco de piedra caliza y arcilla finamente molidas, las cuales fueron llevadas a un horno hasta eliminar el CO₂. Posteriormente, esta mezcla se molió finamente y se usó como cemento. Alrededor del año 1900, el qui-

mico francés Giron tuvo la idea de agregar yeso durante la molienda del clinker para controlar el fraguado y el endurecimiento del cemento Portland (Candlot, 1906). Esta es la última gran innovación química en el proceso de fabricación del cemento Portland. Actualmente, la fabricación de cemento Portland sigue siendo un proceso simple, que resulta al proporcionar una mezcla de cal, sílice, alúmina y óxido de hierro, para posteriormente someterla a una temperatura de aproximadamente 1450 °C, con el fin de transformar estos cuatro óxidos principales en las cuatro fases reactivas que en esencia constituyen al cemento Portland. La invención del cemento Portland permitió fabricar un cementante artificial capaz de endurecerse bajo el agua, con el que es posible producir una roca artificial endurecida con cualquier forma deseada.

2. Materiales del concreto

El concreto hidráulico se ha definido como un material bifásico, que consiste esencialmente de una matriz cementante, que aglutina una mezcla de agregados pétreos a los que también se les refiere como el esqueleto granular del concreto. El esqueleto granular se puede obtener a partir de diferentes tipos de materiales, utilizándose ya sea arenas y rocas naturales o materiales producto de la trituración. Como aglutinante normalmente se utiliza el cemento portland y en algunas ocasiones materiales cementantes suplementarios con actividad puzolánica.

Actualmente, el concreto base cemento Portland es utilizado en aproximadamente el 95% de las aplicaciones de la industria de la construcción (Epa, 2022) y normalmente está conformado por cemento Portland, agua, aditivos y un esqueleto granular compuesto por arena (agregado fino) y grava (agregado grueso). Con los avances recientes en la tecnología del concreto, la optimización del desempeño del concreto se ha dado gracias al surgimiento de los aditivos súper-fluidificantes o súper-reductores de agua, que permiten producir concretos con matrices más densas y con una consistencia apropiada para la colocación adecuada del concreto.

2.1 Aditivos

En los últimos años, los aditivos químicos se han convertido en un componente fundamental en la

producción del concreto hidráulico (Aci committee 212, 2016). En la actualidad, el mercado de los aditivos químicos representa 15.4 billones de dólares anuales, y para 2027 se proyecta un crecimiento del 4.8% (Grand View Research, 2020). La actual demanda de los aditivos químicos, ha sido originada por la necesidad de producir concretos con propiedades superiores, que permitan su uso en múltiples aplicaciones de la industria de la construcción. En la industria del concreto, la implementación de los aditivos químicos ha beneficiado numerosas áreas, como (ACI Committee 130, 2018): (i) en la producción del concreto, al disminuir el contenido de agua y cemento; (ii) en la construcción, al reducir el consumo de energía durante los procesos de colocación, compactación, acabado, y curado del concreto; (iii) en la vida de servicio de las estructuras, al incrementar la durabilidad del concreto. Desde la antigüedad, los aditivos han sido utilizados con la finalidad de mejorar el comportamiento de los materiales de construcción. Cientos de años A.C., algunos romanos reportaron el uso de aditivos a partir de sangre de animal, leche, y huevos como aditivos incorporadores de aire, reductor de agua, y plastificante en la producción de morteros de cal-puzolanas (Aitcin, 2018, Vazquez, 2016). Por otro lado, se establece la posibilidad de que los aztecas utilizaron el mucílago de nopal, principalmente para mejorar la plasticidad, y disminuir la porosidad en morteros de yeso con cal (Cárdenas, 1998). Otras civilizaciones antiguas, también utilizaron aditivos de base animal como la orina, los huevos, y la manteca de cerdo, y aditivos de base vegetal como la madera, paja, y corteza (Cárdenas, 2015). Sin embargo, fue hasta el siglo XX con el comienzo de la era de los aditivos, que estos materiales se utilizaron en gran escala, entre los que se puede mencionar el lignosulfonato (1920s), el lignito (1940s), la goma xantana (1960s), los éteres de celulosa (1970s), y el ácido poliaspártico (1990s) (Plank, 2004, Gelardi, 2016). Actualmente, hay países donde casi todos los concretos contienen al menos uno o varios aditivos. A continuación, haremos una revisión de los principales aditivos utilizados en el concreto y las principales ventajas que han representado para el desarrollo de la tecnología del concreto.

2.1.1 Aditivos reductores de agua. Un aditivo reductor de agua es un material que se utiliza con el fin de reducir la cantidad de agua de mezcla necesaria

para producir concreto de una consistencia determinada, ya que el reducir la cantidad de agua en un concreto, sin que se modifique la consistencia conducirá a densificar la matriz cementante y por tanto a incrementar tanto la resistencia, como la durabilidad (Gelardi, 2016). Las formulaciones de los materiales generalmente disponibles para su uso como aditivos reductores pueden incluir: (i) ácidos lignosulfónicos, sus sales y modificaciones; (ii) ácidos carboxílicos hidroxilados sus sales y modificaciones; (iii) compuestos a base de carbohidratos como azúcares, ácidos de azúcar y polisacáridos, (iv) sales de productos de policondensación de melamina sulfonada, (v) sales de productos de policondensación de naftaleno sulfonado, (vi) policarboxilatos, (vii) otros materiales. Los aditivos reductores de agua permiten reducir la relación agua/cemento, lo que favorece al incremento de resistencia y durabilidad.

2.1.2 Aditivos acelerantes. Un aditivo acelerante provoca un aumento en la tasa de hidratación del cemento hidráulico y, por lo tanto, acorta el tiempo de fraguado, aumenta la tasa de desarrollo de la resistencia del concreto, o ambos (Cheung, 2011). Los aditivos acelerantes se dividen en cuatro grupos: (i) los que contienen sales inorgánicas solubles, (ii) los que contienen compuestos orgánicos solubles, (iii) aditivos de fraguado rápido, (iv) diversos aditivos sólidos. Los aditivos acelerantes son esenciales en climas fríos, para acelerar el inicio de las operaciones de acabado, reducir el tiempo de acabado y reducir el tiempo requerido para un curado y protección adecuados. Por otra parte, los aditivos acelerantes permiten aumentar el nivel de resistencia inicial para permitir la remoción del cimbrado más temprano y disminuir el tiempo total de construcción.

2.1.3 Aditivos retardantes. Un aditivo retardante se utiliza con el propósito de retrasar el tiempo de fraguado del concreto (Marchon, 2016). Los materiales generalmente disponibles como aditivos retardantes caen en una de las cuatro categorías. Las formulaciones pueden incluir: (i) ácidos lignosulfónicos y sus sales y modificaciones y derivados de estos, (ii) ácidos carboxílicos hidroxilados y sus sales y modificaciones y derivados de estos, (iii) compuestos a base de carbohidratos como azúcares, ácidos de azúcar y polisacáridos, (iv) sales inorgánicas como boratos y fosfatos. Los aditivos retardadores, se utilizan principalmente para compensar el efecto acelerador de la

temperatura ambiente alta. Además, los retardantes permiten mantener el concreto trabajable durante el tiempo suficiente para que no se desarrollen juntas frías en los elementos estructurales de la construcción.

2.1.4 Aditivos modificadores de la viscosidad. Los aditivos modificadores de la viscosidad (VMA) suelen ser polímeros solubles en agua que se utilizan en el concreto para modificar sus propiedades reológicas (Khayat, 1998). Los materiales comúnmente utilizados como aditivos modificadores de la viscosidad son óxidos de polietileno, éteres de celulosa (hidroxietilcelulosa e hidroxipropilmetilcelulosa), alginatos (de algas marinas), gomas naturales y sintéticas, y poli-acrilamidas o alcohol polivinílico. El uso de los VMA puede hacer las mezclas más cohesivas y de esta manera evitar que las altas presiones en concretos bombeados puedan separar al mortero en la mezcla de concreto.

2.2. Aditivos minerales

Los aditivos minerales son materiales utilizados como remplazo/adición del cemento en una mezcla de concreto para mejorar sus propiedades (Liew, 2017, Khatib, 2016, Kim, 2016). Los aditivos minerales incluyen materiales que se dividen en cuatro tipos: (i) cementantes, (ii) puzolánicos, (iii) cementantes y puzolánicos, (iv) inertes químicamente. Algunos aditivos minerales típicos utilizados en el concreto son la ceniza volante, la escoria granulada de alto horno y el humo de sílice. Cada uno de estos aditivos minerales afecta las propiedades del concreto: (i) Las cenizas volantes son un subproducto de las plantas de energía que queman carbón. Las cenizas volantes se utilizan típicamente en una tasa de remplazo de 20 a 40% del cemento Portland ordinario. Las cenizas volantes pueden reducir la tasa de pérdida de revenimiento del concreto en condiciones de clima cálido. (ii) La escoria granulada de alto horno es un subproducto de la industria siderúrgica. La escoria se usa en una tasa de remplazo del 30 al 70% del cemento Portland ordinario. Si el concreto hecho con escoria se mezcla y se cura de manera apropiada, presentará características de desempeño mejoradas con respecto a la resistencia y la estructura de los poros, mejorando la durabilidad del material. (iii) El humo de sílice es un subproducto de la producción de silicio metálico o aleaciones de ferrosilicio, el cual se

usa típicamente a una tasa de reemplazo del 3 al 10% del cemento Portland ordinario. Este material se puede utilizar para aumentar la resistencia del concreto y reducir de manera significativa la permeabilidad del concreto.

3. Caracterización microestructural

La caracterización microestructural hoy en día está siendo utilizada para analizar los materiales desde el punto de vista químico como desde el estudio de la interacción que se está generando entre los materiales a niveles microscópicos. Entre ellas podemos mencionar la difracción de rayos X, la microscopía electrónica de barrido, la termogravimetría y la nanoindentación como unas de las técnicas más utilizadas en la industria para profundizar el estudio del concreto a nivel microscópico.

4. propiedades del concreto

4.1 En estado fresco.

El concreto en estado fresco se presenta de forma plástica como un compuesto fácilmente moldeable capaz de ser conformado en cualquier volumen para luego endurecer y de esta manera producir un elemento capaz de resistir cargas de manera confiable durante su vida de servicio. En estado fresco puede evaluarse mediante diferentes pruebas como la prueba de revenimiento, la cual da una idea de la medida de consistencia y es un indicador cualitativo de su trabajabilidad, así como de la energía/esfuerzo que requerirá el concreto para su manejo, colocación y compactación. El ensayo está basado en normas estándar en para el caso de México la normalización está referida a la NMX C-156, la prueba consiste en utilizar un cono metálico truncado de 10 cm de diámetro en su parte superior y de 20 cm en su base el cual se llena con el material con el objeto de que una vez el cono sea retirado se pueda medir una distancia entre una referencia ubicada a 30 cm de la base del cono y el centro desplazado del concreto. Otros ensayos como el de la temperatura, resultan muy importantes en aplicaciones en donde se tiene climas extremos menores de 5 °C en los cuales se puede retrasar los tiempos de fraguado del concreto y en temperaturas por arriba de 70 °C en donde el tiempo

de fraguado se puede acelerar, afectando el comportamiento de los concretos ya endurecidos si no se controla adecuadamente este parámetro.

Por otro lado, la determinación de la masa unitaria es indispensable para controlar la calidad en la producción del concreto, para verificar el volumen entregado, para controlar el peso volumétrico en concretos densos o ligeros y en controles de cantidades en la proporción del material. Hoy en día, la determinación del contenido de aire y los tiempos de fraguado se vuelven de suma importancia porque los concretos modernos, en su mayoría tienden a incorporar diversos aditivos químicos y minerales (cementantes suplementarios o puzolanas) que suelen incluir aire en el concreto y modificar en ocasiones de manera importante los tiempos de fraguado.

4.2 En estado endurecido.

Adicionalmente al desempeño del concreto en estado fresco, su desempeño en estado endurecido también es de suma importancia. En esta etapa de la vida del concreto, la propiedad que lo distingue es su resistencia a la compresión, la cual se obtiene al someter una probeta cilíndrica o cúbica a un ensayo de compresión uniaxial, este tipo de ensayos se vuelve importante porque es uno de los parámetros claves para el diseño estructural de las edificaciones. Otros ensayos no menos importantes que también se requieren en algunos procedimientos del diseño estructural son el módulo de elasticidad, la relación de Poisson y la resistencia a la flexión.

Como todos los materiales que se utilizan en la industria de la construcción, el concreto hidráulico y el acero de refuerzo que normalmente se utiliza en los elementos de concreto reforzado, también son susceptibles al ataque de agentes exógenos como los cloruros, la carbonatación, el sulfato, el ácido, la reactividad álcali-agregado, entre otros, los cuales pueden afectar el desempeño del material a través del tiempo. De acuerdo al ambiente en el que el concreto estará expuesto, la optimización de la proporción y las protecciones que deban implementarse podrán definirse midiendo el grado de afectación mediante evaluaciones como la prueba de carbonatación por fenoltaleína, la resistividad eléctrica, la penetración rápida de cloruros o ensayos de expansión por sulfato.

5. Nuevos concretos y las tendencias hacia el futuro

Hoy en día, a nivel global, la industria de la construcción trabaja en diferentes proyectos orientados a disminuir la huella de carbón, mediante la optimización de los procesos constructivos y la optimización del desempeño durante la vida útil de la infraestructura, incluyendo la demolición y el reciclaje. Para cumplir con este gran reto, la comunidad científica está desarrollando nuevos materiales de construcción que mejoran el comportamiento del concreto tradicional, otorgándole posibilidades de autoreparación, autolimpieza, autodetectabilidad de deficiencias, autocompactación, ultra alto desempeño en resistencia, durabilidad maximizada y posibilidades de imprimirse utilizando manufactura aditiva para proveer a la industria con concretos que contribuyen cada vez más con la tendencia mundial hacia la sostenibilidad integral de las actividades antropogénicas en armonía con un desarrollo sano de la vida en el planeta tierra. En este sentido, a continuación, haremos referencia a diferentes tecnologías que se han desarrollado para contribuir con este objetivo.

5.1. Concretos autoreparables

Con relación a la durabilidad de la edificaciones, hoy en día muchos reglamentos o códigos establecen periodos mínimos de 50 años para la vida útil de la estructuras, sin embargo un incidente común es que cuando los elementos estructurales resultan agrietados por causas diversas, la vida útil o de servicio se ve reducida por el ingreso de agentes exógenos que pueden propiciar el inicio de la corrosión del acero

de refuerzo y si no se genera el debido mantenimiento con ello conducir a una falla del elemento estructural, en ese sentido nuevos materiales como el concreto auto-reparable tiene como principal función el de auto-reparar fisuras con aberturas de alrededor de 0.9 mm (Wang, 2014), en este caso el mecanismo de auto-reparación involucra la hidratación continua de la matriz cementante o también la carbonatación mediante la cual los cristales de carbonato de calcio precipitan sobre la superficies de las fisuras como resultado de las reacciones químicas entre los iones calcio (Ca^{2+}) y el dióxido de carbono (CO_2) que se encuentra disponible en el agua alojada en el interior de la fisura (Roig, 2021, Magdalena, 2019). Ver figura 1.

La autoreparación por medio de agentes biológicos, tales como algunos tipos de bacterias que generan una precipitación de la calcita que involucra reacciones metabólicas con la fotosíntesis, como son la reducción de sulfatos, la hidrólisis de urea o la desnitrificación (Roig, 2021), las cuales permiten la autoreparación de fisuras tal y como se observa en la figura 1 y 2. Entre las bacterias que pueden generar el mecanismo antes mencionado están las *Sporosarcina pasteurii*, *Sporosarcina ureae*, y la *Bacillus sphaericus* entre otras, las cuales funciona mediante un proceso de hidrólisis de urea, o las que funciona mediante un proceso respiratorio como la *Bacillus subtilis* y la *Bacillus thuringiensis* entre otras (Roig, 2021).

5.2 Concretos autolimpiantes.

El continuo crecimiento de la población y de la actividad industrial ha provocado que los centros urbanos se vean afectados por el incremento gradual y

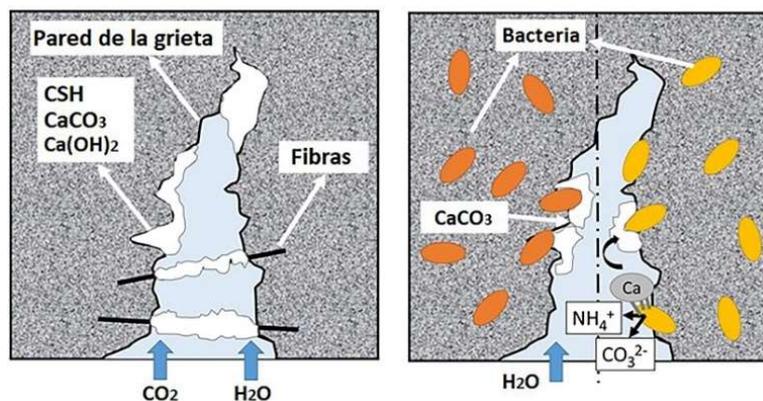


Figura 1. Autoreparación autógena y autónoma. (Magdalena, 2019).

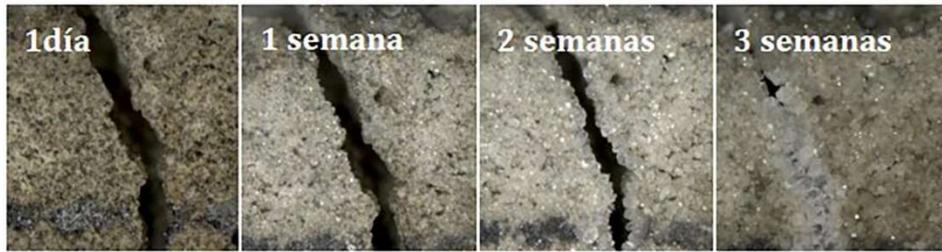


Figura 2. Autoreparación autónoma con bacterias. (Wang, 2014).

acelerado de la contaminación ambiental, problema que desde la Tecnología del Concreto se ha venido solucionando a través de los concretos autolimpiantes, los cuales por medio del principio de la fotocatalisis adquieren la posibilidad de autolimpiarse. Para este fin se utilizan partículas de TiO_2 que reaccionan con los rayos UV generando la descomposición de algunos materiales orgánicos de manera lenta y natural. En esta tecnología se utiliza la reacción del TiO_2 con la luz ultravioleta, debido a que este componente actúa como un catalizador que acelera la reacción química que finalmente permite limpiar el material y además ayuda con la reducción de contaminantes como los óxidos de nitrógeno (NO_x), los aromáticos, el amoníaco y los aldehídos. En el caso de los NO_x , estos son absorbidos en la superficie del concreto y transformados en iones no nocivos que permanecen bloqueados en forma de nitratos que posteriormente son eliminados de la superficie mediante la lluvia o por lavado, tal y como se puede observar en la figura 3 (Guerrini, 2018).

Este tipo de material fabricado con TiO_2 tiene como ventaja principal el ofrecer índices de reflectancia solar (SRI) más altos con tiempos más largos de servicio en comparación a los que ofrece el cemento Portland y el cemento blanco con SRI de 35 y 86 respectivamente. Lo que conduce al uso de materiales en la construcción que contribuyen a que las

edificaciones se mantengan frescas ante la luz solar, mejorando con ello la eficiencia energética en las construcciones, debido a que entre mayor sea el SRI en una superficie, menor será la energía térmica que dicha superficie transmita, mejorando de esta forma la mitigación de las islas de calor urbano.

5.3 Manufactura digital aditiva de impresión 3D en concreto.

En la mejora continua que impera en la industria de la construcción con relación al desempeño de los elementos estructurales, de manera permanente se trabaja en varias direcciones que persiguen su optimización microestructural, la mejora de sus propiedades mecánicas, elásticas y el satisfacer concepciones arquitectónicas cada vez más exigentes respecto a las propiedades ingenieriles del material, lo que implica que se eleven los costos de los encofrados cuando se requiere fabricar formas altamente complejas. Una alternativa para dar solución a este tipo de requerimientos aparece con el uso de modernas metodologías constructivas como la impresión 3D, la cual toma el mismo concepto que se aplica en la impresión convencional de polímeros a pequeña escala y la transforma en una forma constructiva no convencional de avanzada en el sector de la construcción. Llamada naturalmente manufactura digital en concreto (DFC), la industria con esta técnica tiene la

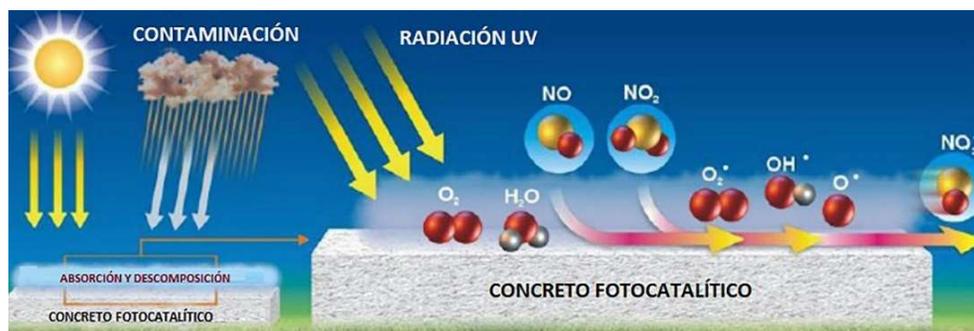


Figura 3. Proceso de fotocatalisis en el concreto. (Dženana, 2016).



Figura 4. Formas de DFC mediante CC. (Sculpteo, 2022).

posibilidad de trabajar cualquier forma compleja sin ningún problema, lo que conduce a optimizar los procesos constructivos, desde la etapa de diseño hasta el momento en donde la estructura se habilita para ser utilizada (Behrokh, 2004).

Una de las primeras técnicas utilizadas para realizar DFC es el Countour Crafting (CC) (Buswell, 2018), la cual busca una fabricación automatizada de estructuras completas y de sus subcomponentes, permitiendo construir una sola unidad habitacional o colonias de casas en una sola corrida, con distintos posibles diseños y formas complejas, según las necesidades arquitectónicas. Esta tecnología constructiva se aplica adicionando mediante fabricación aditiva capas de material cementante para crear superficies planas, suaves y precisas (Behrokh, 2004). (Ver figura 4).

Otra manera de imprimir digitalmente el concreto en 3D es la tecnología D-Shape, la cual trabaja depositando una primera capa de material granular mediante un pórtico, el cual deposita de igual forma el aglutinante en las áreas definidas por el diseñador

del proyecto a construir, la suma repetitiva de los pasos anteriores produce verticalmente la edificación diseñada previamente, unas veces que se termina el proceso anterior se comienza con la remoción del material granular mediante el uso de aspiradoras de alta potencia hasta que las formas arquitectónicas se hacen visibles. (Shape, 2022, Ming, 2016), Ver figura 5.

Este tipo de técnicas constructivas tienen como principales ventajas una mayor velocidad de construcción, menores costos en mano de obra y en cimbras, una mayor seguridad industrial para los trabajadores, así como también la consecución de procesos constructivos más sostenibles con base a diseños estructurales más eficientes, debido a que mediante esta tecnología es posible colocar el material en lugares específicos para la construcción de elementos con morfologías especiales, que permitan una distribución óptima de las capacidades estructurales y una mayor contribución a favor de la sostenibilidad. De igual manera también se reduce la generación de desechos de materiales en la obra permitiendo opti-



Figura 5. Proceso de impresión D-Shape. (Hamad, 2020).

mizar costos (Wangle, 2016). Por otro lado, esta tecnología también se presentan desventajas ya que por ser robotizada reducirá la necesidad de la mano de obra, lo que en el corto plazo puede detonar una problemática social al incrementar las tasas de desempleo; otra desventaja está relacionada con la calidad de los acabados en el producto final obtenido por la alta rugosidad que se genera durante el proceso de impresión, también se puede catalogar como desventaja el bajo alcance en la escala de las edificaciones tanto desde el punto de vista constructivo, como desde lo estructural. Por ahora una de las más importantes desventajas es el alto costo inicial de los equipos para realizar la impresión 3D, ya que en la actualidad puede ser prohibitivo para muchas regiones del mundo (El-Sayegh, 2020).

Desde el punto de vista de los materiales que se utilizan para construir mediante impresión 3D, es posible usar los componentes que se usan en la producción del concreto convencional (Rael, 2020), así como también los que se utilizan para fabricar sistemas conocidos como cementantes activados alcalinamente, entre los cuales se pueden mencionar combinaciones de escoria de alto horno, arena y silicato de sodio, entre otras (Ming, 2016).

En cuanto a su caracterización estado fresco este tipo de material se puede relacionar con el periodo de tiempo durante el cual el concreto puede ser usado (tiempo abierto) y su efecto en la bombeabilidad y en la extrusión, así como con el fraguado y el tiempo de ciclo por capa, el cual se relaciona con el tiempo requerido para completar una capa de fabricación [36]. Desde su estado endurecido es importante que el concreto impreso por 3D, tenga una buena adherencia entre las capas, por controles de durabilidad una adecuada densidad aparente, control en la retracción para mitigar la fisuración del elemento fabricado por exposición directa con el ambiente. La evaluación de la calidad del concreto ya colocado en la estructura aun representa un gran reto para el aseguramiento de la calidad y la optimización de la tecnología.

5.4 Concretos autocompactables

La continua necesidad de buscar materiales que mejoren los procesos constructivos en la industria de la construcción ha generado una evolución sustancial del concreto como material de construcción,

es de ahí que las nuevas tecnologías en aditivos y el estudio a profundidad de subproductos de industriales que pueden integrarse al concreto para mejorar sus propiedades, ha conducido a la producción de concretos con ciertas características mejoradas, respecto a los concretos convencionales, propiedades como alta resistencia, excelente desempeño ante la durabilidad, mejores facilidades en la colocación, mejor capacidad de relleno, baja segregación y excelentes acabados, son características de los concretos autocompactables, los cuales según su inventor, el profesor Okamura de la Universidad de Tokio, se define como concretos que sin presentar segregación o exudación, son capaces de fluir en el interior del cimbrado, relleno de forma natural el volumen del mismo, y pasar entre las barras de la armadura, sin otro medio de compactación durante su puesta en obra, consolidándose por su propio peso, de ahí que este concreto especial se ha convertido en el más utilizado a nivel mundial en grandes obras de infraestructura por su gran versatilidad en la colocación y sus excelentes acabados, entre muchos otros beneficios (Okamura, 2013). Ver figura 6.

Entre las principales ventajas de este tipo de concreto respecto al convencional se puede mencionar que se reduce el tiempo de colado por lo que se utiliza menor cantidad de equipos y menos mano de obra, también se mejoran los comportamientos mecánicos y la durabilidad del material, presenta una alta estética, con excelente acabado superficial, libre de defectos y manchas, mejora de la sostenibilidad, principalmente debido al uso efectivo de los subproductos y mejora sustancialmente el comportamiento reológico del material. Como desventajas podemos citar que se requiere un mayor control de calidad de los materiales, así como el alto costo en su producción (Researchgate, 2022).

5.5 Concretos de Ultra Alto desempeño

Entre los concretos más utilizados hoy en día en la industria de la construcción para dar soluciones especiales cuando se requiere fabricar elementos con propiedades mecánicas y de durabilidad mejoradas que conducen a soluciones con miembros estructural con menores dimensiones y a su vez menores costos de instalación y mano de obra, se puede encontrar al Concreto de Ultra Alto Desempeño (Abbas, 2016), conocido por sus siglas en inglés como UHPC el cual



Figura 6. Colado de un concreto Autocompactable. (Medium, 2022).

se define como un material base cemento con altas resistencias a la compresión, excelente durabilidad y adecuada ductilidad, caracterizados por contener altos contenidos de cementantes, muy bajas relaciones a/mc, por el uso de microsílíce, superplastificantes y/o fibras dúctiles. En este tipo de concreto de pueden encontrar resistencias a la compresión que van desde 120 a 150 MPa, resistencias a la flexión que oscilan entre 25 a 60 MPa, módulos de elasticidad de 40 a 60 GPa y energías de fractura de alrededor de 140 kJ/m². (Caijun, 2021), los cuales tienen como principios básicos para alcanzar los desempeños antes mencionados el tener muy bajas porosidades en su matriz cementicia, empaquetamiento controlado de sus componentes, adecuada homogeneidad, una correcta sinergia microestructural y como se dijo anteriormente muy bajas relaciones agua cemento, lo que le permite generar soluciones arquitectónicas y estructurales con desempeños mucho más prolijas que los del concreto convencional, tiene como principal desventaja los costos de producción razón por la

cual es utilizado en construcciones especiales en donde se requiere dimensiones en los elementos muy esbeltas.

6. Aplicaciones de los concretos especiales

Algunos de los concretos antes mencionados ya se pueden encontrar en aplicaciones a gran escala y en otros se está comenzando con su desarrollo. A continuación, se van a describir algunas de las aplicaciones más conocidas de los concretos especiales. Primero se hablará del concreto autoreparable, para el cual se pueden enunciar las aplicaciones siguientes:

Una construcción de una losa antiflotación (ver figura 7) en Brasil de 30 cm de espesor y 250 m², a la cual se le aplicó un aditivo químico (aditivo reductor de permeabilidad) conocido para promover el sellado de grietas de hasta 0.4 mm. [49] Una de las últimas aplicaciones de los concretos autoreparables con



Figura 7. Losa antiflotación. (Silva, 2016).



Figura 8. Losa de foso de inspección. (Van Mullem, 2020).

bacterias, es la losa de foso de inspección hidráulico en Amberes Bélgica (Van Mullem, 2020). Esta aplicación se puede observar en la figura 8.

Por otro lado, desde el punto de vista del concreto autolimpiante se tiene gran cantidad de aplicaciones entre las cuales se puede mencionar como la primera aplicación a gran escala la construcción de la iglesia “Dives in Misericordia “ubicada en Roma desde 1996. En México se tiene una aplicación de este tipo de concreto en el Hospital Dr. Manuel Gea González a desde el 2013. Ver figura 9.

Respecto a las aplicaciones de manufactura digital 3D, la tecnología constructiva se ha usado en la fabricación de muros prefabricados a escala real (Mohammad, 2017, Images, 2022), prototipos de edificaciones a construirse en Marte y la Luna, puentes peatonales como el striatus en Venecia Italia, el puente peatonal de Madrid en España y el de

Shanghai en China el cual es el más largo del mundo en manufactura digital con una longitud de 26.3 m. de menor envergadura.(Archdaily, 2022) ver figura 10.

En el caso del concreto autocompactable, cuando esta apropiadamente diseñado (lo cual no es sencillo) es uno de los más utilizados a nivel mundial por su alta capacidad de relleno y habilidad de paso, así como también por su alta resistencia a la segregación, lo que lo ha convertido en el material preferido cuando se requiere colar formas complejas y en edificaciones de gran altura. En México ya existen varios proyectos que han utilizado este tipo de concretos, uno de ellos es el parque Eólico Ventikas en Nuevo León, para el cual se fabricaron torres eólicas de concreto autocompactable con flujos de revenimiento de 70 cm. La otra aplicación de este tipo de concreto en nuestro país se dio en la torre T-OP, en Monterrey



Figura 9. Aplicación de concretos autolimpiantes. a) Iglesia Dives in Misericordia, b) Hospital Dr. Manuel Gea Gonzales. (Geocities, 2022, Local, 2022).



Figura 10. (a) Puente peatonal en Madrid - España, b) Puente Peatonal en Shanghai China. (Images, 2022, Archdaily, 2022).

Nuevo León, para la cual el concreto fue suministrado por Concretos Tepeyac S.A. de C.V., y a la fecha es catalogada como la más alta de Latinoamérica con 305.3m de altura. Ver figuras 11 y 12.

Por último, el concreto de Ultra-Alto Desempeño ha venido utilizándose de manera importante por su alta Resistencia, utilidad y durabilidad en muchos escenarios de construcción, tanto en elementos muy esbeltos como en fachadas de importantes proyectos arquitectónicos. A continuación, se podrán observar algunas de estas aplicaciones en el estadio de Jean Bouin, en París, Francia y en el MuCEM en Marcella Francia. Ver figuras 13 y 14.

7. Conclusiones

En la historia de la humanidad, los diversos tipos de cementantes que se han utilizado por diferentes culturas, han tenido como principal objetivo el mejoramiento de las condiciones de vida del ser humano, de la economía mundial y de la sostenibilidad, todo

con el fin de que a través del desarrollo las técnicas analíticas, de la mecanización de procesos, del diseño y de la manufactura, se genere el mejoramiento de las propiedades de los materiales, de los procedimientos constructivos y de la satisfacción de las necesidades de bienestar de la población mundial, en ese sentido el continuo desarrollo de los materiales ha permitido la solución de distintos retos de la ingeniería actual en beneficio del ser humano, esto con el uso de los concretos convencionales modificados con materiales cementicios suplementarios, fibras y con aditivos químicos que les permiten mejoras en sus comportamientos generando desempeños avanzados en este material para requerimientos específicos produciendo soluciones para una humanidad que siempre intenta el avance en su bienestar.

Los cementantes no hidráulicos fueron la base de los ligantes de las construcciones del mundo antiguo, permitiendo desarrollar procesos constructivos de edificaciones que hoy en día se pueden apreciar



Figura 11. Parque eólico Ventikas. (Imagen proporcionada por Javier Góngora Cemex, México).



Figura 12. Torre T-OP, Monterrey. (Arquine, 2022).

como ejemplo de las maravillas construidas por el hombre.

El desarrollo de los aditivos químicos y la reutilización de subproductos industriales generó la evolución de los concretos convencionales a concretos especiales, que hoy en día ofrecen propiedades de muy alto desempeño al sector de la construcción.

El concreto especial con mayor aplicación industrial es el concreto autocompactable, esto debido a su fácil fabricación, colocación, resistencias adecuadas y durabilidad, e incluso con menores costos económicos en comparación con otros concretos como el UH PC o con el concreto autoreparable lo que lo hace el más utilizable hoy en día en grandes megaproyectos de construcción a nivel nacional y mundial.

8. Referencias

- ACI Committee 130, 2019. Report on the Role of Materials in Sustainable Concrete Construction, American Concrete Institute p 20, ISBN: 978-1-64195-048-0.
- ACI Committee 212, 2016. Report on Chemical Admixtures for Concrete, American Concrete Institute, p 29, ISBN 978-0-87031-402-5.
- Aitcin P.C., 2008, Binders for Durable and Sustainable Concrete, Ed. Taylor & F, p 18, ISBN 9780367864125.
- Behrokh Khoshnevis, 2004, Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies., Automation in Construction 13 p5–9.
- Bogue, R.H., 1952, La Chimie du ciment Portland, (Ed. Eyrolles), p 34.



Figura 13. Estadio Jean Bouin, París, Francia. (Architectmagazine, 2022).



Figura 14. MuCEM, Marcella, Francia. (Tarpin, 2022).

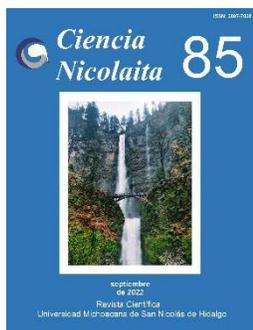
- Buswell, R.A., Leal de Silva, W.R., Jones, S.Z., Dirrenberger, J., 2018, 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research, *Cement and Concrete Research*, 112 p 37–49.
- Candlot, E., 1906, *Ciments et chaux hydrauliques: fabrication, propriétés*, (Polytechnique Library), p 18.
- Cárdenas, R., Arguelles, M., Goycoolea, M., 1998, On the Possible Role of *Opuntia ficus-indica* Mucilage in Lime Mortar Performance in the Protection of Historical Buildings, *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 3, p 64–71.
- Cheung, J., Jeknavorian, A., Roberts, L., Silva, D., 2011, Impact of admixtures on the hydration kinetics of Portland cement, *Cem. Concr. Res.* 41, p1289–1309. doi:10.1016/j.cemconres.2011.03.005.
- Dženana Bečirhodžić et al, 2016, Self-cleaning concrete – a construction material for building cleaner world, 20th International Research/Expert Conference Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, Mediterranean Sea Cruising, 24th September - 1st October.
- El-Sayegh S., 2020, A critical review of 3D printing in construction: benefits, challenges and risks. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 20, p34, doi.org/10.1007/s43452-020-00038-w.
- Gelardi, G., Mantellato, S., Marchon, D., Palacios, M., Eberhardt, A.B., Flatt, R.J., 2016, *Chemistry of chemical admixtures*, (Woodhead Publishing), p 149, doi:10.1016/B978-0-08-100693-1.00009-6.
- Gourdin W.H., Kingery W.D., 1975, The Beginnings of Pyrotechnology: Neolithic and Egyptian Lime Plaster, *Journal of Field Archaeology*, 2:1-2, 133-150, DOI: 10.1179/009346975791491277.
- Grand View Research, 2020, *Concrete Admixtures Market Report*, p 46, Report ID: GVR-1-68038-544-1.
- Guerrini, G. L., 2018, Photocatalytic cement – based materials: applications and new perspectives, Photopaq Symposium, Porticcio, May 17.
- Hamad Al Jassmi, Et al, 2018, Large-Scale 3D Printing: The Way Forward, *Materials Science and Engineering*, p 324, doi:10.1088/1757-899X/324/1/012088 <http://www.d-shape.com>, [consultado 27 de abril de 2022].
- <https://www.epa.gov/enforcement/cement-manufacturing-enforcement-initiative> [Consultado 6 de abril de 2022]
- <https://www.sculpteo.com/blog/2018/01/03/concrete-3d-printer-the-new-challenge-of-the-construction-business/>, [consultado 28 de abril de 2022].
- Ivanov, V., Stabnikov, V., 2015, Construction Biotechnology: a new area of biotechnological research and applications, *World J Microbiol Biotechnol*, 31:1303–1314, DOI 10.1007/s11274-015-1881-7.
- Khatib, J., *Sustainability of Construction Materials*, 2016, (Woodhead Publishing), p 371, doi.org/10.1016/B978-0-08-100370-1.00015-9.
- Khayat, K.H., 1998, Viscosity-enhancing admixtures for cement-based materials - An overview, *Cem. Concr. Compos.*, 20, p171–188. doi:10.1016/S0958-9465(98)80006-1.
- Kim, H., Koh, T., Pyo, S., 2016, Enhancing flowability and sustainability of ultra high performance concrete incorporating high replacement levels of industrial slags, *Constr. Build. Mater.* 123 p153–160. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.06.134.
- Kosmatka, S.H., Wilson, M., 2016, *Design and Control of Concrete Mixtures*, (Ed. Portland Cement Association), p 23. ISBN,0893120871, 9780893120870.



- Liew, K.M., Sojobi, A.O., Zhang, L.W., 2017, Green concrete: Prospects and challenges, *Constr. Build. Mater.* 156 p1063–1095. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.09.008.
- Magdalena Rajczakowska, et al, 2019, Autogenous Self-Healing: A Better Solution for Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering* Vol. 31, Issue 9.
- Malinowski, R., Garfinkel, Y., 1991, Prehistory of concrete, *Concrete International*, 13 62–68.
- Marchon, D., Flatt, R.J., 2016 Impact of chemical admixtures on cement hydration, (Woodhead Publishing), p 279, doi:10.1016/B978-0-08-100693-1.00009-6.
- Mark, R., Hutchinson, P., *The Roman Pantheon*, 1986, *The Art Bulletin*, 68:1, 24-34, DOI: 10.1080/00043079.1986.10788309.
- Metha, P.K., 1981, Studies on blended Portland cements containing Santorin earth, *Cement and Concrete Research*, 11, 4, 507–518., [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(81\)90080-6](https://doi.org/10.1016/0008-8846(81)90080-6).
- Mindess, S., Young, J.F., Darwin, D., 2003, *Concrete*, (Ed. Pearson Education), p 9, ISBN10: 0130646326.
- Ming Xia, Jay Sanjayan, 2016, Method of formulating geopolymer for 3D printing for construction applications, *Materials and Design*, 110. p 382–390.
- Mohammad Reza Khorramshahi , Ali Mokhtari, 2017, Automatic Construction by Contour Crafting Technology, *Italian Journal of Science - Engineering*, Vol. 1, No. 1. doi:10.28991/esj-2017-01113.
- Okamura H., Ouchi M., 2013, Self Compacting Concrete, Hajime Okamura, Masahiro Ouchi, *Self-Compacting Concrete*, *Journal of Advanced Concrete Technology* Vol. 1, No. 1, p5-15.
- Papadakis, M., Venuat, M., Vandamme, J., 1970, *Industrie de la chaux, du ciment et du plâtre*, (Dunod).p 22.
- Plank, J., 2004, Applications of biopolymers and other biotechnological products in building materials, *Appl Microbiol Biotechnol*, 1–9. doi:10.1007/s00253-004-1714-3.
- Rael, R., San Fratello, V. 2011, Developing Concrete Polymer Building Components for 3D Printing, *Acadia 2011 proceedings*, p152-157.
- Regourd, M., Kerisel, J., Deletie, P., Haguenaer, B., 1988, Microstructure of mortars from three Egyptian pyramids, *Cement and Concrete Research*, 18, 1, 81–90. doi:10.1016/0008-8846(88)90124-X.
- Roig-Flores, M., et al, 2021, Self-healing concrete-What Is it Good For?, *materiales de construcción*, Vol. 71, Issue 341.
- Stark, J., Wicht, B., 1999, Zur Historie des gipses, *ZKG Int*, 10, 527–33.
- Vazquez, A., Pique, T. M., 2016, Biotech admixtures for enhancing portland cement hydration, *Biopolymers and Biotech Admixtures for Eco-Efficient Construction Materials*, p 81-98, doi:10.1016/B978-0-08-100214-8.00005-1.
- Vitruvius, *Les Dix Livres d’architecture de Vitruve translated*, (Ed. Wentworth Press), p151.
- Wang, J.Y., Soens, H., Verstraete, W. De Belie, N., 2014, Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores. *Cem. Concr. Res.* 56, 139-152.
- Wangler T., Et al, 2016, Digital Concrete: Opportunities and Challenges, *RILEM Technical Letters* 1, 67 – 75.

Páginas web

- <http://www.d-shape.com>, [consultado 27 de abril de 2022].
- <https://www.epa.gov/enforcement/cement-manufacturing-enforcement-initiative> [Consultado 6 de abril de 2022]
- <https://www.sculpteo.com/blog/2018/01/03/concrete-3d-printer-the-new-challenge-of-the-construction-business/>, [consultado 28 de abril de 2022].
- <http://www.geocities.ws/arquique/meier/meiercy.html> [consultado el 22 mayo de 2022].
- <https://local.mx/ciudad-de-mexico/medio-ambiente/torre-de-especialidades-hospital-manuel-gea-gonzalez-contaminacion/>. [consultado el 22 mayo de 2022].
- <https://images.adsttc.com/media/imagenes/5886/1183/e58e/>. [consultado el 22 mayo de 2022].
- https://www.archdaily.com/909534/worlds-largest-3d-printed-concrete-pedestrian-bridge-completed-in-china/5c3f4eb3284dd125fd000106-worlds-largest-3d-printed-concrete-pedestrian-bridge-completed-in-china-photo?next_project=no. [consultado el 22 mayo de 2022].
- <https://www.arquine.com/torre-t-op>[consultado el 22 mayo de 2022].
- https://www.architectmagazine.com/project-gallery/jean-bouin-stadium_o. [consultado el 22 mayo de 2022].
- <https://tarpin-bien.com/lieu/le-mucem/>[consultado el 22 mayo de 2022].



Ciencia Nicolaita 85

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

El momento magnético débil anómalo del Top en el contexto del Modelo Bestest Little Higgs

The anomalous weak magnetic moment of the Top in the context of the Bestest Little Higgs Model

Jorge Isidro Aranda Sánchez*, Eligio Cruz Albaro, Alejandro Gutiérrez Rodríguez, Fernando Iguazú Ramírez Zavaleta

Para citar este artículo: Jorge Isidro Aranda Sánchez*, Eligio Cruz Albaro, Alejandro Gutiérrez Rodríguez, Fernando Iguazú Ramírez Zavaleta, 2022. El momento magnético débil anómalo del Top en el contexto del Modelo Bestest Little Higgs. Ciencia Nicolaita no. 85, 44-52. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi85.625>



Historial del artículo:

Recibido: 14 de abril de 2022

Aceptado: 6 de julio de 2022

Publicado en línea: septiembre de 2022



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: jarandas@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>



El momento magnético débil anómalo del Top en el contexto del Modelo Bestest Little Higgs

The anomalous weak magnetic moment of the Top in the context of the Bestest Little Higgs Model

Jorge Isidro Aranda Sánchez*, Eligio Cruz Albaro, Alejandro Gutiérrez Rodríguez, Fernando Iguazú Ramírez Zavaleta

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas. Morelia, Michoacán. México.

Resumen

La nueva física puede manifestarse a través de correcciones virtuales que generan las partículas exóticas. En el escenario del modelo Bestest Little Higgs, las contribuciones surgen a través de los vértices $Zq_i\bar{q}_l$ y tq_iS_i , con $q_i = b, t, B, T, T_5, T_6, T^{2/3}$ y $S_i = h_0, H_0, A_0, \phi^0, \eta_0, \sigma, H^\pm, \phi^\pm, \eta^\pm$. Con estos nuevos vértices se calculan las contribuciones a nivel de un lazo al momento dipolar magnético débil anómalo del quark top. Los quarks (b, t) y el bosón de higgs h_0 pertenecen al Modelo Estándar. Los quarks ($B, T, T_5, T_6, T^{2/3}$) y los bosones ($H_0, A_0, \phi^0, \eta_0, \sigma, H^\pm, \phi^\pm, \eta^\pm$) son las nuevas partículas del modelo Bestest Little Higgs. El exponente $2/3$, en el quark $T^{2/3}$, representa la carga electromagnética de dicho quark exótico.

Palabras clave: Correcciones virtuales, partículas exóticas, momento dipolar, Little Higgs.

Abstract

The new physics can manifest itself through virtual corrections generated by the exotic particles. In the Bestest Little Higgs model scenario, contributions arise through the vertices $Zq_i\bar{q}_l$ and tq_iS_i , with $q_i = b, t, B, T, T_5, T_6, T^{2/3}$ y $S_i = h_0, H_0, A_0, \phi^0, \eta_0, \sigma, H^\pm, \phi^\pm, \eta^\pm$. With these new vertices the one-loop level contributions to the anomalous weak magnetic dipole moment of the top quark are calculated. The quarks (b, t) and the higgs boson h_0 belongs to Standard Model. The quarks ($B, T, T_5, T_6, T^{2/3}$) and the bosons ($H_0, A_0, \phi^0, \eta_0, \sigma, H^\pm, \phi^\pm, \eta^\pm$) are the new particles which belong to the Bestest Little Higgs model. The exponent $2/3$, in the quark $T^{2/3}$, represents the electromagnetic charge of such an exotic quark.

Keywords: Virtual corrections, exotic particles, dipole moment.

Introducción

El quark top es hasta ahora la partícula fundamental más pesada del Modelo Estándar (ME), y es también el único fermión con un acoplamiento de Yukawa cercano a la unidad. Estas particularidades del quark top lo convierte en un lugar pertinente para búsquedas de nueva física a la escala de teraelectronvoltios (TeV). Otra motivación importante para el estudio de la física del top es comprender su posible papel en el rompimiento de la simetría electrodébil, que aún no se ha dilucidado (Dobrescu, Hill, 1998; Chivukula *et al.*, 1999). De esta manera, el quark top es una partícula clave y se considera un laboratorio para muchos aspectos experimentales o de simulación en las búsquedas de nueva física. En este sentido, el estudio de la física del quark t por parte del colisionador Tevatron en el Fermilab (Abazov *et al.*, 2012; Abazov *et al.*, 2010; Aaltonen *et al.*, 2009) y de las Colaboraciones ATLAS y CMS (Chatrchyan, 2013; Sirunyan, 2019; Sirunyan, 2020) en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) se ha desarrollado significativamente en los últimos años y representa actualmente un programa de física bastante activo. En específico, la detección experimental del momento dipolar magnético débil anómalo (MDMDA) o del momento dipolar eléctrico débil (MDED) no nulo del top en la sensibilidad actual de los colisionadores, sería una clara evidencia de la nueva física más allá del ME.

Un aspecto de la física del quark top que se ha explorado muy poco es el de los acoplamientos anómalos del quark top a bosones de norma en los vértices $\gamma\bar{t}t$ y $Z\bar{t}t$, por lo que se justifica la realización de estudios más detallados sobre estos fenómenos. En particular, una fuente de nueva física puede manifestarse a través de correcciones virtuales que generan partículas exóticas en el contexto de algunos modelos de extensión. De esta manera, en este trabajo nos proponemos calcular la contribución que generan las nuevas partículas a nivel de un lazo sobre el vértice $Z\bar{t}t$. Enfocamos nuestra atención a los factores de forma relacionados con el MDED y el MDMDA, ya que estos podrían estar íntimamente ligados con desviaciones respecto a las predicciones del ME. Se

han desarrollado teorías que son conocidas como extensiones del ME, donde se predicen nuevas partículas. En específico, el modelo Bestest Little Higgs (BLH) (Schmaltz, Stolarski, Thaler, 2010) brinda una solución a ciertos problemas fundamentales que el ME deja sin respuesta, una de ellas es el problema de la jerarquía. En esta extensión del ME, se predicen la existencia de: nuevos escalares físicos neutros y cargados, $h_0, H_0, A_0, \phi^0, \eta_0, \sigma, H^\pm, \phi^\pm, \eta^\pm$; nuevos bosones de norma, Z', W' ; y nuevos quarks pesados, $B, T, T_5, T_6, T^{2/3}$. A nivel de un lazo, el MDED y el MDMDA del quark top se inducen a través del diagrama de Feynman representado en la Figura. 1, donde S_i representa a los escalares, y q_i a los quarks. Por lo tanto, entre las nuevas contribuciones del modelo, se encuentran aquellas que surgen de los vértices de los escalares y la contribución de los quarks, es decir, vértices de la forma: $Zq_i\bar{q}_i$ y tq_iS_i , $q_i = b, t, B, T, T_5, T_6, T^{2/3}$ y $S_i = h_0, H_0, A_0, \phi^0, \eta_0, \sigma, H^\pm, \phi^\pm, \eta^\pm$. Con estos vértices calculamos las contribuciones a nivel de un lazo a los momentos dipolares débiles del quark top, el MDED y MDMDA. En un escenario general, se asume que h_0 es ligero y representa el bosón de Higgs del ME mientras que las masas de los otros bosones de Higgs H_0, A_0 pueden variar. Debido a que existen ciertas limitaciones experimentales y teóricas que se demandan sobre los parámetros del modelo BLH, se ha encontrado que $m_{A_0} > 350 \text{ GeV}$ de acuerdo a las restricciones más recientes proporcionadas por las colaboraciones ATLAS y CMS (Chatrchyan, 2013; Sirunyan, 2019; Sirunyan, 2020; Aad, 2021). En base a las consideraciones anteriores, los parámetros del modelo que se han elegido son: $m_{A_0} = 1000 \text{ GeV}$, $m_{\eta_0} = 100 \text{ GeV}$, $f = [1000, 3000] \text{ GeV}$, $F = (3000, 6000) \text{ GeV}$ y $\tan\beta = 3$.

El modelo Bestest Little Higgs

El BLH está basado en dos modelos sigma no lineales independientes (Σ y Δ): el valor de expectación del vacío (vev) del campo Σ , $\langle\Sigma\rangle = \mathbf{1}_6$, rompe la primera simetría global $SO(6)_A \times SO(6)_B$ al grupo diagonal $SO(6)_V$ a la escala de energía $f \sim 1 \text{ TeV}$, y un campo Δ con su vev $\langle\Delta\rangle = \mathbf{1}_6$, rompe la segunda

simetría global $SU(2)_C \times SU(2)_D$ al subgrupo diagonal $SU(2)$ a la escala $F \sim 3$ TeV. Después del rompimiento de la simetría $SO(6)_A \times SO(6)_B$ se generan nuevas partículas (15 pseudobosones de Nambu-Goldstone) que están parametrizados como ϕ^a y η^a , $a = 1, 2, 3$, dos vectores de Higgs h_1 y h_2 de $SO(4)$ y un escalar real σ . La incorporación de los campos al campo Σ se estructura de la siguiente manera:

$$\Sigma = e^{\frac{i\Pi}{f}} e^{\frac{2i\Pi_h}{f}} e^{\frac{i\Pi}{f}}, \quad (1)$$

siendo Π y Π_h matrices complejas y antisimétricas (Schmaltz, Stolarski, Thaler, 2010). Con respecto a la segunda simetría global, los bosones de Nambu-Goldstone están parametrizados en Δ como

$$\Delta = F e^{2i\Pi_d}, \quad \Pi_d = \frac{1}{2}(\chi_a \tau^a), \quad (2)$$

donde χ_a representan los bosones de Nambu-Goldstone y τ^a las matrices de Pauli generadores de la simetría $SU(2)$ (Schmaltz *et al.*, 2010).

En el sector escalar del modelo BLH, el potencial de Higgs se construye a partir de los campos de Higgs h_1 y h_2 (Schmaltz *et al.*, 2010)

$$V = \frac{1}{2}m_1^2 h_1^T h_1 + \frac{1}{2}m_2^2 h_2^T h_2 - B_\mu h_1^T h_2 + \frac{\lambda_0}{2}(h_1^T h_2)^2. \quad (3)$$

A través de este potencial se genera el rompimiento espontáneo de la simetría que se logra cuando V alcanza su estado de mínima energía, a lo que se traduce en transformar las primeras componentes de h_1 y h_2 por sus respectivos vevs, v_1 y v_2 relacionados entre sí por el siguiente ángulo de mezcla

$$\tan \beta = \frac{v_1}{v_2} = \frac{m_2}{m_1}. \quad (4)$$

Estos vevs se relacionan con el vev del ME como $v^2 = v_1^2 + v_2^2$. En este sector, a partir de la diagonalización de la matriz de masa se generan tres campos escalares físicos neutros (h_0, H_0, A_0) y dos campos escalares físicos cargados (H^\pm). En el potencial de

Higgs los cuatro parámetros m_1, m_2, B_μ y λ_0 (Schmaltz, Stolarski, Thaler, 2010), se expresan en términos de las masas de los bosones h_0 y A_0 que son parámetros bastante accesibles fenomenológicamente:

$$\lambda_0 = \frac{m_{h_0}^2}{v^2} \left(\frac{m_{h_0}^2 - m_{A_0}^2}{m_{h_0}^2 - m_{A_0}^2 \sin^2 2\beta} \right), \quad (5)$$

$$B_\mu = \frac{1}{2}(m_{A_0}^2 + \lambda_0 v^2) \sin 2\beta, \quad (6)$$

$$m_{H^\pm}^2 = m_{A_0}^2 = m_1 + m_2, \quad (7)$$

$$m_{h_0}^2 = \frac{B_\mu}{\sin 2\beta} + \sqrt{\left(\frac{B_\mu}{\sin 2\beta} \right)^2 - 2\lambda_0 B_\mu v^2 \sin 2\beta + (\lambda_0 v^2 \sin 2\beta)^2}, \quad (8)$$

$$m_\sigma^2 = 2\lambda_0 f^2 K_\sigma. \quad (9)$$

La masa del escalar σ está en términos de λ_0 y del parámetro libre K_σ . Por las condiciones de perturbatividad se impone que $\lambda_0 < 4\pi$ (Kalyniak, Martin, Moats, 2015), en consecuencia

$$1 < \tan \beta < \frac{2 + 2 \sqrt{\left(1 - \frac{m_{h_0}^2}{m_{A_0}^2}\right) \left(1 - \frac{m_{h_0}^2}{4\pi v^2}\right)}}{\frac{m_{h_0}^2}{m_{A_0}^2} \left(1 + \frac{m_{A_0}^2 - m_{h_0}^2}{4\pi v^2}\right)} - 1$$

$$\text{y } 1 < K_\sigma < \frac{16\pi^2}{\lambda_0(8\pi - \lambda_0)}. \quad (10)$$

Cálculo del MDMDA y el MDED del quark top

Las propiedades débiles del quark top aparecen en la teoría cuántica de campos, y se da a través de la interacción con el bosón Z . Así, la función vértice covariante de Lorentz que describe la interacción de un bosón Z con dos quarks top en capa de masa, puede

escribirse de la siguiente manera (Swinger,1948; Hollik *et al.*,1999; Aguilar-Saavedra, 2009)

$$\begin{aligned} & \bar{u}(p')\Gamma_{Ztt}^\mu(q^2)u(p) \\ &= \bar{u}(p') \{ \gamma^\mu [F_V(q^2) - F_A(q^2)\gamma^5] \\ &+ i \sigma^{\mu\nu} q_\nu [F_M(q^2) \\ &- i F_E(q^2)\gamma^5] \} u(p). \end{aligned} \tag{11}$$

$F_V(q^2)$ y $F_A(q^2)$ representan los factores de forma, vector y vector-axial, respectivamente. Mientras que $F_M(q^2)$ y $F_E(q^2)$ estan asociados con los factores de forma de los momentos dipolares débiles, el magnético y eléctrico. Estos últimos aparecen debido a las correcciones radiativas y son las herramientas preferidas para estudiar efectos de nueva física de manera indirecta, a través de las correcciones virtuales que generan las partículas exóticas predichas en modelos que van más allá del ME. Los factores de forma dependen de la variable dinámica q^2 , donde $q = p_2 - p_1$ y denota el momento entrante del bosón Z . En este trabajo, el bosón Z no está en capa de masa ya que para producir un par de quarks top, el bosón Z debe estar necesariamente fuera de la resonancia. Con respecto a los factores de forma, $F_M(q^2)$ y $F_E(q^2)$, estos se relacionan con el MDMDA (a_t^W) y MDED (d_t^W) del quark top de la siguiente manera

$$F_M(q^2) = - \frac{a_t^W}{2 m_t}, \tag{12}$$

$$F_E(q^2) = - \frac{d_t^W}{e}. \tag{13}$$

El factor de forma dipolar magnético débil $F_M(q^2)$ recibe contribuciones a nivel de un lazo en el marco del modelo BLH. Sin embargo, no se genera contribución alguna para el factor de forma dipolar eléctrico débil $F_E(q^2)$. Por esta razón, únicamente estimamos valores numéricos para el MDMDA del quark top. Cabe mencionar que con las ecuaciones (12) y (13) no es posible definir las propiedades estáticas del bosón Z cuando éste, particularmente, interactuana con un par de quarks top. Algo que es importante saber es que las propiedades estáticas solamente surgen cuando el bosón se encuentra en capa de masa, es

decir, $q^2 = m_Z^2$. Sin embargo, para el vértice que nos interesa está involucrado un par de fermiones bastante masivos, y por eso, el bosón Z debe estar necesariamente fuera de capa de masa, $q^2 > m_Z^2$. Específicamente, $\sqrt{q^2} > 2m_t$.

Los momentos dipolares débiles (MDMDA y MDED) del top llevan información importante acerca de sus interacciones con otras partículas. Sus magnitudes pequeñas en el contexto del ME hacen que estos sean ideales para búsquedas de nueva física. De esta manera, se espera que el quark top sea una ventana a cualquier nueva física a la escala de energía de los TeV. En esta sección, evaluamos el MDMDA del quark top en el contexto del BLH. Todas las posibles contribuciones al factor de forma $F_M(q^2)$ se generan a partir de la Figura 1, y surgen 34 diagramas que contribuyen al vértice Ztt . En esta figura, S_i representa a los escalares h_0 (bosón de Higgs del ME), $H_0, A_0, \phi^0, \eta_0, \sigma, H^\pm, \phi^\pm, \eta^\pm$, y q_i denota a los quarks $b, t, B, T, T_5, T_6, T^{2/3}$ (el exponente 2/3 representa la carga electromagnética del quark pesado T). Para obtener la amplitud de cada contribución se usan las reglas de Feynman proporcionadas en (Aguilar-Saavedra, 2009). Estas amplitudes se pueden escribir con la siguiente notación compacta:

$$\begin{aligned} M_t^\mu(S_i) &= \int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} \bar{u}(p_2)(f_{S_i}^* + f_{P_i}^* \gamma^5) \left(i \frac{\gamma^\mu k_\mu + \gamma^\mu p_{2\mu} + m_{q_i}}{(k+p_2)^2 - m_{q_i}^2} \right) \\ & \left(\gamma^\mu (F_{V_i} + F_{A_i} \gamma^5) \right) \left(i \frac{\gamma^\mu k_\mu + \gamma^\mu p_{1\mu} + m_{q_i}}{(k+p_1)^2 - m_{q_i}^2} \right) (f_{S_i} + f_{P_i} \gamma^5) u(p_1) \left(\frac{1}{k^2 - m_{S_i}^2} \right), \end{aligned} \tag{14}$$

donde $f_{S_i}, f_{P_i}, F_{V_i}$ y F_{A_i} denotan los factores de forma de los escalares, pseudoescalares, vectoriales y axial-vectoriales. Las amplitudes $M_t^\mu(S_i)$ están relacionadas con el vértice Γ_{Ztt}^μ a través de la Ecuación (11), considerando que $M_t^\mu(S_i) = \bar{u}(p_2)\Gamma_{Ztt}^\mu(q^2)u(p_1)$.

Las integrales involucradas en las amplitudes se resolvieron usando el esquema de reducción de Passarino-Veltman implementado en el ambiente de FeynCalc (Cruz-Álbaro, Gutiérrez-Rodríguez, 2022) y Package-X (Mertig *et al.*, 1991; Patel, 2015). Posterior a esto, se utilizó la identidad de Gordon para eliminar los términos proporcionales a $(p_1 + p_2)^\mu$. Finalmente, se extraen los términos proporcionales al tensor $\sigma^{\mu\nu} q_\nu$ y al tensor γ^μ . El coeficiente del tensor γ^μ no contribuye al MDMDA, solamente se obtiene

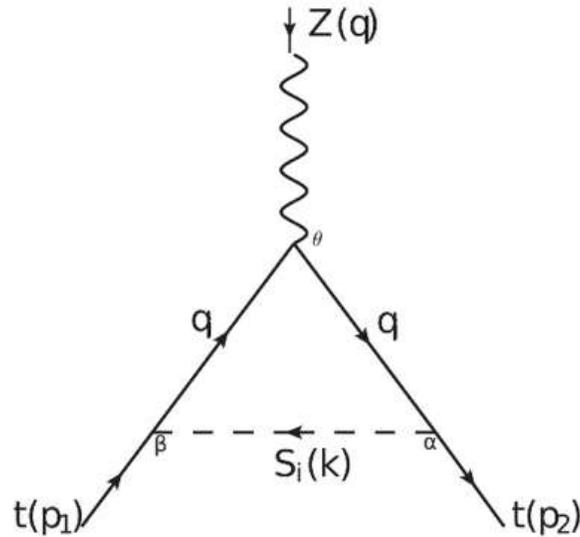


Figura 1. Diagrama genérico que contribuye al MDMDA del quark top.

contribución del coeficiente del tensor $\sigma^{\mu\nu}q_\nu$. Es importante señalar que la contribución de los coeficientes del tensor $\sigma^{\mu\nu}q_\nu$ es finita y no se pone aquí debido a que es una función demasiado grande, por este motivo solamente se reportan los resultados numéricos. El MDMDA del top se obtiene a través de la relación $a_t^W = -2 m_t F_M(q^2)$.

Resultados numéricos

Consideremos los siguientes parámetros de entrada del modelo BLH: m_{A_0} , m_{η_0} y $\tan \beta$. La masa del pseudoescalar A_0 se fija alrededor de 1000 GeV, el cual está en estricta concordancia con los límites experimentales más recientes sobre búsquedas de nuevas partículas escalares (Aad, 2021). Por otro lado, los parámetros libres $m_{4,5,6}$ son introducidos para romper las simetrías axiales en el potencial de Higgs y para proporcionar masas positivas a todos los escalares. Específicamente, el escalar η_0 recibe una masa igual a m_4 , esto es $m_4 = m_{\eta_0} = 100$ GeV. De acuerdo con el modelo BLH, la única restricción que se debe tener en cuenta sobre m_4 es $m_4 \geq 10$ GeV (Schmaltz, Stolarski, Thaler, 2010). Con respecto al parámetro $\tan \beta$, éste adquiere valores de acuerdo con la ecuación (10) y la restricción teórica se debe a los requisitos de perturbatividad (Aad, 2021). De esta manera, para $m_{A_0} = 1000$ GeV se obtiene que $1 < \tan \beta < 10.45$. En resumen, para nuestro análisis $m_{A_0} = 1000$ GeV, $m_{\eta_0} = 100$ GeV y $\tan \beta = 3.0$.

Otra característica del modelo BLH es que está construido bajo dos escalas de energía independientes que representan las escalas de rompimiento de las simetrías globales, f y $F > f$, con $f = [1000, 3000]$ GeV y $F = (3000, 6000)$ GeV. Los resultados numéricos que presentamos aquí para el MDMDA del quark top está en función de alguna de estas escalas de energía. Como se ha mencionado anteriormente, el bosón involucrado en el vértice Ztt estará fuera de la capa de masa, en este estudio adoptamos el parámetro de colisión del ILC (International Linear Collider), esto es, $\sqrt{s} = q = 500$ GeV (Aad, 2021; Behnke et al, 2013). A esta energía, el colisionador ILC produciría numerosos pares de quarks top [19] (Baer et al, 2013). Este colisionador está diseñado para realizar mediciones de precisión en el ME y también ofrece ciertas ventajas sobre un colisionador como el LHC, ya que hace colisionar partículas puntuales generando así un ambiente experimental mucho más limpia, sin actividades hadrónicas en el estado inicial. Por lo tanto, calculamos las contribuciones numéricas de a_t^W con los quarks top en la capa de masa y el bosón Z en el centro de energía de masa esperado por el colisionador ILC. A continuación, reportamos los resultados numéricos obtenidos de a_t^W , no proporcionamos las expresiones analíticas debido a que se obtienen expresiones muy grandes.

En la Figura 2, comenzamos mostrando los diferentes escalares que contribuyen a a_t^W . De la figura podemos apreciar que los bosones de Higgs h_0 y H_0 ,

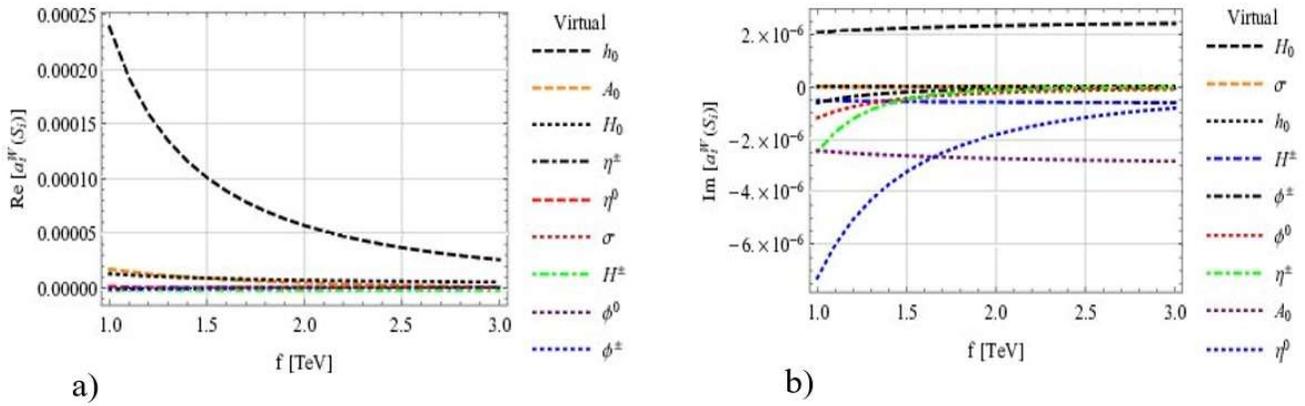


Figura 2. Contribuciones individuales de los escalares que contribuyen a a_t^W : (a) $Re[a_t^W]$ y (b) $Im[a_t^W]$.

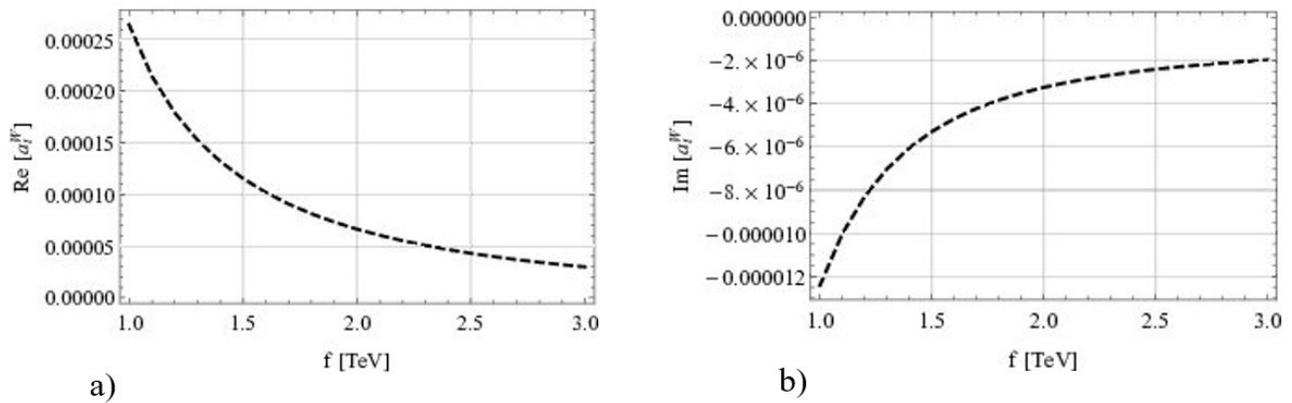


Figura 3. Contribución total a a_t^W para $F = 4000$ GeV: (a) $Re[a_t^W]$ y (b) $Im[a_t^W]$.

proporcionan las contribuciones positivas más grandes a la parte real e imaginaria de a_t^W : $Re[a_t^W(h_0)] \sim 10^{-4}$ y $Im[a_t^W(H_0)] \sim 10^{-6}$. En contraste, las contribuciones negativas más pequeñas son generadas por los escalares ϕ^\pm y η^0 : $Re[a_t^W(\phi^\pm)] \sim 10^{-7}$ y $Im[a_t^W(\eta^0)] \sim 10^{-6}$. La Figura 3 muestra el comportamiento de a_t^W como función de la nueva escala física f , donde $f \in [1000, 3000]$ GeV. En este rango de análisis se genera la contribución total a a_t^W debido a los escalares involucrados en el vértice Ztt . En la figura mencionada, se encontró que $Re[a_t^W] = [2.64 \times 10^{-4}, 2.97 \times 10^{-5}]$ e $Im[a_t^W] = -[1.24 \times 10^{-5}, 1.96 \times 10^{-6}]$. Finalmente, en la Figura 4 observamos que el MDMDA del quark top a_t^W está en función de la escala de energía F . Aquí, $Re[a_t^W] = [2.64, 2.65] \times 10^{-4}$ e $Im[a_t^W] = -[1.33, 1.16] \times 10^{-5}$. En el intervalo de estudio para la escala F , encontramos que la variación en la parte real e imaginaria de a_t^W es mínima.

Conclusiones

Nuestro objetivo en este trabajo es estudiar el efecto de las nuevas partículas escalares generadas en el marco del modelo BLH. Los resultados numéricos encontrados para el MDMDA del quark top a_t^W dependen de las escalas de energía f y F , estos representan las escalas de la nueva física. En este escenario hemos encontrado que los valores para a_t^W son comparables con las predicciones numéricas del ME, a_t^W están del orden de 10^{-4} (Cao, Yan, 2015). En modelos extendidos como el 2HDM (Two Higgs Doublets Model) también se estudiaron los efectos de los nuevos escalares en el vértice $Z\bar{t}t$, aquí se encontró que $a_t^W \sim 10^{-3}$ (Cao, Yan, 2015). Otros modelos extendidos que predicen la existencia de un nuevo bosón de norma Z' obtuvieron en este contexto que $a_t^W \sim [10^{-6}, 10^{-7}]$ (Bernabeu, Comelli, Lavoura, Silva, 1996).

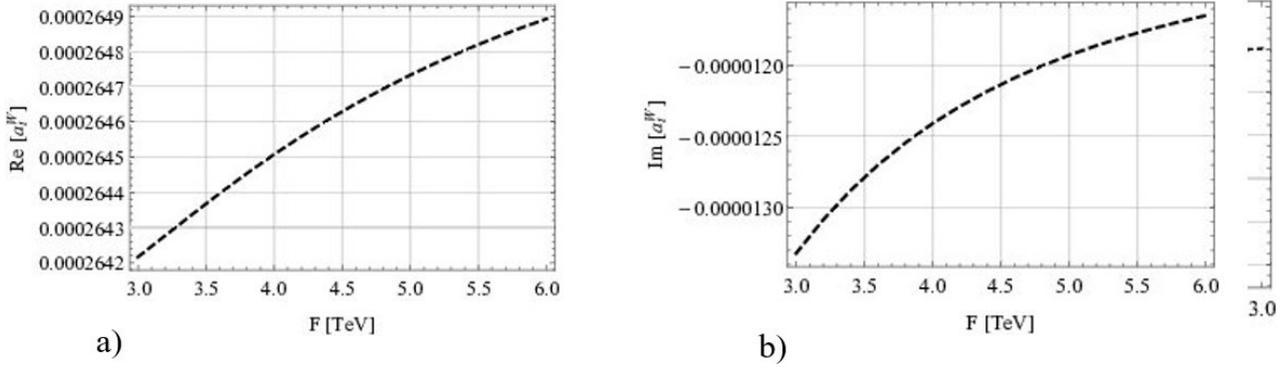


Figura 4. Contribución total a a_t^W para $f = 1000$ GeV: (a) $\text{Re}[a_t^W]$ y (b) $\text{Im}[a_t^W]$.

En el lado experimental, los momentos dipolares débiles del quark top aún no han sido probados directamente. Sin embargo, desde el punto de vista fenomenológico, en el ILC se espera alcanzar los límites para MDMDA del quark top de $-0.02 < a_t^W < 0.04$, dichos límites son generados a través de la exploración de la sección eficaz total de la producción de pares de quark top (Vivian, 2019). Las cotas señaladas se podrían alcanzar cuando el colisionador alcance los 500 GeV de energía de centro de masas y 500 fb^{-1} de luminosidad integrada (Vivian, 2019). Debemos señalar que nuestros resultados encontrados para a_t^W caen dentro de los límites fenomenológicos proporcionados por el colisionador ILC (Rontsch, Schulze, 2015).

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por el Sistema Nacional de Investigadores y por la CIC-UMSNH (México).

Referencias

Dobrescu, B. A., and Hill, C. T., 1998, Electroweak symmetry breaking via a Top Condensation Seesaw Mechanism, *Physical Review Letters* 81, 2634. DOI: 10.1103/PhysRevLett.81.2634

Chivukula, R. S., Dobrescu, B. A., Georgi, H., and Hill, C. T., 1999, *Physical Review D* 59, 075003. DOI:10.1103/PhysRevD.59.075003

Abazov, V. M., Abbott, B., Acharya, B. S., Adams, M., Adams, T. (D0 Collaboration), 2012, Combination of searches for anomalous top quark couplings with 5.4 fb^{-1} of $p\bar{p}$ collisions, *Physics Letters B* 713, No. 3, 165-171. DOI:10.1016/j.physletb.2012.05.048

Abazov, V. M., Abbott, B., Abolins, M., Acharya, B. S., Adams, M., Adams, T. (D0 Collaboration), 2010, Search for flavor changing neutral currents via quark-gluon couplings in single top quark production using 2.3 fb^{-1} of collisions, *Physics Letters B* 693, 81-87. DOI:10.1016/j.physletb.2010.08.011

Aaltonen, T., Adelman, J., Akimoto, T., Álvarez-González, B., Amerio, S. (CDF Collaboration), 2009, Search for Top-Quark Production via Flavor-Changing Neutral Currents in $W + 1$ Jet Events at CDF, *Physical Review Letters* 102, 151801. DOI:10.1103/PhysRevLett.102.151801

Chatrchyan, S. (CMS Collaboration), 2013, Measurement of associated production of vector bosons and top quark-antiquark pairs in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV, *Physical Review Letters* 110, 172002. DOI:10.1103/PhysRevLett.110.172002

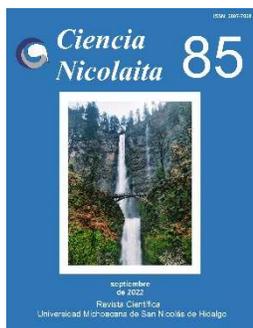
Sirunyan, A. M. (CMS Collaboration), 2019, Search for new physics in top quark production in dilepton final states in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, *European Physical Journal C* 79, 886. DOI:10.1140/epjc/s10052-019-7387-y

Sirunyan, A. M. et al. (CMS Collaboration), 2020, Measurement of top quark pair production in association with a Z boson in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, *Journal of High Energy Physics*, No. 3, 56. DOI:10.1007/JHEP03(2020)056

Schmaltz, M., Stolarski, D., and Thaler, J., 2010, The best little Higgs, *Journal of High Energy Physics*, No. 9, 18. DOI:10.1007/JHEP09(2010)018

Aad, G. (ATLAS Collaboration), 2021, Search for a heavy Higgs boson decaying into a Z boson and another heavy Higgs boson in the $l\bar{l}b\bar{b}$ and $l\bar{l}W$ final states in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,

- European Physical Journal C* 81, No. 5, 396.
DOI:10.1140/epjc/s10052-021-09117-5
- Kalyniak, P., Martin, T., and Moats, K., 2015, Constraining the Little Higgs model of Schmaltz, Stolarski, and Thaler with recent results from the LHC, *Physical Review D* 91, 013010. DOI:10.1103/PhysRevD.91.013010
- Swinger, J., 1948, On Quantum-Electrodynamics and the Magnetic Moment of the Electron, *Physical Review* 73, No. 4, 416. DOI:10.1103/PhysRev.73.416
- Hollik, W., Illana, J. I., Rigolin, S., Schappacher, C., and Stockinger, D., 1999, Top dipole form factors and loop-induced CP violation in supersymmetry, *Nuclear Physics B* 551, 3-40. DOI:10.1016/S0550-3213(99)00201-1
- Aguilar-Saavedra, J. A., 2009, A minimal set of top anomalous couplings, *Nuclear Physics B* 812, 181-204. DOI:10.1016/j.nuclphysb.2008.12.012
- Cruz-Albaro, E., and Gutiérrez-Rodríguez, A., 2022, Sensitivity limits on the weak dipole moments of the top quark at the Bestest Little Higgs Model, *arXiv:2202.12738* [hep-ph]. <https://arxiv.org/pdf/2202.12738>
- Mertig R., Bohm M. and Denner A., 1991, *Feyn Calc* - Computer-algebraic calculation of Feynman amplitudes, *Computer Physics Commun*, 64, 345. DOI:10.1016/0010-4655(91)90130-D
- Patel, H. H., 2015, Package-X: A Mathematica package for the analytic calculation of one-loop integrals, *Comput. Physics Commun*, 197, 276-290. DOI:10.1016/j.cpc.2015.08.017
- Behnke, T., Brau, J. E., Foster, B., Fuster, J., Harrison, M., Paterson, J. M., Peskin, M., Stanitzki, M., Walker, N., and Yamamoto, H., 2013, The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 1: Executive Summary, *arXiv:1306.6327* [physics.acc-ph]. <https://arxiv.org/pdf/1306.6327>
- Baer H., Barklow T., Fujii K., Gao Y., Hoang A., Kanemura S., List J., Logan H. E., Nomerotski A. and Perelstein M., 2013, The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 2: Physics, *arXiv:1306.6352* [hep-ph]. <https://arxiv.org/pdf/1306.6352>
- Cao, Q. H., and Yan, B., 2015, Determining V_{tb} at electron-positron colliders, *Physical Review D* 92, No. 9, 094018. DOI:10.1103/PhysRevD.92.094018
- Bernabeu, J., Comelli, D., Lavoura, L., and Silva, J. P., 1996, Weak magnetic dipole moments in two-Higgs-doublet models, *Physical Review D* 53, 5222. DOI:10.1103/PhysRevD.53.5222
- Vivian B. Q., Aranda-Sanchez J. I., Montañó Dominguez J., Ramírez Zavaleta F. I. and Hernández E. S. T., 2019, Weak dipole moments of the top quark and flavor violation, *Proceedings of Science, LHCP2019*, 66. <https://pos.sissa.it/350/066/pdf>
- Rontsch R. and Schulze M., 2015, Probing top-Z dipole moments at the LHC and ILC, *Journal of High Energy Physics*, No. 8, 44. DOI:10.1007/JHEP08(2015)044



Ciencia Nicolaita 85

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Evaluación de la calidad del agua de manantiales ubicados en la comunidad El Platanal, Michoacán, México

Evaluation of the water quality of springs located in the El Platanal community, Michoacán, Mexico

Claudia Alejandra Reyes Toscano*, Ruth Alfaro Cuevas Villanueva, Guadalupe Vázquez Mejía, Raúl Cortés Martínez, Dulce María Bocanegra Ramírez

Para citar este artículo: Claudia Alejandra Reyes Toscano*, Ruth Alfaro Cuevas Villanueva, Guadalupe Vázquez Mejía, Raúl Cortés Martínez, Dulce María Bocanegra Ramírez, 2022. Evaluación de la calidad del agua de manantiales ubicados en la comunidad El Platanal, Michoacán, México. Ciencia Nicolaita no. 85, 53-72. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi85.658>

Historial del artículo:



Recibido: 18 de mayo de 2022

Aceptado: 5 de septiembre de 2022

Publicado en línea: septiembre de 2022



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: crevest006@alumno.uaemex.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Evaluación de la calidad del agua de manantiales ubicados en la comunidad El Platanal, Michoacán, México

Evaluation of the water quality of springs located in the El Platanal community, Michoacán, Mexico

Claudia Alejandra Reyes Toscano^{1*}, Ruth Alfaro Cuevas Villanueva², Guadalupe Vázquez Mejía³, Raúl Cortés Martínez⁴, Dulce María Bocanegra Ramírez²

¹Universidad Autónoma del Estado de México, Doctorado en Ciencias Ambientales

²Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra

³Universidad Autónoma del Estado de México, Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua

⁴Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Químico Farmacobiología

Resumen

Se evaluó la calidad del agua de seis manantiales que abastecen de agua potable y riego agrícola a la comunidad El Platanal, perteneciente al municipio de Jacona, Michoacán. Se realizaron dos campañas de colecta, la primera en mayo (estiaje) y la segunda en noviembre (precipitación pluvial). Se evaluaron algunos parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y elementos traza. El tipo de agua predominante en la zona de estudio, según lo establecido por el diagrama de Piper y las concentraciones de los iones mayoritarios, fue bicarbonatada-cálcica ($\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$), cuyo posible origen sea consecuencia del material geológico y a la interacción agua-roca. Se encontraron concentraciones de hierro (Fe) (0.8 mg/L) superiores a los límites máximos permitidos por las normas mexicanas para agua potable. El sitio S6 presentó las concentraciones más elevadas de algunos parámetros (nitratos (NO_3^-), fosfatos (PO_4^{3-}), coliformes fecales). El cálculo del Índice de Calidad del Agua (ICA) mostró que el agua en el área de estudio podría no ser apta para uso potable, pero sí para riego agrícola.

Palabras clave: especiación química, diagrama de Piper, río Duero, ICA, distribución espacial



Abstract

We evaluated the water quality of six springs that supply drinking water and agricultural irrigation of the El Platanal community, Jacona City, Michoacán. Two sampling campaigns were carried out, on May (dry season) and the second one in November (wet season). Physicochemical and microbiological parameters and trace elements were evaluated. The predominant type of water in the area, according to Piper diagram and mayor ions concentration was calcium bicarbonate ($\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$), which may be cause due to geological conditions and wáter-rock interactions. Above permissible Iron (Fe) concentrations (0.8 mg/L) were found according to Mexican standards for drinking water. The site S6 presented the highest concentrations of some parameters like nitrates (NO_3^-), phosphates (PO_4^{3-}), fecal coliforms. The Water Quality Index (WQI) showed that the water in the study area is not suitable for drinking, but it is suitable for agricultural irrigation.

Keywords: chemical speciation, Piper diagram, Duero River, WQI, spatial distribution

1. Introducción

Los manantiales juegan un papel importante en el suministro de agua superficial en las cuencas, ya que es utilizada para diversas actividades humanas (domésticas, agrícolas, industriales) (Dumarú *et al.*, 2021). La calidad de sus aguas varía según la ubicación geográfica y los factores ambientales, como la composición química de las rocas, las precipitaciones y la formación del suelo, así como factores antropogénicos. Por esta razón, el monitoreo y la conservación de estas fuentes son necesarias para conseguir una gestión adecuada del agua (Ameen *et al.*, 2019).

El estudio de la química del agua permite conocer los procesos que controlan su composición y ayudan a definir su idoneidad para cualquier uso (Gaikwad *et al.*, 2019). Por otro lado, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas que complementan los estudios de calidad del agua mediante la interpolación de datos obtenidos y, posteriormente, plasmados en mapas de distribución espacial con la finalidad de identificar zonas posibles de contaminación (Reyes *et al.*, 2020). Otra herramienta valiosa en los estudios de calidad del agua es el cálculo del Índice de Calidad del Agua (ICA), el cual engloba algunos parámetros y, a través de fórmulas matemáticas, proporciona un valor que especifica, de manera general, el grado de contaminación en la zona de estudio (Nnorom *et al.*, 2019).

La cuenca del río Duero, ubicada al noroeste del estado de Michoacán, ha experimentado cambios sustanciales en términos del uso de la tierra debido

al crecimiento urbano y al desarrollo de diversas actividades (CONAGUA, 2020). El Platanal, una comunidad localizada al norte del municipio de Jacona, Michoacán, colindante con el río Duero, se caracteriza por abastecerse de agua de seis manantiales para uso potable y agrícola. Por otra parte, en esta zona, la mayoría de los asentamientos son irregulares, es decir, no cuentan con instalaciones sanitarias adecuadas para las descargas de aguas residuales domésticas y las actividades agrícolas no han desarrollado alternativas de mejoras con respecto a las escombreras, por ello, fue de vital importancia conocer las características del agua en mención.

El objetivo de esta investigación estuvo centrado en evaluar la calidad del agua de seis manantiales que abastecen a la comunidad de El Platanal a través de una caracterización fisicoquímica, bacteriológica y de elementos traza, con el apoyo de herramientas digitales como SIG e ICA para una mejor comprensión del comportamiento químico del agua.

2. Materiales y métodos

2.1. Localización del área de estudio

La comunidad denominada El Platanal, se encuentra ubicada al norte del municipio de Jacona, en la región del bajío del estado de Michoacán y a 6 km de la cabecera municipal, entre las coordenadas $19^{\circ}55'53''$ y $102^{\circ}15'17''$ a una altitud de 1,597 m s.n.m. Colinda al norte con Zamora y al oeste con Tangancícuaro (Figura 1). Esta comunidad se caracteriza por estar ubicada en las faldas de los cerros de La Beata y La Beata. Cuenta con una población aproximada de 3,045

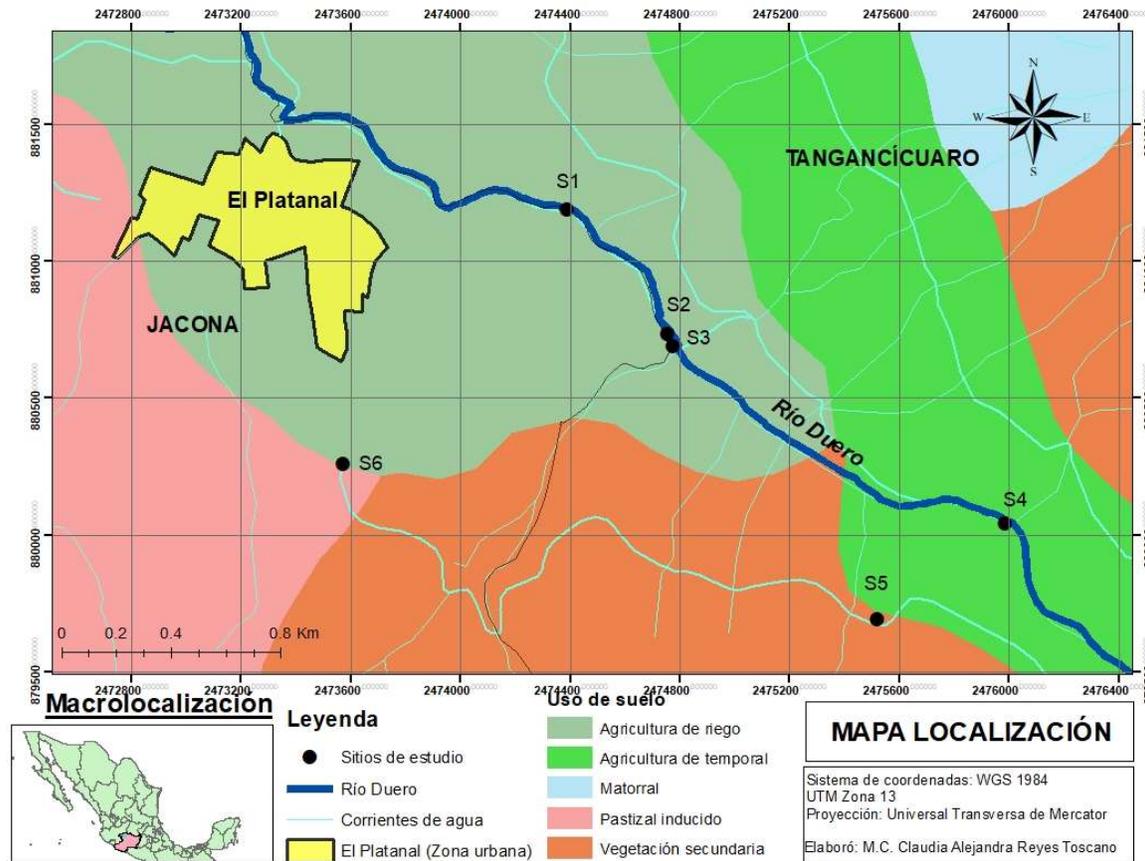


Figura 1. Mapa de usos de suelo de la zona de estudio.

habitantes. Los suelos del área corresponden principalmente al tipo chernozem, siendo principalmente su uso agrícola y ganadero. Respecto a su hidrología, esta población colinda al norte con el río Duero, principal cuerpo de agua de la región y al sureste con seis manantiales, los cuales son utilizados para uso potable, agrícola y ganadero (INEGI, 2020).

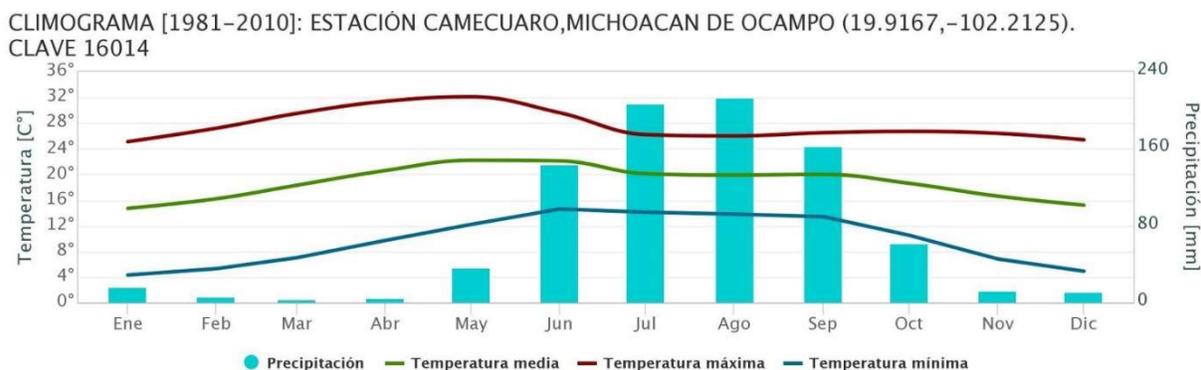
2.2. Geología

La comunidad de El Platanal está localizada en la subprovincia de “Zonas de Fosas Tectónicas”, ubicada al noroeste del estado de Michoacán; presenta una constante actividad volcánica, reflejada por sus innumerables aparatos volcánicos y rocas extrusivas, conformadas esencialmente por rocas basálticas y andesíticas. Cuenta con altitudes entre 1,590 y 1,690 m.s.n.m., desarrollada en una antigua cuenca lacustre. En las sierras que rodean este poblado afloran los basaltos del Cuaternario, subyaciendo a rocas volcánicas de menor permeabilidad. Los depósitos aluviales que forman los manantiales se caracterizan

por presentar un nivel de permeabilidad y capacidad de infiltración muy alto, por lo tanto, son excelentes receptores de recarga de lluvias y afloramiento de los acuíferos (CONAGUA, 2020).

2.3. Climatología

Según la clasificación de los climas de Köppen, modificada por García (1964), quien lo adaptó a las condiciones de México, la zona de estudio presenta un clima C(w1) templado subhúmedo, con una temperatura media anual de 23 °C, una temperatura máxima de 32 °C y una temperatura mínima de 4 °C. Además, presenta un intervalo de precipitación anual entre 5 y 220 mm, siendo marzo el mes que reporta la menor precipitación y agosto el mes que muestra la mayor cantidad. Asimismo, el porcentaje de precipitación pluvial invernal oscila entre el 5 y 10.2% del total anual (SMN, 2022). En la figura 2 se presenta un climograma de la estación Camécuaro, la cual corresponde a la comunidad de El Platanal.



Los datos se han descargado de: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/climogramas-1981-2010>

Figura 2. Climograma (1981-2010). Estación Camécuaro, Michoacán de Ocampo. (19.9167, -102.2125). (SMN, 2022).

2.4. Colecta de muestras

Se colectaron muestras en seis manantiales representativos de la zona de estudio, localizados en la cercanía del río Duero, en zonas agrícolas, ganaderas y que sirven como suministro de agua potable y riego agrícola para la comunidad. En el cuadro 1 se presentan las coordenadas geográficas de estos puntos.

La colecta de muestras se llevó a cabo, en mayo de 2019 (estiaje) y otra en noviembre del mismo año (precipitación pluvial). En cada sitio se tomaron 2 L de muestra para la determinación de parámetros fisicoquímicos y 120 mL para análisis de elementos traza. En ambos casos se utilizaron recipientes de HDPE (Polietileno de Alta Densidad), los cuales se llenaron para minimizar la presencia de aire y evitar posibles cambios químicos (DOF, 2002). Por su parte, la colecta de muestras para los elementos traza se llevó a cabo en recipientes de polietileno de 125 mL, previamente descontaminados con ácido nítrico (HNO₃) y llenados con agua desionizada. En cada sitio se preparó un control en el que se vació y se volvió a llenar con agua desionizada. Otra botella se llenó con la

muestra colectada. Todas las botellas se preservaron con HNO₃ concentrado. Finalmente, las muestras de coliformes fecales fueron tomadas en bolsas de plástico estériles, las cuales se mantuvieron en refrigeración (4 °C) hasta su análisis.

2.5. Técnicas de medición

El pH, la conductividad eléctrica y el oxígeno disuelto fueron medidos en campo con un potenciómetro de la maleta de campo (Thermo Scientific Orion®, modelo Star A329). El potencial redox también fue medido en campo con el mismo electrodo de hidrógeno. La temperatura se midió con un termómetro de inmersión (Brannan) en cada sitio de estudio. Se determinaron parámetros fisicoquímicos como dureza total (DOF, 2001a), sólidos disueltos totales (SDT) (DOF, 2015a) y alcalinidad total (DOF, 2001b), mientras que los cationes mayoritarios se determinaron en el Espectrómetro de Absorción Atómica (EAA) (Perkin Elmer AAnalyst 200): Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, los aniones mayoritarios como Cl⁻ (DOF, 2001c), SO₄²⁻ (DOF, 2014), HCO₃⁻, CO₃²⁻, PO₄³⁻ (DOF,

Cuadro 1. Localización de los manantiales de estudio en El Platanal, Michoacán.

Sitio	Coordenadas geográficas
S1	19°55'55.3440" N 102°14'43.8135" W
S2	19°55'40.5084" N 102°14'31.0808" W
S3	19°55'39.0900" N 102°14'30.4335" W
S4	19°55'06.5640" N 102°14'04.5877" W
S5	19°55'18.0264" N 102°13'48.6007" W
S6	19°55'24.9348" N 102°15'11.8498" W

2001d) y NO_3^- (DOF, 2001e), se determinaron conforme a la metodología propuesta en las normas mexicanas respectivas y los coliformes fecales a través de la técnica de Número Más Probable (NMP/ 100 mL) (DOF, 2015b), los cuales se analizaron en el Laboratorio de Calidad del Agua de la Dirección de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en Michoacán, aplicando técnicas analíticas de potenciometría, volumetría y espectrometría de absorción atómica, siguiendo las recomendaciones establecidas por la normatividad mexicana. Los elementos traza: arsénico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), hierro (Fe), níquel (Ni) y plomo (Pb), fueron determinados en un EAA (Perkin Elmer AAnalyst 200®) en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

A partir de los resultados sobre la caracterización fisicoquímica del agua, se realizó una modelación de la especiación química de los elementos traza encontrados mediante el programa Visual Minteq 3.1 y se construyeron diagramas de Piper y Schöeller con el programa AquaChem 10 para conocer las facies hidroquímicas del agua de estudio. Adicionalmente, se calcularon diversos índices para conocer la idoneidad del agua utilizada para riego agrícola, como Relación de Adsorción de Sodio (RAS) (Bashir *et al.*, 2020), porcentaje de sodio (% Na) (Setia *et al.*, 2021), índice de Kelly (IK) (Setia *et al.*, 2021), carbonato de sodio residual (CSR) (Shil *et al.*, 2019) y riesgo por salinidad (RS) (Zhang *et al.*, 2020). Se calculó el ICA propuesto por Montoya *et al.* (1997) y aprobado por la CONAGUA, con la finalidad de conocer la conveniencia de esta agua para uso potable. Por último, se realizaron mapas de distribución espacial de los valores obtenidos del ICA a través del programa ArcGis 10.6.1.

El balance de iones es la verificación de que la suma de miliequivalente (meq) de aniones es aproximadamente igual a la suma de meq de cationes; esto último aprovechando la electroneutralidad del agua, propiedad que puede distorsionarse si existen ciertos fenómenos. El error que resulta de dicho balance se expresa por la diferencia de iones: si el error es negativo, significa que hay exceso de aniones y si es positivo, es porque hay exceso de cationes. Se considera aceptable un error menor o igual al 10 % (Alfaro, 2000).

$$\% \text{ Error} = \frac{\sum \text{Cationes} - \sum \text{Aniones}}{\sum \text{Cationes} + \sum \text{Aniones}} \times 100$$

2.6. Índice de Calidad del Agua

El Índice de Calidad del Agua (ICA) es un valor adimensional que refleja la calidad general del agua en el mismo tiempo y ubicación en función de los diferentes parámetros analizados. Su objetivo principal es convertir datos complejos de parámetros físicos, químicos y biológicos en datos utilizables y manejables (Bashir *et al.*, 2020). Para calcular el ICA en los manantiales, se aplicó el procedimiento propuesto por Montoya *et al.* (1997) en su estudio sobre aguas superficiales del estado de Jalisco-México. Actualmente este es el más utilizado en México y autorizado por la CONAGUA para aplicarlo en cuerpos de agua superficial para uso potable:

- i. Este ICA convierte los datos físicos en correspondientes índices de calidad por parámetro (I_i), mediante la formulación de modelos matemáticos asignados a cada uno de ellos, tal y como se muestra en el cuadro 2.
- ii. Algunos parámetros son más significativos que otros en la calidad del agua, por ello la modelación de este ICA incluye pesos o ponderaciones (W_i), según su orden de importancia respectivo.
- iii. Finalmente, los índices por parámetro son promediados a fin de obtener el ICA de la muestra de agua, con la siguiente ecuación:

$$ICA = \frac{\sum_{i=1}^n (I_i * W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

(Montoya *et al.*, 1997)

Donde:

ICA = Índice de Calidad del Agua ($0 < ICA < 100$)

I_i = Función subíndice del parámetro i , $0 < I_i < 100$

W_i = Peso de importancia del parámetro (ponderación) i , $0 < W_i < 5$

n = Número de parámetros empleados

En el cuadro 3 se muestran los intervalos del grado de contaminación de acuerdo con los resultados obtenidos del cálculo del ICA.



Cuadro 2
Modelos matemáticos y ponderación del ICA (Montoya, *et al.*, 1997).

No.	Parámetro	Ecuación del parámetro	Ponderación
1	Oxígeno disuelto	$I = \frac{(100)(OD)}{14.492 - 0.384 T + 0.064 T^2}$	5
2	Coliformes fecales	$I = 97.5(5xCF)^{0.270}$	4
3	Conductividad eléctrica	$I = 540(CE)^{-0.379}$	1
4	Cl ⁻	$I = (Cl^-)^{0.270}$	0.5
5	Dureza total	$I = 10^{1.974 - [0.00174 \cdot Dur]}$	1
6	Alcalinidad	$I = 105(Alc)^{-0.185}$	0.5
7	pH<7	$I = 10^{0.2336 + 0.440(pH)}$	1
	pH=7	$I = 100$	1
	pH>7	$I = 10^{[4.22 - 0.293(pH)]}$	1
8	SDT	$I = 109.1 - 0.0175(SDT)$	0.5
9	PO ₄ ³⁻	$I = 34.215 (PO_4^{3-})^{-0.460}$	2
10	NO ₃ ⁻	$I = 62.2(NO_3^-)^{-0.343}$	2

2.7 Indicadores de Calidad del Agua para riego agrícola

La idoneidad del agua para riego agrícola depende de las propiedades físicas y químicas del agua, especialmente de los iones disueltos (Nofal *et al.*, 2019). Para ello, se calcularon los siguientes índices (ver Cuadro 4).

3. Resultados y discusión

3.1. Parámetros de campo

Los valores de pH obtenidos de los manantiales variaron entre 6.8 y 7.9 en la temporada de estiaje y

de 6.9 a 7.7 en temporada de precipitación pluvial. Se observa una ligera tendencia alcalina en la mayoría de los sitios, probablemente por la mineralización del agua. En las dos colectas, todos los valores se encontraron dentro de los límites máximos permitidos por la normatividad mexicana, tanto para uso potable (DOF, 2021a) como para riego agrícola (DOF, 2021b).

La temperatura del agua varió entre 22 °C (S5) y 24 °C (S1) en la colecta de mayo, mientras que en la de noviembre, el intervalo se observó entre 20 °C (S5) y 22 °C (S1). El descenso de temperatura que se

Cuadro 3
Clasificación del Índice de Calidad del Agua (Montoya *et al.*, 1997).

ICA	Criterio general
85-100	No contaminado
75-85	Aceptable
55-75	Poco contaminado
35-55	Contaminado
0-35	Altamente contaminado

Cuadro 4
Resumen de indicadores de calidad de agua para riego agrícola.

Índice	Fórmula	Límites
Relación de Adsorción de Sodio (RAS) (Rouhani, <i>et al.</i> , 2021)	$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Mg^{2+} + Ca^{2+}}{2}}}$	<10 Excelente 10-18 Buena 18-26 Dudable >26 Inadecuada
Porcentaje de Sodio (% Na) (Singh <i>et al.</i> , 2019)	$\%Na = \frac{Na^+ \times 100}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+}$	<040 Buena 40-60 Permisible 60-80 Dudable >80 Inadecuada
Carbonato de Sodio Residual (meq/L) (CSR) (Setia <i>et al.</i> , 2021)	$CSR = (CO_3^{2-} + HCO_3^-) - (Ca^{2+} + Mg^{2+})$	<1.25 Segura 1.25-2.5 Moderada >2.5 Inadecuada
Índice de Kelly (IK) (Machender <i>et al.</i> , 2014)	$IK = \frac{Na^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+}}$	KI <1 Aceptable KI > 1 Exceso de sodio KI < 2 Deficiencia de sodio
Riesgo por Salinidad (RS) (Gnanachandrasamy <i>et al.</i> , 2015)	Conductividad eléctrica	<250 Excelente o baja 250-750 Buena o media 750-2250 Permisible o alta 2,250-5,000 Inadecuada

observó en el segundo periodo, posiblemente se debió al clima de la región derivado de la época del año. El agua de esta zona no es considerada de origen termal, por lo que no rebasa los límites máximos establecidos por la normatividad mexicana para uso agrícola. Wong *et al.* (2021) mencionaron, en una investigación similar, que la temperatura de los manantiales analizados en la ciénega de Tamasopo, en San Luis Potosí, México, depende en ocasiones únicamente del clima de la zona y de la temporada del año.

La conductividad eléctrica en el área de estudio se encontró en un intervalo de 196.8 a 220 μ S/cm en la temporada de precipitación pluvial, en tanto que en la temporada de estiaje, se incrementó de 200 a 254 μ S/cm, en donde el sitio S5 fue el que presentó los menores valores y S6 los mayores. Este parámetro indicó la presencia de iones en todos los sitios de estudio. Los valores más bajos se presentaron en la temporada de precipitación pluvial, posiblemente por la disminución en la concentración de iones disueltos

en las aguas superficiales analizadas en toda el área de estudio por efecto de las lluvias.

En la zona de estudio se observaron valores positivos de potencial redox, en un intervalo 169 a 191.5 mV en mayo, al tiempo que en noviembre los valores variaron entre 171 y 191.1 mV. El sitio que presentó el valor mínimo fue el S4 y el valor máximo S1 en las dos campañas de colectas, es decir, que reflejan ambientes oxidantes, de tal manera que, favorecen la presencia de sulfatos y nitratos en las aguas de los manantiales.

Los resultados muestran una disminución en la concentración de oxígeno disuelto (O₂) en la temporada de estiaje, posiblemente por el aumento de la temperatura del agua de manantial y por el consumo de oxígeno por parte de los microorganismos. El sitio que presentó las mayores concentraciones fue el S5 (6.56 mg/LO₂), el cual también mostró las más bajas temperaturas, por el contrario, el más bajo en concentraciones fue el S4 (4.92 mg/LO₂) y el que mostró las temperaturas más elevadas. Los resultados de este parámetro fueron menores en comparación con

**Cuadro 5**

Resultados de los parámetros medidos en campo en las dos campañas de colectas en el río Duero. NOM-127 = NOM-127-SSA1-2021; = NOM-001-SEMARNAT-2021

Sitio	Colecta	pH	Potencial rédox (mV)	Temperatura (°C)	Conductividad eléctrica (µS/cm)	Oxígeno disuelto (mg/L)
S1	may-19	6.8	191.5	24	206	5.85
	nov-19	6.9	191.1	22	202	5.92
S2	may-19	7.7	178	23	206	5.71
	nov-19	7.3	176	22	204	5.84
S3	may-19	7.1	187.1	23	217	5.89
	nov-19	7.4	186.8	21	216	5.93
S4	may-19	7.9	169.1	24	203	5.41
	nov-19	7.8	171	21	199	5.54
S5	may-19	7.6	184	22	200	6.17
	nov-19	7.6	183.4	20	196	6.56
S6	may-19	7.3	190.2	23	254	4.92
	nov-19	7.6	190.3	21	220	5.09
NOM-127		6.5-8.5	-	-	-	-
NOM-001		6-9	-	35	-	-

los obtenidos por Silva *et al.* (2016) en manantiales ubicados en la cuenca alta del río Duero, seguramente porque estos sirven como fuente de descarga de aguas residuales domésticas, lo cual afecta la calidad del agua de estos cuerpos.

Se muestran en el cuadro 5 los resultados de los parámetros de campo.

3.2. Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos

En el área de estudio se encontraron valores de SDT entre 236.16 mg/L (S5) y 264 mg/L (S6) en la temporada de estiaje, mientras que en precipitación pluvial se encontraron entre 97.2 mg/L (S4) y 121.8 mg/L (S6). Esto establece que, probablemente, todos los sitios de estudio contienen una variedad de iones disueltos de manera natural que varían según las regiones geológicas (Abdalla *et al.*, 2012). Se observa una disminución en la concentración en la colecta de noviembre con respecto a la de mayo, esto pudiera deberse a la dilución de los iones en el agua producto de la precipitación pluvial de la temporada. Los resultados de SDT no superan los límites máximos establecidos por la normatividad nacional e internacional de 1,000 mg/L para uso potable (DOF, 2021a). Estos

valores son más bajos que los reportados por Chacón *et al.* (2016) en manantiales del distrito de Ocampo en Chihuahua, quizás por el desarrollo de la actividad minera que se realiza en esa zona.

Las concentraciones de dureza total entran dentro de los límites máximos permisibles de la normatividad mexicana para uso potable (DOF, 2021). Los valores se observan en un intervalo de 67.6 mg/L (S1) hasta 80.6 mg/L (S6) en la primera colecta (mayo); en la segunda colecta (noviembre) es entre 29.3 mg/L (S1) y 45 mg/L (S6). Se puede determinar que el agua en los sitios de estudio es blanda (<50 mg/L) y que no representa problema alguno para las actividades domésticas ni agrícolas.

En los manantiales analizados se encontraron concentraciones de alcalinidad con un mínimo de 118 mg/L (S1) y un máximo de 126 mg/L (S6) en la primera campaña, en tanto que en la segunda se encontraron valores entre 96 mg/L (S3) y 105 mg/L (S6); el sitio S6 registró el valor más alto de este parámetro. En esta investigación se puede apreciar un comportamiento similar entre la alcalinidad y la dureza total, por lo que se puede inferir la presencia, principalmente, de sales bicarbonatadas de calcio (Ca²⁺) y

la disminución de estos dos parámetros en la temporada de precipitación pluvial debido a la dilución. Los valores encontrados en estos sitios son inferiores en comparación con una investigación realizada por Ameen (2019) en manantiales de Bala Barwari, en Iraq, en los que se expuso que el agua de estos cuerpos hídricos es apta para uso potable, a pesar de colindar con zonas agrícolas.

En la primera colecta se observó la presencia de coliformes fecales en un intervalo de 1.1×10^3 NMP/100 mL (S3) a 1.1×10^5 NMP/100 mL (S6), al tiempo que en la segunda se observaron valores entre 9×10^3 NMP/100 mL (S3) y 2.4×10^5 NMP/100 mL (S6), lo que permite suponer que todos los manantiales presentaron contaminación de origen fecal. Dado que este parámetro es un indicador de la actividad humana, se considera que los cuerpos de agua están sometidos a amenazas e impactos provocados por las múltiples descargas de aguas residuales, actividades agrícolas y ganaderas, entre otras. Wong *et al.* (2021) también estudiaron la contaminación microbiológica de algunos manantiales en Tamasopo, San Luis Potosí, México, en los que se detectó el vertimiento intermitente de agua residual doméstica,

principalmente en los meses de precipitación pluvial, por ello el incremento de estos valores en esa temporada, tal y como se puede observar en los manantiales de El Platanal.

A continuación, se muestran en el cuadro 6 los resultados de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.

3.3. Iones Mayoritarios

El Ca^{2+} se visualizó en un intervalo entre 26.3 mg/L (S1) y 42.67 mg/L (S6) en la campaña realizada en la temporada de estiaje. En época de precipitación pluvial hubo una disminución en la concentración de este catión en la que el valor mínimo fue 12.4 mg/L (S1) y el máximo 20.045 mg/L (S6), lo cual es posible que haya ocurrido por la dilución, producto de la temporada de precipitación pluvial. El Ca^{2+} fue el catión predominante en todos los sitios de estudio, posiblemente por el intemperismo de las formaciones basálticas de la zona y por la meteorización de bicarbonatos y silicatos (Velázquez *et al.*, 2010).

El Mg^{2+} se observó en un intervalo de 7.68 mg/L (S4) y 10.66 mg/L (S6) durante la primera campaña;

Cuadro 6
Resultados de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de las dos campañas de colectas
NOM-127 = NOM-127-SSA1-2021; = NOM-001-SEMARNAT-2021

Sitio	Campaña de colectas	SDT (mg/L)	Alcalinidad total (mg/L)	Dureza total (mg/L)	Coliformes fecales (NMP/100 mL)
S1	may-19	243.48	118	67.60	2.6×10^3
	nov-19	98.60	98	29.30	2.3×10^4
S2	may-19	245.64	118	73.60	2.3×10^4
	nov-19	98.50	104	29.30	2.3×10^4
S3	may-19	259.20	122	75.60	1.1×10^3
	nov-19	103.70	104	33.80	9×10^3
S4	may-19	239.52	124	69.80	8.6×10^3
	nov-19	97.20	96	29.30	1.5×10^4
S5	may-19	236.16	120	70.80	1.6×10^4
	nov-19	98.80	97	29.30	4.3×10^4
S6	may-19	264.00	126	80.60	1.1×10^5
	nov-19	121.80	105	45.00	2.4×10^5
NOM-127		1,000	-	500	No detectable
NOM-001		-	-	-	-

en la segunda se encontraron valores entre 3.54 mg/L (S4) y 8.76 mg/L (S6).

En la primera campaña se visualizaron concentraciones de Na^+ con un mínimo de 4.91 mg/L (S1) y un máximo de 17.34 mg/L (S6), mientras que, en la segunda campaña se obtuvieron resultados entre 2.55 mg/L (S1) y 8.76 mg/L (S6). Sus concentraciones no rebasaron los límites máximos permisibles por la normatividad nacional para uso potable.

Respecto al K^+ , los valores obtenidos se observaron en un intervalo entre 2.69 mg/L (S1) y 8.96 mg/L (S6) en la primera colecta de muestras, y en la segunda, se encontraron valores entre 1.03 mg/L (S1) y 4.91 mg/L (S6). El origen de este catión probablemente es natural, debido a que es el resultado de la meteorización química y la posterior disolución de iones de silicato contenidos en las arcillas (Redwan *et al.*, 2016).

El orden de abundancia conforme a la concentración de los cationes en la zona de estudio fue el siguiente: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$, coincidiendo con los resultados mostrados por Reyes *et al.* (2020) y Silva *et al.* (2013), quienes estudiaron cuerpos de agua pertenecientes a la misma cuenca que El Platanal.

El HCO_3^- juega un papel importante en la alcalinidad y en la dureza total; fue el anión predominante en la zona de estudio, su presencia posiblemente se debe a un proceso de disolución de las rocas, principalmente calizas, comunes en la región, lo que provoca un aumento en el pH de forma natural. En la temporada de estiaje, el intervalo de concentraciones varió entre de 143.52 mg/L (S2) y 153.54 mg/L (S6); en precipitación pluvial fue de 116.75 mg/L (S4) hasta 127.84 mg/L (S6).

Los CO_3^{2-} se observaron en un rango entre 0.04 mg/L (S1) y 0.64 mg/L (S4) en la temporada de estiaje, en tanto que en la temporada de precipitación pluvial el intervalo varió entre 0.04 mg/L (S1) y 0.36 mg/L (S4).

Las concentraciones de los SO_4^{2-} oscilaron en un intervalo de 2.92 mg/L (S2) y 4.28 mg/L (S6) en el primer muestreo, al tiempo que en el segundo varió entre 2.92 mg/L (S2) y 4.28 mg/L (S6), por lo que no excede los límites máximos permisibles de las normas nacionales e internacionales para uso potable. Su presencia en concentraciones bajas puede ser de origen geogénico, así lo demostró Wong *et al.* (2021) en el estudio realizado en los manantiales de Tamasopo,

donde explicaron que la presencia de este anión, en concentraciones menores a 10 mg/L, es de origen natural. Además, se considera como un nutriente importante y el segundo anión predominante.

Los Cl^- se encuentran en todas las aguas naturales en concentraciones variables y, generalmente, predominan en aguas subterráneas y no en superficiales. En los sitios de estudio se visualizaron en la temporada de estiaje en valor mínimo de 3.81 mg/L (S3) y un máximo de 7.01 mg/L (S1) y en precipitación pluvial se presentó un intervalo de valores de 4.6 mg/L (S1) a 20.3 mg/L (S3), los cuales no rebasaron los límites máximos permisibles de la normatividad mexicana para uso potable.

Los PO_4^{3-} presentaron en temporada de estiaje concentraciones entre 0.18 mg/L (S1) y 5.6 mg/L (S6) y en temporada de precipitación pluvial entre 0.11 mg/L (S1) y 4.1 mg/L (S6); el sitio S6 mostró las mayores concentraciones.

Los NO_3^- se presentaron en temporada de estiaje en concentraciones entre 1.15 mg/L (S3) y 7.4 mg/L (S6); en temporada de precipitación pluvial el intervalo varió entre 1.09 (S3) y 6.1 mg/L (S6), mostrando una ligera disminución. Estos resultados no rebasaron los límites máximos permisibles por la normatividad mexicana para uso potable. El sitio S6 fue el que presentó las mayores concentraciones de NO_3^- . La presencia de este anión indica, probablemente, que la materia orgánica se encuentra presente en los sitios de estudio. Aksever *et al.* (2016) obtuvieron concentraciones menores de nitratos en manantiales de Başköy, Turquía, en comparación con los hallados en los manantiales de El Platanal, asociándolos a las condiciones naturales de la zona, debido a que en concentraciones mayores a 10 mg/L, empieza a ser un indicativo de la actividad antropogénica.

El orden de abundancia conforme a la concentración encontrada de los aniones en los sitios de estudio fue el siguiente: $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{PO}_4^{3-}$.

Los resultados de los iones mayoritarios analizados Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} y Cl^- , se presentan en el cuadro 7.

3.4. Elementos traza

El Fe y As estuvieron presentes en todos los sitios de estudio, mientras que los elementos traza como Cr, Cd, Ni, Pb, no fueron detectados. Los resultados se muestran en el cuadro 8.

Cuadro 7

Resultados de los cationes y aniones mayoritarios medidos en las dos campañas de colectas, expresado en mg/L y el balance iónico (porcentaje). NOM-127 = NOM-127-SSA1-2021; = NOM-001-SEMARNAT-2021

Sitio	Campaña		Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	Balance iónico
	de	colectas											
S1	may-19		26.30	8.19	4.91	2.69	3.30	7.01	143.91	0.04	1.58	0.18	-7.8
	nov-19		12.40	4.05	2.55	1.03	2.00	4.60	119.51	0.04	1.47	0.11	-9.6
S2	may-19		39.70	7.84	12.07	6.37	2.92	5.93	143.52	0.43	1.94	0.29	9.5
	nov-19		18.11	3.99	6.47	4.69	3.00	13.80	126.75	0.12	1.76	0.23	8.4
S3	may-19		38.61	9.34	13.43	6.98	3.73	3.81	148.73	0.11	1.15	0.34	3.69
	nov-19		19.20	4.13	7.39	3.85	4.00	20.30	126.72	0.15	1.09	0.27	-9.64
S4	may-19		31.94	8.97	8.11	4.22	3.05	5.45	150.65	0.62	1.36	0.44	1.01
	nov-19		16.90	4.86	4.13	2.06	4.00	10.10	116.75	0.36	1.20	0.33	-5.68
S5	may-19		33.26	7.68	11.63	5.69	3.24	5.93	146.08	0.31	1.54	0.38	4.89
	nov-19		17.33	3.54	5.96	3.41	3.00	6.50	118.05	0.28	1.43	0.26	-6.37
S6	may-19		42.67	10.66	17.34	8.96	4.28	6.01	153.54	0.18	7.40	5.60	4.98
	nov-19		20.05	4.97	8.76	4.91	17.00	9.20	127.84	0.25	6.10	4.10	-6.19
NOM-127			-	-	200	-	400	250	-	-	10	-	
NOM-001			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Los valores de Fe se encontraron en un intervalo entre 0.0013 mg/L (S3) y 0.8 mg/L (S6) en la temporada de estiaje, mientras que en la temporada de precipitación pluvial alcanzó un intervalo entre 0.0029 mg/L (S3) y 0.7 mg/L (S6). El sitio S6 sobrepasó el límite máximo permitido por la normatividad nacional para uso potable (DOF, 2021a), quizás por la presencia de ferrobacterias, las cuales absorben el oxígeno disuelto de las aguas superficiales, lo que coincide con los valores de oxígeno disuelto, en donde el sitio S6 presentó las más bajas concentraciones de este parámetro en las dos colectas de muestras. La presencia de este elemento traza puede deberse también al ferromagnesio contenido de manera natural en las rocas de la zona (Velázquez *et al.*, 2010).

El intervalo de valores de As en la primera colecta fue de 0.6 µg/L (S3) a 6 µg/L (S6) y en la segunda fue 0.3 µg/L (S3) a 5.5 µg/L (S6). El manantial que presentó la concentración más elevada de este elemento en las dos colectas de muestras fue el S6, pero no sobrepasó el límite máximo permitido por la

normatividad mexicana para uso potable (DOF, 2021a) y agrícola (DOF, 2021b). La presencia de este elemento traza en la zona de estudio puede estar asociada a su contenido en rocas piroclásticas de manera natural, debido al proceso de meteorización de rocas volcánicas; así lo demostraron Mancilla *et al.* (2011) en su investigación sobre la presencia de elementos traza en manantiales de Puebla y Veracruz, donde encontraron concentraciones de As en un intervalo entre 1 y 80 µg/L, sin rebasar el límite máximo permitido por la normatividad mexicana para uso potable y agrícola.

3.5. Especiación química

La especiación química se puede definir como el proceso de identificación y cuantificación de diferentes especies, formas o fases de sustancias químicas presentes en un medio, en este caso, el agua superficial (Naji *et al.*, 2010). Para llevar a cabo este proceso en la zona de estudio, se utilizó el programa Visual Minteq 3.1 para conocer las especies químicas formadas con las concentraciones de As y Fe.



Cuadro 8
Resultados de los elementos traza medidos en las campañas de colecta
NOM-127 = NOM-127-SSA1-2021; = NOM-001-SEMARNAT-2021

Sitio	Campaña de colectas	As (µg/L)	Fe (µg/L)
S1	may-19	1.20	2.80
	nov-19	1.00	3.00
S2	may-19	2.00	3.00
	nov-19	1.70	4.50
S3	may-19	0.60	1.30
	nov-19	0.30	2.90
S4	may-19	3.10	5.90
	nov-19	2.90	6.90
S5	may-19	2.80	4.40
	nov-19	2.60	4.80
S6	may-19	6.00	800
	nov-19	5.50	700
NOM-127		25	300
NOM-001		200	-

3.5.1 Arsénico

En la zona de estudio se encontró As en su forma As (V), la cual presentó un estado menos lábil y biotóxico que el As (III). Las especies encontradas en esta forma química fueron: HAsO_4^{2-} (73.45 %), seguido del H_2AsO_4^- (26.55%). Este elemento traza se moviliza fácilmente y predomina en pH entre 6.5 y 8.5 y valores positivos de potencial rédox, tal como los encontrados en este estudio. Presenta una menor toxicidad en comparación con el As (III).

3.5.2 Hierro

En los sitios de estudio se observó el Fe (III), en el que predominaron algunas especies como $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$ (90 %), FeOH^{2+} , $\text{Fe}(\text{OH})_{3\text{aq}}$ y $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$, las cuales se favorecen en pH neutros con tendencia alcalina y en ambientes oxidantes, lo que coincide con las características encontradas en la zona de estudio. En aguas superficiales, como manantiales, el Fe suele estar en su forma Fe (III) porque tiende a oxidarse bajo la acción del aire, pero en aguas subterráneas se encuentra principalmente en su forma Fe (II).

3.6. Facies hidroquímicas

El diagrama de Piper demostró que el catión predominante fue el Ca^{2+} seguido del Mg^{2+} (Figura 3), mientras que el anión predominante fue el HCO_3^- , en consecuencia, la facie hidroquímica a la que pertenecen los seis sitios de estudio son al grupo de las bicarbonatadas cálcicas ($\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$). Este tipo de aguas son consideradas jóvenes, poco evolucionadas y de baja mineralización, tal y como se observa en los resultados obtenidos de dureza total, alcalinidad total, iones mayoritarios y SDT. Estas características hidroquímicas son similares a las encontradas por Reyes *et al.* (2020) y Silva *et al.* (2013), en sus respectivas investigaciones de sitios específicos dentro de la cuenca del río Duero.

El diagrama de Schöeller (Figura 4) es una gráfica semilogarítmica que representa e identifica las concentraciones en meq/L de los iones mayoritarios (Ghanem *et al.*, 2021). En todos los sitios de estudio el catión predominante fue el Ca^{2+} , seguido del Mg^{2+} ; el anión predominante fue el HCO_3^- , confirmando la información proporcionada por el diagrama de Piper.

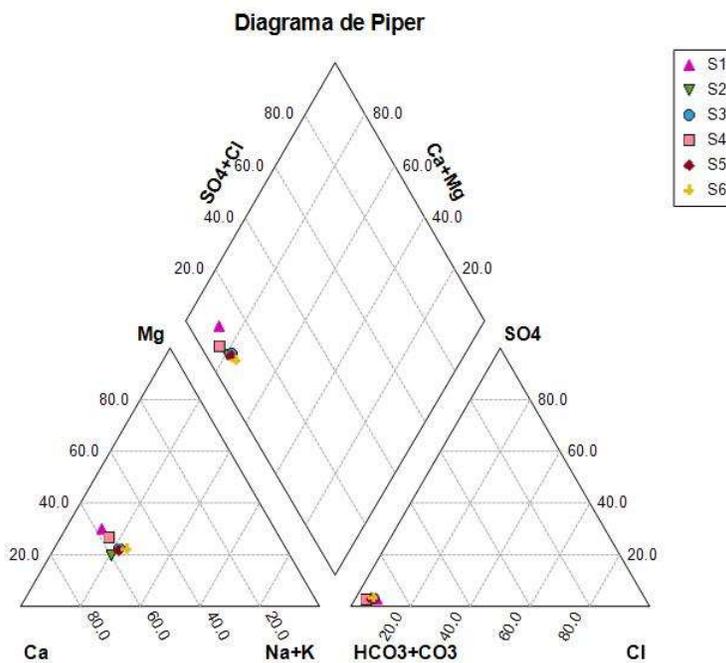


Figura 3. Diagrama de Piper de la zona de estudio.

3.7. Índice de Calidad del Agua

En esta investigación se evaluó la calidad del agua de seis manantiales de El Platanal, utilizando el método del ICA propuesto por Montoya *et al.* (1997), en el cual se tomaron en cuenta los siguientes parámetros: oxígeno disuelto, coliformes fecales, conductividad eléctrica, Cl⁻, alcalinidad total, pH, SDT, PO₄³⁻,

NO₃⁻ y dureza total, tanto para la temporada de estiaje como para la de precipitación pluvial. Los resultados del ICA (Cuadro 9) oscilaron en un intervalo de 27.69 a 38.64 en estiaje, en tanto que en temporada de precipitación pluvial abarcó de 28.66 a 41.85, lo que indica que el agua está contaminada y altamente contaminada. El manantial S6, en las dos campañas de colectas, fue el único que resultó ser evaluado

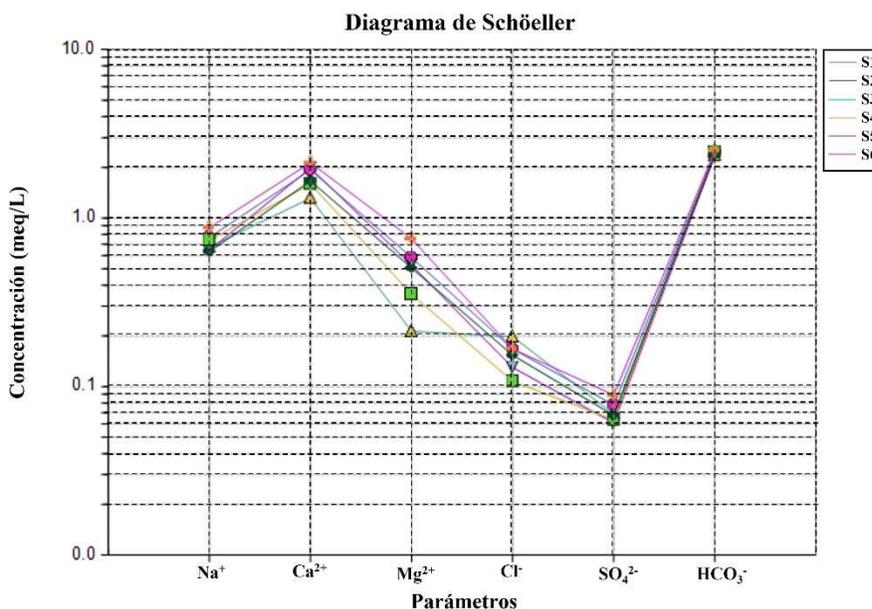


Figura 4. Diagrama de Schöeller de la zona de estudio.



Cuadro 9

Resultados del cálculo del ICA para diferentes usos del agua.

SITIOS	COLECTA	ICA	CRITERIO GENERAL
S1	may-19	38.64	Contaminado
	nov-19	41.85	Contaminado
S2	may-19	36.64	Contaminado
	nov-19	37.99	Contaminado
S3	may-19	37.95	Contaminado
	nov-19	38.99	Contaminado
S4	may-19	35.26	Contaminado
	nov-19	37.85	Contaminado
S5	may-19	36.31	Contaminado
	nov-19	39.18	Contaminado
S6	may-19	27.69	Altamente contaminado
	nov-19	28.66	Altamente contaminado

como altamente contaminado, probablemente por la proximidad de la zona urbana y agrícola. Por otro lado, todos los manantiales analizados pueden no ser aptos para uso doméstico, pero con un tratamiento adecuado pudieran ser utilizados de manera sustentable. Es importante destacar que, en comparación con el ICA calculado por Silva *et al.* (2013) en otros manantiales ubicados en la cuenca del río Duero, los

evaluados en este estudio presentaron un grado de contaminación menor, posiblemente por la falta de explotación por parte de la comunidad.

3.8. Mapas de distribución espacial de la calidad del agua

Los mapas de distribución espacial del cálculo del ICA de las dos colectas se observan en las figuras 5 y

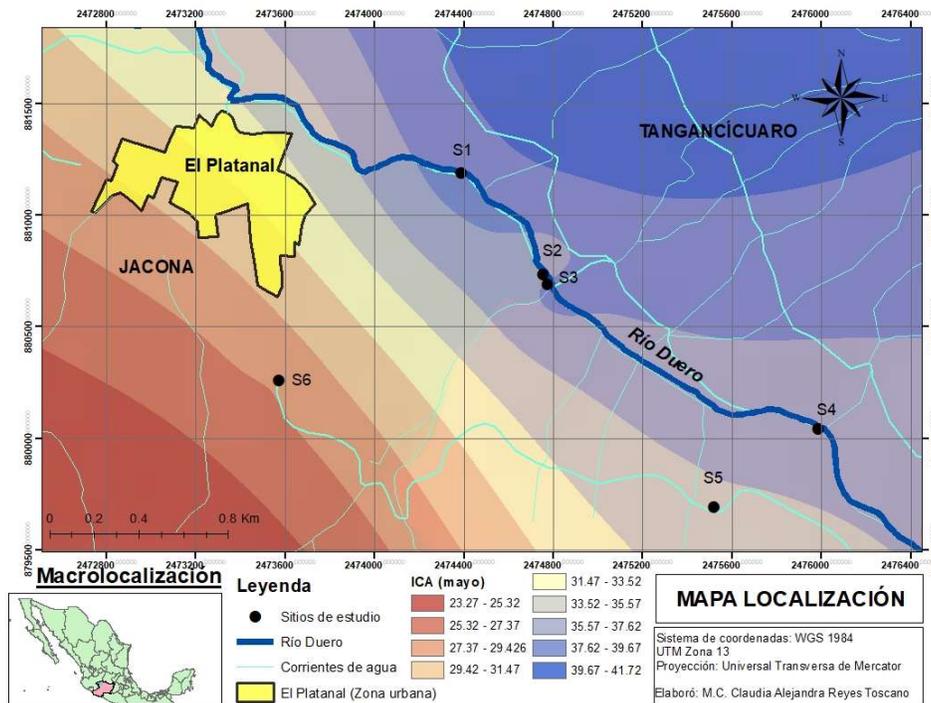


Figura 5. Distribución espacial de los valores del ICA de la colecta de mayo.

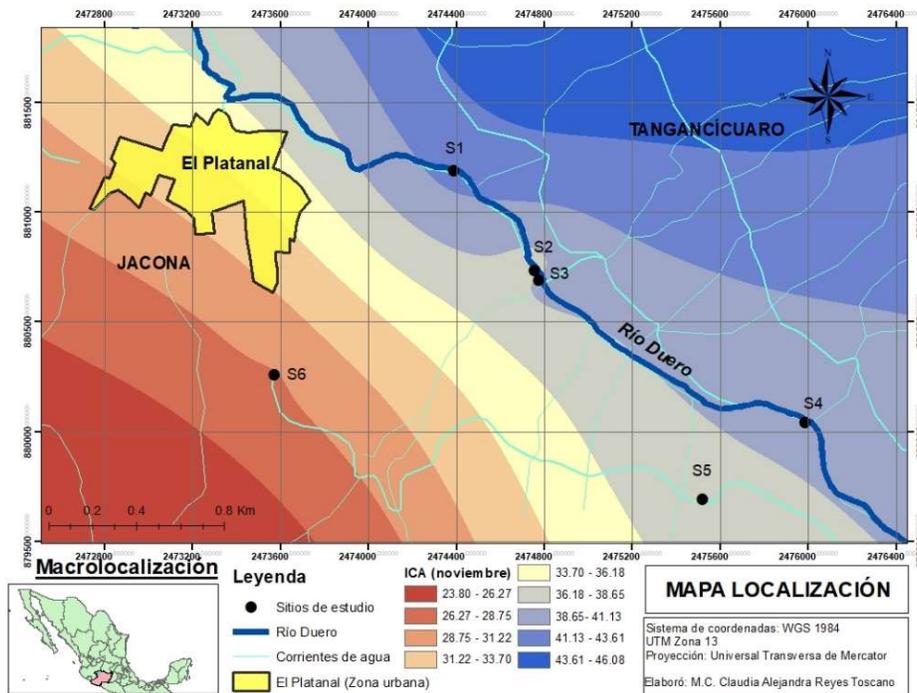


Figura 6. Distribución espacial de los valores del ICA de la colecta de noviembre.

6. Los resultados muestran que, la zona suroeste del área de estudio presentó el peor criterio de calidad del agua, mientras que los manantiales más alejados a la comunidad de El Platanal, mostraron el mejor criterio de calidad del agua, lo que seguramente indica la influencia antropogénica en algunos parámetros como NO_3^- , PO_4^{3-} y Fe. Con lo anterior se puede denotar que, posiblemente, los sitios más alejados no han sido sobreexplotados para cubrir las necesidades de la población.

3.9. Indicadores de Calidad del Agua para riego agrícola

Se analizaron cinco indicadores (RAS, % Na, CSR, IK y RS) para comprobar que el agua de manantial de la zona de estudio es apta para riego agrícola. Los resultados de todos los indicadores se muestran en el cuadro 10.

El intervalo de valores de la RAS osciló entre 0.161 y 0.615; en la temporada de precipitación pluvial disminuyó este indicador en todos los sitios de estudio debido a la dilución de iones a causa de la temporada, mientras que el sitio S6 obtuvo los mayores valores, en las dos campañas de colectas. Respecto al porcentaje de sodio, el intervalo encontrado fue de 9.409 a 19.883 %, lo que establece un bajo índice de

sodio en el agua para riego, haciéndola ideal para la agricultura, tal y como lo demuestra el artículo de Sajeev *et al.* (2020), quien realizó un estudio en aguas superficiales de zonas rurales de la India, el cual presentó % Na menores a 40 %, haciéndola deseable para esta actividad.

El intervalo de valores encontrado en el indicador de CSR varió entre -0.259 hasta 0.695, por lo que estos sitios se encuentran en el valor satisfactorio y pueden ser utilizados con seguridad para fines agrícolas. El Índice de Kelly indica la cantidad relativa de Na^+ frente al Ca^{2+} y al Mg^{2+} , a la vez que ayuda a determinar la idoneidad del agua para el riego agrícola. Los valores presentados en este índice oscilaron entre 0.107 y 0.270, lo que sugiere que todas las muestras de agua son aptas para uso agrícola. El riesgo por salinidad se obtiene de los valores de la conductividad eléctrica; en la mayoría de los sitios se mostraron valores bajos de esta, lo que permite que el agua sea apta para el riego agrícola (Ver Cuadro 10).

4. Conclusiones

De acuerdo con el tipo de agua encontrada en la zona de la comunidad de El Platanal, se trata de un sistema de aguas jóvenes, poco evolucionadas y de

**Cuadro 10**

Resultados del cálculo de todos los indicadores de calidad de agua para irrigación.

ÍNDICE	COLECTA	S1	S2	S3	S4	S5	S6
RAS	may-19	0.214	0.458	0.503	0.327	0.472	0.615
	nov-19	0.161	0.358	0.399	0.228	0.341	0.454
% Na	may-19	9.409	15.835	16.886	12.626	17.181	18.896
	nov-19	10.178	17.224	18.704	12.169	17.245	19.883
CSR	may-19	0.374	-0.259	-0.254	0.158	0.113	-0.484
	nov-19	1.009	0.850	0.785	0.683	0.788	0.695
IK	may-19	0.107	0.200	0.217	0.151	0.221	0.251
	nov-19	0.116	0.228	0.248	0.144	0.224	0.270
RS	may-19	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Buena
	nov-19	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Buena

RAS: Relación de Adsorción de Sodio, % Na: Porcentaje de Sodio, CSR: Carbonato de Sodio Residual, IK: Índice de Kelly, RS: Riesgo por Salinidad.

baja mineralización. El mecanismo que controla la presencia de especies químicas de manera natural es la interacción agua-roca, debido a las concentraciones observadas en algunos parámetros fisicoquímicos.

Los parámetros fisicoquímicos y los iones mayoritarios analizados en los manantiales, no restringen su uso para riego agrícola y potable debido a que no rebasan los límites máximos permitidos por la normatividad mexicana; sin embargo, la contaminación de origen fecal observada, limita el uso de este recurso hídrico como agua potable.

A pesar de que el Fe rebasó el límite máximo permitido por la normatividad mexicana para uso potable en el sitio S6, no se considera un parámetro que ponga en riesgo la salud humana.

El agua en el área de estudio puede ser apta para ser utilizada como fuente de riego para los cultivos de la región, según los indicadores de calidad propuestos anteriormente, pero no podría ser apta para uso potable debido a la contaminación de origen fecal que hay en los seis manantiales, tal como lo revela el ICA.

Las concentraciones de parámetros fisicoquímicos y elementos traza se observaron dentro de la recomendación de la normatividad mexicana para agua potable; sin embargo, el consumo crónico podría poner en riesgo la salud, particularmente en aquellos sitios que presentaron las mayores concentraciones. Por lo tanto, se recomienda un tratamiento simple, que incluya la filtración con medios granulares y desinfección para garantizar un suministro seguro y confiable de agua. Además, es importante monitorear regularmente estos cuerpos de agua para detectar cualquier cambio en los parámetros de calidad del agua.

Los resultados de este estudio proporcionarán información valiosa a las autoridades y habitantes de la comunidad sobre las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua de estos manantiales, lo cual les servirá para fortalecer la gestión del recurso, garantizando el acceso y la disposición sustentable para los usuarios, conforme a las necesidades de la población de El Platanal.

Agradecimientos

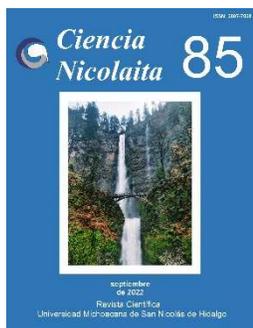
Los autores agradecen el apoyo técnico de la M.C. Carmen Cano Correa, jefa del Laboratorio de Calidad del Agua del Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Morelia y al Ing. Jorge Rubén Torres Verduzco.

5. Referencias

- Abdalla, F., and Scheytt, T., 2012, Hydrochemistry of surface water and groundwater from a fractured carbonate aquifer in the Helwan area, Egypt, *Journal of the Earth System Science*, 121, 109-124.
- Aksever, F., and Davraz, A., 2016, Assessment of water quality for drinking and irrigation purposes: a case study of Başköy springs (Ağlasun/Burdur/Turkey), *Ara-bian Journal of Geosciences*, 9, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2778-y>.
- Alfaro, R., Segovia, N., and Peña, P., 2002, Radon behavior in springs and wells around Cuitzeo Lake, Lerma River basin, *Geofísica Internacional*, 41, 439-445. ISSN: 0016-7169.
- APHA-AWWA-WPCF, 2005, Standard methods for the examination of water and wastewater, 21st edn., New York.
- Ameen, H., 2019, Spring water quality assessment using water quality index in villages of Barwari Bala, Duhok, Kurdistan Region, Iraq, *Applied Water Science*, 9, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1080-z>.
- Bashir, N., Saeed, R., Afzaal, M., Ahmad, A., Muhammad, N., Iqbal, J., Khan, A., Maqbool, Y., and Hameed, S., 2020, Water quality assessment of lower Jhelum canal in Pakistan by using geographic information system (GIS), *Groundwater for Sustainable Development*, 10, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100357>.
- Chacón, K., Pinedo, C., and Rentería, M., 2016, Evaluación de elementos traza en agua de río y manantial del área minera de Ocampo, Chihuahua, México, *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32, 375-384. <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.04.01>.
- CONAGUA, 2015, Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Zamora (1608), Estado de Michoacán, https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/michoacan/DR_1608.pdf, [consultado el 16 de enero de 2022].
- DOF, 2021a, Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021. Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización, Secretaría de Salud, México, https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0, [consultado el 15 de agosto de 2022].
- DOF, 2021b, NOM-001-SEMARNAT-2021. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, Secretaría de Gobernación, México, https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0, [consultado el 15 de agosto de 2022].
- DOF, 2015a, Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015. Análisis de Agua. Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba, Secretaría de Economía, México, <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166146/nmx-aa-034-scfi-2015.pdf>, [consultado el 29 de enero de 2022].
- DOF, 2015b, Norma Mexicana NMX-AA-042-SCFI-2015. Análisis de Agua. Enumeración de organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales (termotolerantes) y Escherichia coli. Método del número más probable en tubos múltiples, Secretaría de Economía, México, <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166147/nmx-aa-042-scfi-2015.pdf>, [consultado el 29 de enero de 2022].
- DOF, 2014, Norma Mexicana NMX-AA-074-SCFI-2014. Análisis de Agua. Medición de ion sulfato en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba, Secretaría de Economía, México, <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166149/nmx-aa-074-scfi-2014.pdf>, [consultado el 29 de enero de 2022].
- DOF, 2002, Norma Oficial Mexicana NOM-230-SSA1-2002. Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano, requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua, Secretaría de Salud, México, https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2081772&fecha=12/07/2005#gsc.tab=0, [consultado el 30 de enero de 2022].
- DOF, 2001a, NMX-AA-072-SCFI-2001. Análisis de Agua. Determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba, Secretaría de Economía, México,

- <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166788/NMX-AA-072-SCFI-2001.pdf>, [consultado el 30 de enero de 2022].
- DOF, 2001b, NMX-AA-036-SCFI-2001. Análisis de agua. Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba, Secretaría de Economía, México, <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166776/NMX-AA-036-SCFI-2001.pdf>, [consultado el 30 de enero de 2022].
- DOF, 2001c, NMX-AA-073-SCFI-2001. Análisis de Agua. Determinación de cloruros en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba, Secretaría de Economía, México, <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166789/NMX-AA-073-SCFI-2001.pdf>, [consultado el 30 de enero de 2022].
- DOF, 2001d, NMX-AA-029-SCFI-2001. Análisis de Agua. Determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba, Secretaría de Economía, México, <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166773/NMX-AA-029-SCFI-2001.pdf>, [consultado el 31 de enero de 2022].
- DOF, 2001e, NMX-AA-079-SCFI-2001. Análisis de Agua. Determinación de nitratos en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba, Secretaría de Economía, México, <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166794/NMX-AA-079-SCFI-2001.pdf>, [consultado el 31 de enero de 2022].
- Dumaru, B., Pradhanang, S., and Prasad, V., 2021, Spring water assessment for quality and suitability for various uses : the case of Thuligaad watershed, western Nepal, *Environmental Earth Sciences*, 80, 586. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09826-w>.
- Gaikwad, S., Gaikwad, S., Meshram, D., Wagh, V., Kandekar, A., and Kadam, A., 2019, Geochemical mobility of ions in groundwater from the tropical western coast of Maharashtra, India: implication to groundwater quality, *Environment, Development and Sustainability*, 22, 2591-2624. ISSN: 15732975. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00312-9>.
- García, E., 1964, Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, *Universidad Nacional Autónoma de México*. ISBN-10 (02)970-32-1010-4.
- Ghanem, M., Ahmad, W., Keilani, Y., Sawaftah, F., Scheluter, L., and Scxhuettrumpf, H., 2021, Spring water quality in the central West Bank, Palestine, *Journal of Asian Earth Sciences*, X, 1-12. ISSN: 2590-0560, <https://doi.org/10.1016/j.jaesx.2021.100052>.
- Gnanachandrasamy, G., Ramkumar, T., Venkatramanan, S., Vasudevan, S., Chung, S.Y., and Bagyaraj, M., 2015, Accessing groundwater quality in lower part of Nagapattinam district, Southern India: using hydrogeochemistry and GIS interpolation techniques, *Applied Water Sciences*, 5, 39-55. ISSN: 2190-5487, <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0172-z>.
- INEGI, 2020, Compendio de información geográfica municipal 2020, Zamora, Michoacán de Ocampo, México.
- Machender, G., Dhakate, R., Narsimha, M., and Panduranga, I., 2014, Hydrogeochemical characteristics of surface water (SW) and groundwater (GW) of the Chinnaru River basin, northern part of Nalgonda District, Andhra Pradesh, India, *Environmental Earth Sciences*, 71, 2885-2910. ISSN: 18666299, <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2665-8>.
- Mancilla, Ó., Ortega, H., Ramírez, C., Uscanga, E., Ramos, R., and Reyes, A., 2011, Metales pesados totales y arsénico en el agua para riego de Puebla y Veracruz, México, *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28, 39-48. ISSN: 01224999, <https://doi.org/0188-499>.
- Montoya, H., Contreras, C., and García, V., 1997, Estudio Integral de la Calidad del Agua en el Estado de Jalisco, CONAGUA 106.
- Naji, A., Ismail, A., and Ismail A.R., 2010, Chemical speciation and contamination assessment of Zn and Cd by sequential extraction in surface sediment of Klang River, Malaysia, *Microchemical Journal*, 95, 285-292. ISSN: 0026265X, <https://doi.org/10.1016/j.microc.2009.12.015>.
- Nnorom, I., Ewuzie, U., and Eze, S., 2019, Multivariate statistical approach and water quality assessment of natural springs and other drinking water sources in Southeastern Nigeria, *Heliyon*, 5, 1-36. ISSN: 2405-8440, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01123>.
- Nofal, S., Travi, Y., Cognard, A., and Marc, V., 2019, Impact of infiltrating irrigation and surface water on a Mediterranean alluvial aquifer in France using stable isotopes and hydrochemistry, in the context of urbanization and climate change, *Hydrogeology Journal*, 27, 2211-2229. <https://doi.org/10.1007/s10040-019-01989-y>.
- Redwan, M., Ahmed, A., and Moneim, A., 2016, Factors controlling groundwater hydrogeochemistry in the

- area west of Tahta, Sohag, Upper Egypt, *Journal of African Earth Sciences*, 118, 328-338. ISSN: 18791956, <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.10.002>.
- Reyes, C., Alfaro, R., Cortés, R., Morton, O., Hernández, E., Buenrostro, O., and Ávila, J., 2020, Hydrogeochemical Characteristics and Assessment of Drinking Water Quality in the Urban Area of Zamora, México, *Water*, 12, 556, ISBN: 5244334050, <https://doi.org/10.3390/w12020556>.
- Rouhani, A., 2021, Hydrochemistry and quality assessment of qanat water compared to wells using laboratory studies and literature review (case study of Samalghan plain, North Khorasan, Iran), *Modeling Earth Systems and Environment*, 7, 389-401. ISSN: 23636211, <https://doi.org/10.1007/s40808-020-01014-2>.
- Sajeev, S., Sekar, S., Kumar, B., Senapathi, V., Yong, S., and Gopalakrishnan, G., 2020, Variations of water quality deterioration based on GIS techniques in surface and groundwater resources in and around Vembanad Lake, Kerala, India, *Chemochemistry*, 80, 4, Supplement. ISSN: 0009-2819, <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2020.125626>.
- Setia, R., Lamba, S., Chander, S., Kumar, V., Dhir, N., Sharma, M., Sing, R., and Pateriya, B., 2021, Hydrochemical evaluation of surface water quality of Sutlej river using multi-indices, multivariate statistics and GIS, *Environmental Earth Sciences*, 80, 1-17. ISSN: 1866-6299, <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09875-1>.
- Shil, S., Kumar, U., and Pankaj, S., 2019, Water quality assessment of a tropical river using water quality index (WQI), multivariate statistical techniques and GIS, *Applied Water Science*, 9, 1-21. ISSN: 2190-5495, <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1045-2>.
- Silva, J., Ochoa, S., Cruz, G., Nava, J., and Villalpando, F., 2016, Manantiales de la cuenca del río Duero Michoacán: Operación, calidad y cantidad, *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32, 55-68. ISSN: 01884999.
- Silva, J., Moncayo, R., Ochoa, S., Estrada, F., Cruz, G., Escalera, C., Villalpando, F., and Nava, J., 2013, Calidad química del agua subterránea y superficial en la cuenca del río Duero, Michoacán, *Tecnología y Ciencias del Agua*, 13, 127-146. ISSN: 20072422, <https://doi.org/10.24850/j-tyca-imta>.
- Singh, R.K., Chaturvedi, A., and Kumari, K., 2019, Water quality assessment of Damodar River and its tributaries and subtributaries in Dhanbad Coal mining areas of India based on WQI, *Sustainable Water Resources Management*, 5, 381-386. ISSN: 23635045, <https://doi.org/10.1007/s40899-017-0159-7>.
- SMN, 2022, Sistema Meteorológico Nacional. CONAGUA. Climograma (1981-2010). Estación Camécuaro, Michoacán de Ocampo, <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/climogramas-1981-2010>, [consultado el 15 de agosto de 2022].
- Velázquez, M., Pimentel, J., and Ortega, M., 2010, Variaciones longitudinales y temporales en la hidroquímica del río Duero. *Agrociencia*, 44, 599-609. ISSN: 2521-9766.
- Wong, C., Alonso, A., and Carranza, C., 2021, Water quality of the wellsprings from the natural wetland "Ciénega de Tamasopo" in San Luis Potosí, Mexico, *Tecnología y Ciencias del Agua*, 12, 1-35. ISSN: 20072422, <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-06-01>.
- Zhang, D., Shi, X., Xu, H., Jing, Q., Pan, X., Liu, T., Wang, H., and Hou, H., 2020, A GIS-based spatial multi-index model for flood risk assessment in the Yangtze River Basin, China, *Environmental Impact Assessment*, 83, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106397>.



Ciencia Nicolaita 85

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Simulación del hábitat potencialmente utilizable (HPU) por la especie *Chondrostoma polylepis*, en un río, utilizando el sistema PHABSIM

Weighted usable area simulation (WUA) for *Chondrostoma polylepis* species, in a river using the PHABSIM system

Ezequiel García Rodríguez

Para citar este artículo: Ezequiel García Rodríguez, 2022. Simulación del hábitat potencialmente utilizable (HPU) por la especie *Chondrostoma polylepis*, en un río, utilizando el sistema PHABSIM. Ciencia Nicolaita no. 85, 73-83. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi85.667>



Historial del artículo:

Recibido: 25 de mayo de 2022

Aceptado: 2 de septiembre de 2022

Publicado en línea: septiembre de 2022



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: ezequiel.garcia@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Simulación del hábitat potencialmente utilizable (HPU) por la especie *Chondrostoma polylepis*, en un río, utilizando el sistema PHABSIM

Weighted usable area simulation (WUA) for *Chondrostoma polylepis* species, in a river using the PHABSIM system

Ezequiel García Rodríguez

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil. Morelia, Michoacán. México.

Resumen

En el presente escrito se muestra la simulación del hábitat físico de un tramo del río Lozoya, ubicado en la zona norte de la Comunidad Autónoma de Madrid. El objetivo es estimar la disponibilidad de Hábitat Potencialmente Utilizable (HPU) para la especie *Chondrostoma polylepis*, así como determinar el caudal que maximiza dicho HPU. Se utilizó el sistema PHABSIM (Physical Habitat Simulation System) y se identificó que el caudal que maximiza el HPU es de 1.5 m³/s para el estadio de vida juvenil, 0.65 m³/s para el estadio de vida alevín y 4.00 m³/s para el estadio de vida adulto. Los resultados obtenidos constituyen información valiosa para la gestión sostenible de los recursos hídricos del ecosistema fluvial.

Palabras Clave: simulación del hábitat, PHABSIM, *Chondrostoma polylepis*, caudales ecológicos

Abstract

In this work we present the physical habitat simulation of a Lozoya river, located at Comunidad Autónoma de Madrid. The main subject is in order to get the availability of weighted usable area (WUA) for *Chondrostoma polylepis*, as well as to determine the flow that maximizes the WUA. For habitat simulation it was used the PHABSIM (Physical Habitat Simulation System), and it can be identified that 1.5m³/s flow maximizes the WUA for juvenile life stage, 0.65 m³/s maximizes the WUA for fry life stage, and 4.00 m³/s maximizes the WUA for adult life stage. These results mean information for the sustainable management of fluvial ecosystem water resources.

Key words: habitat simulation, PHABSIM, *Chondrostoma polylepis*, Instream flow needs

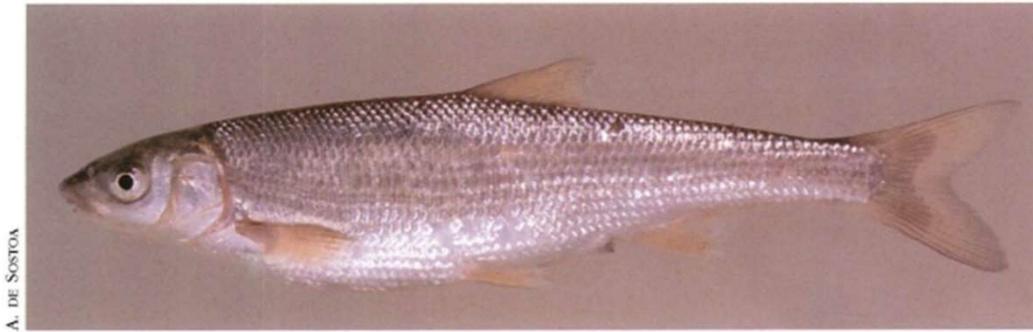


Figura 1. *Chondrostoma polylepis* (De Sostoa A., en Doadrio D., 2002).

Introducción

Al proyectarse obras hidráulicas en el medio fluvial, se debe tener en cuenta el impacto correspondiente, así como la implementación de medidas de mitigación, tal es el caso del establecimiento de un régimen de caudales ecológicos o ambientales que garantice su continuidad y, en la mayor medida posible, conserve y/o genere características de hábitat que favorezcan su conservación y adecuado desarrollo.

En este sentido, una de las metodologías más utilizadas en la gestión de los recursos hídricos, de cara a la conservación de los ecosistemas fluviales, es la denominada Instream Flow Incremental Methodology (IFIM) (Bovee *et al.*, 1992 y 1998), en la que la determinación del régimen de caudales ecológicos o ambientales, se basa en la simulación del hábitat físico para una o varias especies objetivo, utilizando para ello el sistema para computadora denominado PHABSIM (Physical Habitat Simulation System) (Waddle, 2001; Milhous *et al.*, 1984 y 1989), constituido por uno o varios modelos para efectuar la simulación de la hidrodinámica fluvial y, también, uno o varios modelos para realizar la simulación del hábitat, a los que se les introducen datos geomorfológicos, hidrométricos y biológicos que son obtenidos del tramo de río en estudio.

La simulación del hábitat pretende integrar dos de los principales componentes del ecosistema fluvial: el régimen de flujo y la estructura física del hábitat (Karr *et al.*, 1986). De tal manera que, para cada gasto o caudal, se estima la disponibilidad de Hábitat Potencialmente Utilizable (HPU) por los organismos acuáticos objetivo, y se elaboran gráficos caudal-hábitat que se utilizan para determinar el caudal que

maximiza el HPU, referencia básica para proponer el régimen de caudales ecológicos o ambientales. Por su parte, para el aspecto biológico se utilizan modelos de preferencia de hábitat de las especies objetivo, que se desarrollan asumiendo que el hábitat será utilizado por tales especies de acuerdo a lo conveniente que resulte para su desarrollo, por lo tanto, es necesario conocer las preferencias de hábitat de las especies que habitan en el río en estudio.

Tomando como base lo antes mencionado, en el presente trabajo se expone la simulación del hábitat de un tramo de 609 m del río Lozoya, con el objetivo de determinar los caudales hídricos que maximizan el HPU para los estadios de vida adulto, juvenil y alevín de la especie *Chondrostoma polylepis*, endémica de la Península Ibérica (Figura 1), utilizando los modelos de preferencia de hábitat de la especie mencionada y el sistema PHABSIM.

Metodología

Río de estudio

La elección del río Lozoya obedece a su valor desde el punto de vista ecológico y paisajístico, así como por su importancia como fuente de abastecimiento de agua de buena calidad para la ciudad de Madrid, España.

Zona de estudio

Localización geográfica. La cuenca del río Lozoya está ubicada en la zona norte de la Comunidad Autónoma de Madrid (Figura 2). Nace en la Laguna Grande de Peñalara (Fernández, 1915) a 2000 m de altura entre las sierras de la Cuerda Larga por el sur y la de Guadarrama por el norte.



Figura 2. Localización del tramo del río Lozoya en la Península Ibérica y en la Comunidad Autónoma de Madrid.

Clima. Si bien en las mayores altitudes de la divisoria se encuentra un clima mediterráneo de alta montaña, el del Valle del Lozoya se puede clasificar como de tipo mediterráneo subhúmedo-húmedo de inviernos fríos. Asimismo, la zona donde se ubica el tramo de estudio tiene una temperatura media anual de 10.3 °C, la precipitación media anual de 796 mm y la cota de 1095 msnm.

Hidrología. El área total de la cuenca del río Lozoya es de 983.3 km² y forma parte de la cuenca hidrográfica del río Tago. El río Lozoya completa un recorrido total de 91 km y es embalsado por la presa de Pinilla después de discurrir, aproximadamente, 20 km con dirección nordeste. Cabe mencionar que es embalsado, además, en otros seis puntos de su recorrido. De acuerdo con la clasificación de Masachs (1948), el río Lozoya queda encuadrado dentro del grupo de los ríos de montaña media de los ríos ibéricos, en los que las precipitaciones pluviales tienen mayor protagonismo que las nivales.

Ictiofauna. Según García de Jalón *et al.* (2002), en la zona alta de la cuenca del río Lozoya (*i.e.* desde su nacimiento hasta el embalse de Pinilla) se pueden encontrar 13 especies de peces de cuatro familias diferentes, de las cuales, para el presente trabajo, se seleccionó la especie *Chondrostoma polylepis*, endémica de la Península Ibérica y perteneciente a la familia *Cyprinidae*.

Tramo de estudio. Está ubicado en una zona de orden III, siendo sus coordenadas UTM en la zona inferior: 30T0430655 UTM0530001 y su altitud de 1095 msnm. La figura 2 muestra la ubicación del

tramo de estudio, el cual tiene 609 m de longitud; cuenta con dos islas: una ubicada a partir de 30 m de la sección transversal localizada más aguas abajo, y la otra a 400 m de la misma sección, de acuerdo con el esquema general que se muestra en la figura 3.

El tramo de estudio cuenta con zonas de aguas rápidas con sustrato de gravas que pueden constituir frezaderos, con pozas y cobertura vegetal a base de ramas y raíces sumergidas, cornisas, troncos, rocas y fisuras en la roca madre que pueden constituir refugio. Por su parte, el ancho promedio del tramo en el cauce principal es de 15 m y de 6.5 m en los cauces secundarios; el caudal medio anual es de 3.1 m³/s a la altura del sitio de estudio, con caudales máximos de 45m³/s, mientras que la pendiente media del tramo es de 0.0041. Finalmente, el sustrato predominante está formado por gravas y cantos, destacando la presencia de roca madre fisurada en la parte central del tramo, así como depósitos de arena en las orillas del cauce y, sobre todo, en las zonas de pozas.

Simulación de la hidrodinámica fluvial

Altura de la superficie libre del agua (ASLA)

● **Modelo WSP (Water Surface Profile), integrado en el PHABSIM**

El modelo WSP (U.S. Bureau of Reclamation, 1968; en Waddle, 2001) utiliza el método del paso estándar para calcular los perfiles de flujo que se presentarían en el cauce para los diferentes caudales de interés, ya que asume que el flujo es gradualmente variado.

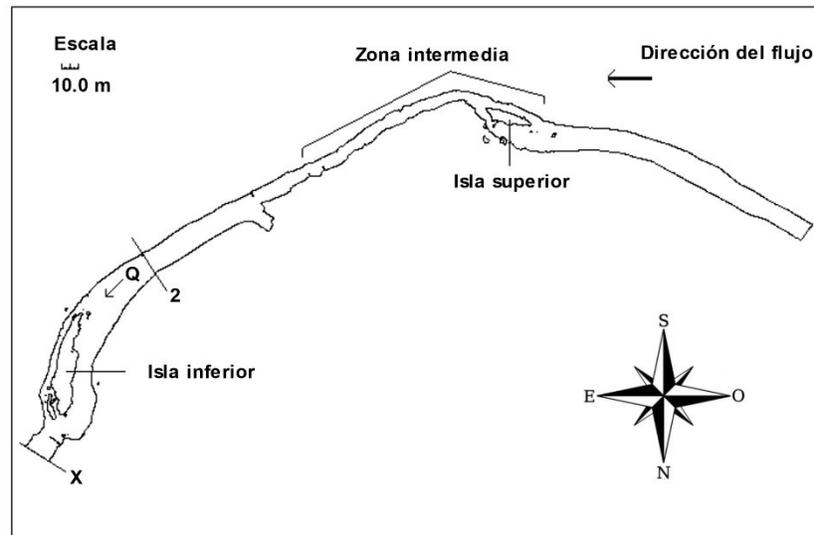


Figura 3. Esquema general del tramo del río Lozoya.

- **Modelo STGQ del PHABSIM**

Utiliza los datos de la curva caudal-altura de la superficie libre del agua (Q-ASLA), obtenida para cada una de las secciones transversales para su aplicación. Dichas curvas se elaboran basándose en un mínimo de tres puntos, cuyos valores fueron obtenidos en campo. En el modelo STGQ (Waddle, 2001) se asume que el flujo es uniforme y, al aplicarlo, se estimaron las ASLA's para los caudales necesarios, obteniendo las ecuaciones de regresión a partir de los pares de valores caudal-ASLA introducidos en el PHABSIM. Es importante mencionar que el modelo STGQ se utilizó en aquellas secciones transversales del tramo de estudio que mostraron un comportamiento hidráulico básicamente independiente del resto de las secciones.

Velocidades. Se determinó en campo el perfil de velocidades en cada una de las secciones transversales para tres caudales diferentes: dos de los juegos de velocidades se utilizaron como perfiles de velocidades de calibración, mientras que el tercero fue separado para determinar la calidad de calibración del modelo, comparándolo con el perfil de velocidades de predicción simuladas para este mismo caudal.

- **Modelo de VELSIM**

Simulados los perfiles de flujo para los caudales deseados, se utilizó el modelo VELSIM (Waddle, 2001) para calcular la velocidad en las celdas de discretización de las secciones transversales. Las velocidades de celda obtenidas mediante este modelo, se

utilizaron más adelante para efectuar la simulación del hábitat. Para calibrar el VELSIM se utilizaron dos juegos de velocidades y se verificó la calidad de la calibración para las velocidades medidas en campo para el tercer caudal.

Obtención de datos de campo

Caudales objetivo o de muestreo. La información obtenida en cada una de las secciones transversales del tramo de río en estudio se encuentra en el cuadro 1. Las campañas de obtención de datos hidrométricos se realizaron en un periodo de un año, mientras que la mayor parte de la topografía se hizo en un periodo aproximado de 20 días.

Secciones transversales. Atendiendo a criterios hidráulicos y de hábitat, se ubicaron secciones transversales en los controles hidráulicos del tramo de estudio, así como en los cambios importantes del cauce, tanto en planta como en el perfil longitudinal, zonas de cambio en el tipo de sustrato y en los diferentes mesohábitats existentes en el tramo de estudio (*i.e.* rabiones, pozas y rápidos). Como se puede ver en la figura 4, se colocaron un total de 60 secciones transversales: 39 en el cauce principal y 21 en los cauces secundarios.

Topografía. Para obtener la topografía se utilizó una poligonal abierta situada a todo lo largo del tramo de estudio, obteniendo las coordenadas X, Y, Z de cada punto de las secciones transversales, respecto a las coordenadas de un banco de nivel. En los

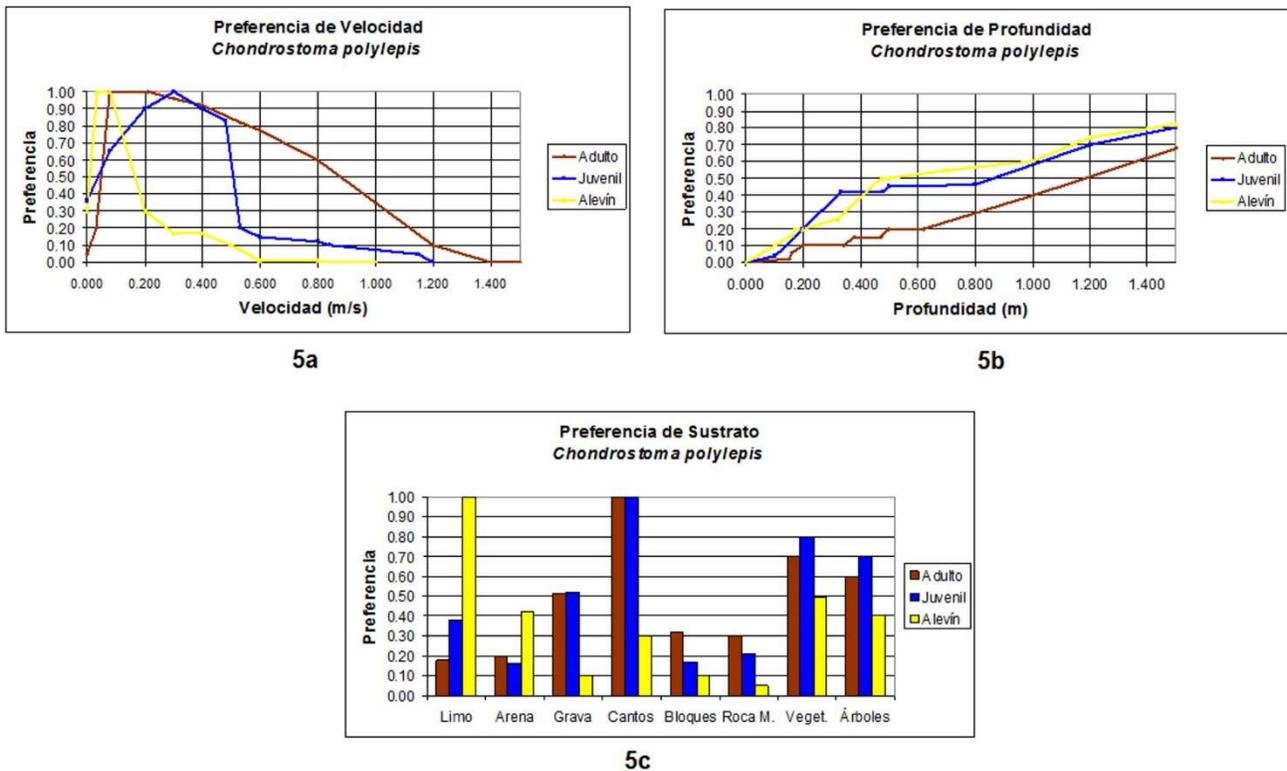


Figura 5. Curvas de preferencia de hábitat para velocidad (5a), profundidad (5b) y tipo de sustrato (5c) de la especie *Chondrostoma polylepis* (García de Jalón, 2000).

con la obtención de la topografía y la hidrometría en cada punto de las mismas.

Sustrato. La clasificación del sustrato se basó en la utilizada por Platts *et al.* (1983), la cual corresponden con las clases de tamaño aceptadas por la American Geophysical Union (AGU).

Refugio. Se utilizó una curva de preferencia denominada “sustrato” (Figura 5c) en la que se encuentran integrados elementos de sustrato propiamente dicho y elementos de refugio.

Simulación del hábitat

Curvas o modelos de preferencia de hábitat

En la simulación del hábitat se utilizaron las curvas de preferencia de hábitat de la especie *Chondrostoma polylepis* (Figura 5), desarrolladas por García de Jalón (2000) con datos de Martínez (2000) obtenidos mediante observación directa por buceo. Se trata de curvas de preferencia de categoría III (Bovee, 1998) corregidas por disponibilidad de hábitat. La corrección se apoya en el principio de que los organismos

seleccionan el hábitat más favorable, pero si no tiene disponible este tipo de hábitat, seleccionarán otro dentro de las opciones que se le presenten; y consiste en comparar la cantidad de hábitat utilizado por el organismo en cierta área, con la cantidad disponible en la misma área, obteniendo un índice de preferencia.

Las curvas de preferencia de hábitat de las especies ícticas integran los atributos de la celda de cálculo (*i.e.* velocidad, profundidad, e índice de cauce) para estimar la cantidad y calidad del hábitat. El índice de cauce se refiere al requerimiento de tipo de sustrato, refugio, o una combinación de ambos. La unidad de medida que se utiliza es el HPU en metros cuadrados por cada 1000 m de longitud de río. El cálculo se efectúa de acuerdo con la ecuación 1.

$$HPU = \frac{\sum_{i=1}^n A_i * FCC_i}{Longitud.del.Tramo / (1000metros)} \quad (1)$$

Donde:

A_i = Área representada por la celda i a nivel de la superficie del agua

FCC_i = Factor de Conveniencia Compuesto de la celda i

El método más común para el cálculo del Factor de Conveniencia Compuesto (FCC) de una celda es el de la integración multiplicativa, el cual se aplica a partir de la ecuación 2 (Bovee, 1998).

$$FCC_i = V_i * D_i * S_i \quad (2)$$

Donde:

V_i = Conveniencia asociada a la velocidad en la celda i

D_i = Conveniencia asociada a la profundidad en la celda i

S_i = Conveniencia asociada al índice de cauce en la celda i

El cálculo de HPU se efectuó en cada celda en la que se simuló la velocidad y profundidad del agua.

Resultados y discusión

Alturas de la superficie libre del agua (ASLA's). En términos generales se observó un buen ajuste de los perfiles de flujo simulados respecto a los medidos. Los errores medios absolutos de simulación y calibración de las alturas de la superficie libre del agua (ASLA's) de las secciones transversales del cauce principal, fueron de 3, 8 y 7 mm para las ASLA's de calibración (*i.e.* para los caudales de 0.20, 1.45 y 4.00 m³/s) y 11 mm para la ASLA predicha (*i.e.* para el caudal de 0.65 m³/s), respecto a las ASLA's medidas.

Los errores medios absolutos de simulación y calibración de las ASLA's de las secciones transversales ubicadas en los cauces secundarios, fueron de 1 y 4 mm para las ASLA's de calibración (*i.e.* para los caudales de 1.45 y 4.00 m³/s a cauce completo) y de 14 mm para la ASLA predicha (*i.e.* para el caudal de 1.97 m³/s, a cauce completo), respecto a las ASLA's medidas.

Velocidades. Se simularon los perfiles de velocidades utilizando dos juegos de velocidades medidas para calibrar el modelo (*i.e.* las obtenidas para los caudales de 4.00 y 1.45 m³/s). La figura 6 muestra, a

manera de ejemplo, los perfiles de velocidades medidas y simuladas en la sección transversal 1A, cuya ubicación se puede ver en la figura 4. Asimismo, se utilizó el perfil de velocidades medidas para el caudal intermedio (*i.e.* 1.45 m³/s) para predecir el perfil de velocidades del caudal inferior (0.65 m³/s), por ser el más cercano de los dos con los que se contó con fines de calibración. En la sección 1A se observa, en términos generales, un buen ajuste de los perfiles de velocidades simuladas respecto a las medidas.

El valor promedio de los errores de las 39 secciones transversales ubicadas en el cauce principal, es mayor para el caudal de predicción (*i.e.* error de 0.061 m/s para el caudal de 0.65 m³/s) que el calculado para los caudales de calibración (*i.e.* errores de 0.029 y 0.026 m/s para 1.45 y 4.0 m³/s, respectivamente). El valor del promedio de los errores relativos correspondientes a estas 39 secciones fueron del 28, 9 y 7 % para las velocidades de los caudales de 0.65, 1.45 y 4.0 m³/s, respectivamente.

Es importante mencionar que, el hecho de que la diferencia del error relativo calculado para el caudal de predicción sea aproximadamente tres veces mayor que el de los caudales de calibración, indica que hay un grupo de secciones en las que la forma en que se distribuye el flujo en el caudal de calibración utilizado para obtener el perfil de velocidades del caudal de predicción, tiene diferencia importante, en general o en parte, respecto a la forma en la que se distribuye el flujo, en la realidad, para este último.

Respecto a las 21 secciones transversales ubicadas en los cauces secundarios, el valor promedio de los errores es mayor para el caudal de predicción (*i.e.* error de 0.082 m/s para el caudal de 1.97 m³/s) que el calculado para los caudales de calibración (*i.e.* error de 0.044 m/s para 1.45 y 4.0 m³/s). El valor del promedio de los errores relativos correspondientes a estas 21 secciones son del 54, 40 y 18 % para las velocidades de los caudales de 1.97, 1.45 y 4.0 m³/s, respectivamente. Estos errores son relativamente grandes; sin embargo, cabe mencionar que son promedios generales y que se consideraron aceptables debido a las dificultades para calibrar los modelos de la hidrodinámica en zonas muy someras y para hacer mediciones precisas en estas mismas zonas, particularmente en los rabiones.

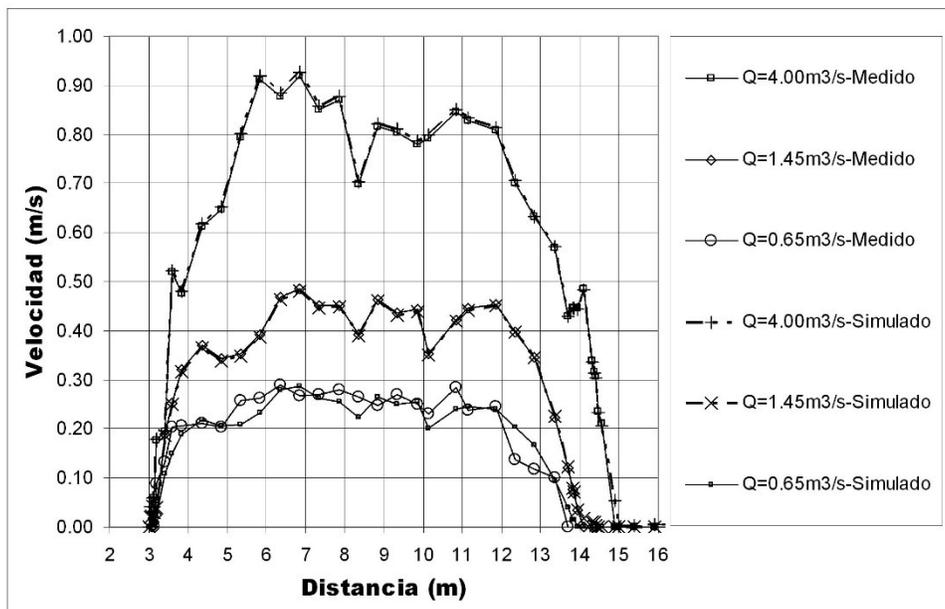


Figura 6. Perfiles de velocidades medidas y simuladas en la sección transversal 1A (cauce principal).

Simulación del hábitat ictiológico

En el cuadro 2 se encuentran los resultados del HPU estimado para la especie *Chondrostoma polylepis* y sus diferentes estadios de desarrollo, en cada celda de cada subtramo, integrando el HPU para el tramo completo.

A partir de los datos del cuadro 2 se obtuvieron las curvas Caudal-HPU (Figura 7) para la especie objetivo. Se puede ver que el caudal que maximiza el HPU para el estadio de vida juvenil es de 1.5 m³/s, de 0.65 m³/s para el estadio de vida alevín, y de 4.00 m³/s para el estadio de vida adulto.

La calidad de la simulación del hábitat depende, fundamentalmente, de la calidad de la simulación de la hidrodinámica fluvial y de la calidad de los modelos de preferencia de hábitat de la(s) especie(s) objetivo.

Simulación de la hidrodinámica. Se utilizó el método del paso estándar y las curvas de calibración de las secciones transversales, dependiendo de la ubicación de cada una de estas en el tramo del río en estudio. Estos métodos son aceptados y se utilizan constantemente en proyectos de ingeniería, teniendo en

Cuadro 2 Hábitat Potencialmente Utilizable para la especie <i>Chondrostoma polylepis</i> en sus estadios adulto, juvenil y alevín, para un tramo del río Lozoya.			
Caudal (Q) m ³ /s	Estadio		
	Adulto	Juvenil	Alevín
	HPU m ²	HPU m ²	HPU m ²
0.20	236	697	396
0.65	570	1087	439
1.45	766	1387	363
4.00	955	1156	251

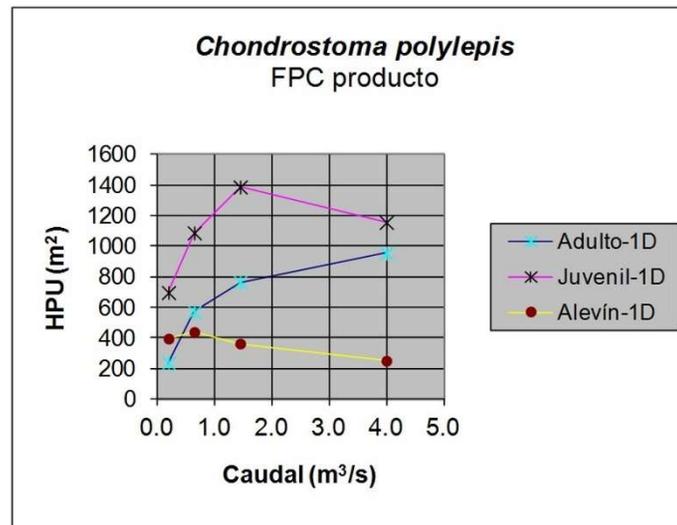


Figura 7. Curvas Caudal-Hábitat Potencialmente Utilizable obtenidas para la especie *Chondrostoma polylepis*, en un tramo del río Lozoya.

cuenta las correspondientes restricciones en su aplicación.

Para representar adecuadamente la topografía del cauce y el comportamiento del flujo en el mismo, se utilizó toda la información de campo que se consideró necesaria con la finalidad compensar, de la mejor manera posible, las limitaciones de los modelos unidimensionales en cuanto a la simulación de los movimientos transversales del flujo.

En el presente trabajo, en el 94 % de los casos de las ASLA's de calibración, los errores de estimación se sitúan en el intervalo de 3 a 15 mm, así como el 72 % de los casos de las ASLA's de simulación, por lo tanto, se considera que en términos generales se ha obtenido un ajuste adecuado de los perfiles de flujo simulados respecto a los medidos, de acuerdo con las recomendaciones de Waddle (2001, Midcontinent Ecological Science Center), quien establece como guía general que se pueden lograr ajustes con diferencias (errores) de 3 a 6 mm entre las alturas de la superficie libre del agua (ASLA's) medidas y simuladas, pudiendo existir diferencias que pueden salir de este intervalo y situarse entre 9 y 15 mm. Si se tiene en cuenta que en el tramo de estudio del río Lozoya se ubicaron 21 secciones transversales en cauces secundarios y otras tantas en rabiones, en las que tanto la precisión en la obtención de la información de campo como la simulación de la hidrodinámica representan retos importantes que pueden dar origen

a errores mayores a los comprendidos en los intervalos antes señalados, el ajuste se considera, también, adecuado.

Simulación de las velocidades

El modelo VELSIM (del sistema PHABSIM) que se empleó para la simulación de las velocidades en las secciones transversales, ha dado buenos resultados en términos generales para el tramo de estudio, siendo determinante el haber contado con varios perfiles de velocidades medidos en campo, en un amplio intervalo de caudales.

Curvas de preferencia y simulación del hábitat. Los modelos de preferencia de hábitat constituyen uno de los elementos críticos en la simulación del hábitat físico fluvial. Los modelos que se utilizaron en el presente trabajo fueron desarrollados mediante observación subacuática de los individuos y caracterizando el hábitat de los sitios marcados durante tal observación.

Conclusiones

La simulación de las alturas de la superficie libre del agua (ASLA's), utilizando el método del paso estándar y las curvas caudal-ASLA de las secciones transversales, ha dado resultados adecuados en el tramo de estudio del río Lozoya. Para efectuar dicha simulación con la precisión adecuada, fue fundamental contar con la cantidad mínima de tres pares de valores caudal-ASLA en cada sección transversal, con



lo que se pudo elaborar la curva de calibración correspondiente y, también, calibrar el modelo basado en el método del paso estándar.

En las curvas Caudal-Hábitat Potencialmente Utilizable (Q-HPU) se puede observar la evolución del HPU en función del caudal que circula por el tramo en estudio del río Lozoya, pudiéndose identificar que el caudal que maximiza el HPU es de 1.5 m³/s para el estadio de vida juvenil y 0.65 m³/s para el estadio de vida alevín; mientras que para el estadio de vida adulto, el HPU crece hasta alcanzar su máximo en 4.00 m³/s.

Estos resultados constituyen una aportación importante a la toma de decisiones para la gestión del recurso hídrico, ya que conocer las curvas Q-HPU aporta información valiosa al gestor de los recursos fluviales y a los diferentes usuarios de los mismos, particularmente mediante los caudales que maximizan el HPU para determinar regímenes de caudales ecológicos que permitan establecer la cantidad de agua necesaria para atender el uso para la conservación del ecosistema del río Lozoya y, en consecuencia, al cuidado de su belleza paisajística, fijando máximos a extraer para diferentes usos, de cara a su gestión sostenible correspondiente.

Referencias

- Bovee, K.D., 1992, A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology, *Fort Collins, CO., U.S. Fish and Wildlife Service*, 251 pp.
- Bovee, K.D., Lamb, B.L., Bartholow, J.M., Stalnaker, C.B., Taylor, J. and Enriksen, J., 1998, Stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology, *Fort Collins CO, U.S. Geological Survey, Biological Resources Division Information and Technology Report USGS/BRD-1998-0004*, viii+131 pp.
- Doadrio, D., 2002, Atlas y Libro Rojo de los Peces Continentales de España, Madrid, *Editor: Ignacio Doadrio. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Ministerio de Medio Ambiente*, Segunda Edición, 364 pp.
- Fernández, L., 1915, Monografía Geológica del Valle del Lozoya, Madrid, *Imprenta Clásica Española*, 100 pp.
- García de Jalón, D., 2000, Curvas de preferencia de hábitat de la especie *Chondrostoma polylepis*. Comunicación personal.
- García de Jalón, D., Schmidt, G., and González del Tánago, M., 2002, La pesca en las Aguas de la Comunidad de Madrid, Madrid, *Ed. Mundi-Prensa, S. A.*, 159 pp.
- Henderson, F.M., 1966, Open channel flow, New York, *Macmillan Pub. Co., Inc.*, 522 pp.
- Hersch, R.W., Editor, 1999, HYDROMETRY Principles and Practices. Chichester, West Sussex, England, *John Wiley and Sons, INC.*, Segunda Edición, 376 pp.
- Karr, J.R., Fausch, K.D., Angermeier, P.L., Yant, P.R., and Schlosser, I.J., 1986, Assessing Biological Integrity in Running Waters a Method and Its Rationale, *Champaign, Illinois Natural History Survey. Special Publication*. U.S.A., 28 pp. ISSN 0888-9546.
- Martínez, F., 2000, Preferencia de microhábitat de *Chondrostoma polylepis*, *Chondrostoma polylepis* y *Leuciscus pyrenaicus* en la cuenca del río Tajo: Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid.
- Masachs, V., 1948, El Régimen de los Ríos Peninsulares, Barcelona, *CSIC - Instituto de Investigaciones Geológicas*, 511 pp.
- Milhou, R.T., Updike, M.A., and Schneider, D.M., 1989, Physical Habitat Simulation System Reference Manual - Version II. Instream Flow Information Paper No. 26, Washington D.C., *U.S. Fish and Wildlife Service, Biological Report*, 89 (16), 1-403.
- Milhou, R.T., Wegner, D.L., and Waddle, T.J., 1981, Physical Habitat Simulation System User's Guide. Instream Flow Information Paper No. 11, Washington D.C., *U.S. Fish and Wildlife Service*, 475 pp. FWS/OBS-81/43.
- Platts, W.S., Megahan W.F., and Minshall, G.W., 1983, Methods for evaluating stream riparian and biotic conditions, *USDA Forest Service, General Tech. Report*. INT-138. Ogden, UT, 70 pp.
- Reiser, D.W., Wesche, T.A., and Estes, C., 1989, Status of instream flow legislation and practise in North America, *Fisheries*, 14 (2), 22-29.
- Waddle, T.J., 2001, PHABSIM for Windows: user's manual and exercises. *Fort Collins CO, U.S. Geological Survey*, Open-File Report 01-340, 288 pp.

Página legal y créditos

CIENCIA NICOLAITA, Año 30 No. 85, mayo-agosto 2022, es una publicación cuatrimestral editada por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo a través de la Coordinación de la Investigación Científica, Av. Francisco J. Mújica, s/n, Ciudad Universitaria, C.P. 58030, Tel. 443 316 74 36, 443 327 23 66, y 443 322 35 00, <http://www.cic.cn.umich.mx>, ciencianicolaita.publicaciones@umich.mx. Editor: Dr. Pedro Corona Chávez. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2013-072913082200-203, ISSN: 2007-7068, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este Número, Coordinación de la Investigación Científica, Edificio C-2., Av. Francisco J. Mújica, s/n, Ciudad Universitaria, C.P. 58030, Tel. 443 316 74 36y Fax 443 327 23 66, Responsable de la última actualización de este Número, Área de Tecnologías y Procesos de Información de la Coordinación de la Investigación Científica, Hugo César Guzmán Rivera, fecha de última modificación, **21 de septiembre de 2022**.

Ciencia Nicolaita 85 fue formada y preparada para su versión electrónica, en el Área Editorial del Departamento de Comunicación de la Ciencia de la Coordinación de Investigación Científica. Edificio C-2, Ciudad Universitaria, Morelia.

Fotografía de la portada: Puente. Fotografía de Sathyaprabha Rakkimuthu. Del sitio pexels.com.

Derechos de uso

Se permite la reproducción, publicación, transmisión, difusión en cualquier modo o medio de cualquier parte del material contenido en el archivo (únicamente texto sin imágenes) sin alterar o modificar el original, con fines de referencia y/o reproducción, académicos o educacionales, con excepción de los personales o comerciales, citando la fuente de referencia y otorgando el crédito correspondiente al autor y al editor.

Sitio web implementado por el equipo de la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo sobre la plataforma OJS3/PKP