

Vol. 3 Núm. 2 Julio-Diciembre 2024

Revista Multidisciplinaria de Ciencia Innovación y Desarrollo



e-ISSN: 2954-4998



Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora Directorio

Rectoría

Francisco Javier Lorenzo Pérez

Abogado General

Rodrigo Ventura Flores

Dirección Administrativa

Honorato Pérez Antonio

Dirección de Planeación y Evaluación

Ivo Luis Restrepo Gazca

Dirección de Vinculación

Betzabé Clemente Santa Rosa

Dirección de Programas en Mantenimiento y Tecnología

Félix Bautista Meza

Dirección Académica

Carla Yanet Márquez Rodríguez

Comité Editorial

Editor en Jefe

Raúl Alejandro Limón Hernández

Editor Asociado

José López Tirzo

Redacción y estilo

Erika Lugo Ramírez

Encargada de investigación

Verónica López Hernández

Writing

Jairo Palma Méndez

Diseño de Portada

Amisadday Marín Larios

Webmaster

Sergio Sánchez Mena

Analista de sistema

Guillermo Martínez Maza

Comité Revisor

Irving David Pérez Landa
Miriam Minerva Jiménez Lara
Keren Aguilar Martínez
Griselda Santiago Hurtado
Itzel Galaviz Villa

Luis Felipe Juárez Santillán
Jocabel Extocapan Molina
Julio Alfonso Armenta Barrios
Víctor Manuel Moreno Landeros
Alejandro Londoño Moreno
Caroleé Chuzeville Munguía

Jessica Zuleima Vargas Luna
Paúl Ramírez Sánchez
José Luis Xochihua Juan
German Rafael Moreno León

Indexaciones





Contenido

MegaStat como herramienta complementaria en el aprendizaje de la Estadística	1
Efectos combinados de bismuto y detergente en la germinación y crecimiento inicial de lenteja (<i>Lens culinaris</i>)”	8
Expansión urbana y presión sobre los recursos hídricos en Bacalar: Desafíos y tensiones en un destino turístico emergente	15
Análisis comparativo de modelos adaptativos para evaluar el confort térmico y la eficiencia energética de oficinas en un clima tropical de Misantla, Veracruz	23
Análisis comparativo de diferentes técnicas de extracción de ADN genómico en levaduras	31
Aplicación de técnicas para identificar y caracterizar las zonas de alimentación en un yacimiento geotérmico	37
Desempeño mecánico de concretos modificados empleando agregado grueso reciclado	47



ARTÍCULO ORIGINAL

MegaStat como herramienta complementaria en el aprendizaje de la Estadística

Julissa Beanet Perea-García¹

Iriana Hernández-Martínez²

¹ TSU en Agrobiotecnología área Vegetal y TSU en Contaduría, Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora, Veracruz, México.

² ingeniería química, Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora, Veracruz, México.

Recepción 13 de agosto 2024. Aceptación 07 de noviembre de 2024.

PALABRAS CLAVE

Aprendizaje; análisis de datos; MegaStat; ansiedad; estrés; motivación.

Resumen

El presente artículo tiene como objetivo analizar, mediante un estudio de caso intrínseco, si la mejora de las actitudes del estudiantado hacia el aprendizaje de la estadística puede incrementar el rendimiento académico en ésta. Se utilizó una metodología bajo el enfoque mixto de tipo descriptivo a un grupo de 45 estudiantes. La intervención educativa se dio en el contexto real de clases con una duración de 9 sesiones de 120 minutos/sesión. El procedimiento experimental constó de tres momentos: (1) antes de la intervención, contestaron la hoja de trabajo (inicial) para evaluar conocimientos y el formulario pretest para identificar la ansiedad y estrés hacia la estadística; (2) se realizó la intervención educativa orientada a la resolución de casos prácticos con el uso de MegaStat y, (3) después de la intervención, volvieron a responder la hoja de trabajo (final) y el formulario posttest. Con la prueba Wilcoxon se analizaron los datos cuantitativos con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$, arrojando una diferencia significativa en los temas abordados. Los resultados cualitativos se analizaron con las observaciones directas y el formulario pretest y posttest, donde no sólo dieron a conocer su interés por aprender con el uso de la tecnología; ansiedad y estrés que pudo haberles provocado aprender estadística antes de la intervención y después de ésta experiencia previa con el uso de la tecnología, el impacto al usar MegaStat en su proceso de aprendizaje y en lo motivacional. A través del coeficiente de correlación de Spearman se pudo validar la hipótesis de investigación, obteniendo una correlación positiva entre la mejora de las actitudes hacia la estadística y el rendimiento académico.

KEYWORDS

Learning; data analysis; MegaStat; anxiety; stress; motivation.

Abstract

The purpose of this article is to analyze, through an intrinsic case study, whether the improvement of students' attitudes towards learning statistics can or can't increase academic performance in it. The methodology was applied under the mixed approach of a descriptive type to a group of 45 students. The educational intervention took place in the real context of classes with a duration of 9 sessions of 120 minutes/session. The experimental procedure consisted of three stages: (1) before the intervention, they answered the worksheet (initial) to assess knowledge and the pre-test form to identify anxiety and stress towards statistics; (2) the educational intervention aimed at solving practical cases was carried out with the use of MegaStat and, (3) after the intervention, they answered the (final) worksheet and the post-test form again. With the Wilcoxon test, quantitative data were analyzed with a significance level of $\alpha=0.05$, yielding a significant difference in the topics addressed. The qualitative results were analyzed with direct observations and the pre-test and post-test form where they not only made known about their interest in learning with the use of technology, anxiety and stress that could have caused them to learn statistics before the intervention and after it, previous experience with the use of technology, the impact of using MegaStat on their learning process and on motivation. Through the Spearman correlation coefficient, the research hypothesis could be validated, obtaining a positive correlation between the improvement of attitudes towards statistics and academic performance in it.

Introducción

La enseñanza de la estadística a nivel universitario ha evolucionado gracias a la incorporación de diversas herramientas tecnológicas avanzadas y, mejor aún, muchas de las cuales, gratuitas, y pueden ser utilizadas como herramienta pedagógica para mejorar no sólo el rendimiento académico sino propiciar en los universitarios el interés por usarlas para aprender.

En su investigación, Villegas (2019) cita a Tovar, Castillo y Marín (2010), quienes precisan que la enseñanza de la estadística en cursos de pregrado está concebida principalmente como cursos de cálculo matemático donde se limita al estudiante a realizar operaciones y cálculos matemáticos; en consecuencia, no se desarrolla un pensamiento analítico y de interpretación de los cálculos realizados de manera práctica en el área de formación en la cual se encuentra el estudiante, esto propicia una baja motivación por aprenderla, así como estrés y ansiedad al considerar que la estadística es compleja y tediosa.

Son muchos los estudiantes que llegan a cursar esta asignatura con actitudes desfavorables. Es necesario que los docentes del curso estén preparados para trabajar sobre estas actitudes y modificarlas. Pero el reto es aún mayor, ya que muchos de los docentes no cuentan con estas habilidades, ya sea por desconocimiento de modelos de enseñanza que favorezcan el aprendizaje de la estadística o porque no poseen actitudes favorables hacia la asignatura, lo que implica que estas actitudes negativas puedan ser transmitidas dentro de lo que se conoce como currículo oculto (Ramos, 2019).

Para Lara-Yáñez et al. (2017), la ansiedad matemática ha recibido un interés cada vez mayor debido a sus efectos adversos en el aprendizaje y dominio de las matemáticas desde una edad temprana. Se define como sentimientos de tensión o preocupaciones que impiden la finalización exitosa

de tareas que implican la manipulación de números y el razonamiento matemático no sólo en entornos escolares, sino también en una amplia gama de situaciones de la vida diaria.

En su artículo Cujba & Pifarré (2023) citan a Kazak et al. (2021), quienes enfatizan sobre la necesidad de cambiar el paradigma educativo que reduce la estadística a la enseñanza de múltiples fórmulas sin contextualizar, hacia la educación del razonamiento estadístico basado en los datos: trabajar la modelación y la visualización del conjunto de datos para encontrar patrones, y poder hacer predicciones basadas en la variabilidad de los datos, en vez de observar los valores individualmente. Es esencial que el profesorado reflexione sobre qué y cómo se enseña estadística y las percepciones de los estudiantes al respecto.

Lamentablemente, en muchas universidades se continúa aplicando el enfoque tradicional de enseñanza/aprendizaje de la estadística, a través de la repetición de definiciones y la ejecución de cálculos metódicos aplicando fórmulas a situaciones que, probablemente, se encuentren descontextualizadas y propicie la falta de interés por aprender.

De ahí la relevancia de introducir herramientas tecnológicas en el aula, pues éstas no sólo simplifican esos cansados cálculos estadísticos, sino que también han ayudado en la comprensión de los conceptos, a través de la práctica aplicada en situaciones reales enfocadas a su formación profesional.

Las tecnologías de información y comunicación (TIC) deben ser incorporadas a la enseñanza. La mediación que lleva a la captación de significados ya no es solamente humana y semiótica, incluye también el uso de ordenadores (Moreira, 2012). Estas tecnologías tienen el potencial de transformar el proceso de enseñanza/aprendizaje de manera innovadora, asimismo, apoyan el trabajo colaborativo y el desarrollo de proyectos de investigación, lo que deriva en aprendizajes más reflexivos y participativos (Rangel y Martínez, 2013).

Por otro lado, Ghani & Maat (2018) consideran que los educadores deberían considerar reevaluar los métodos de enseñanza que utilizan para los estudiantes que enfrentan problemas relacionados con la estadística. Diferentes técnicas de enseñanza, como la enseñanza asistida por ordenador, pueden reducir los miedos y mejorar así los logros estadísticos. Para enfatizar los métodos estadísticos enseñados, se recomienda que los estudiantes interactúen con datos reales recopilados.

De ahí que la enseñanza de la estadística, más allá de ser concebida como una materia más en el currículo escolar o universitario, debe ser concebida como una asignatura de formación para la vida de las personas, esto independientemente del área de formación. Todo individuo debería contar con conocimientos mínimos de acopio, procesamiento y análisis de datos para, posteriormente, transformarlos en información que implique ayudar a la correcta toma de decisiones, ya sea de índole personal o institucional (Villegas, 2019).

Partiendo de lo anterior, Ramos (2019) afirma que el desarrollo tecnológico ha traído consigo cambios importantes en las sociedades, y ha propiciado una inmensa cantidad de información que crece diariamente, por lo que se necesita a otro tipo de ciudadano y profesional, que sea capaz de entender e interpretar la información que lo rodea.

El mayor reto que enfrenta la educación universitaria implica romper el paradigma tradicional de enseñanza/aprendizaje, especialmente por parte de los profesores, quienes deben aprender lo necesario para lograr sintonizarse con sus estudiantes (Padilla, 2008).

Sin duda el uso de las TIC en la docencia implica aprender nuevas maneras de comunicarse y de transmitir conocimientos. En este proceso los docentes y estudiantes desempeñan un papel activo e innovador. (...) es importante capacitar a los profesores en el uso de plataformas virtuales, para que puedan emplearlas en el desarrollo de sus clases y en la exposición de sus temas. De no hacerlo, los docentes seguiremos siendo analfabetas o inmigrantes digitales (Gómez-Collado et al., 2016).

Mediante un estudio de caso intrínseco, el presente artículo analiza la ansiedad y estrés al aprender estadística y el impacto que produce en el rendimiento académico, antes y después de la intervención educativa, a través del uso del MegaStat, el cual es un complemento de Excel con todas las funciones que realiza análisis estadísticos con un libro de Excel. Realiza funciones básicas, como estadísticas descriptivas, distribuciones de frecuencia y cálculos de probabilidad, así como pruebas de hipótesis, ANOVA, regresión y más (Orris, 2024).

Material y métodos

Para esta investigación se utilizó una metodología bajo el enfoque mixto de tipo descriptiva, con el objetivo de presentar conclusiones en profundidad para una situación particular.

El método mixto es una representación de un conjunto de procesos sistemáticos, empíricos, críticos de investigación e implica la recolección y el análisis de datos tanto cualitativos como cuantitativos, así como una integración y

discusión conjunta, para realizar inferencias, producto de toda la información recabada y lograr un mayor entendimiento del fenómeno bajo estudio (Hernández y Mendoza, 2018).

La población y muestra participante fue dirigida. El tamaño corresponde a 45 estudiantes, es decir, la matrícula total, siendo 24 mujeres (53%) y 21 hombres (47%), con edades que oscilaban entre 19 y 23 años de edad, de las carreras en Técnico Superior Universitario en Agrobiotecnología área Vegetal y Contaduría, ambas del sistema sabatino, de la Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora, Ver.

En lo que se refiere a la parte cuantitativa se estimó el impacto que tuvo el uso de MegaStat en el rendimiento académico de los/las estudiantes en los contenidos temáticos de dos unidades que forman parte de la materia de Estadística como lo marca la hoja de asignatura. Para lo cualitativo, se buscó indagar sobre la influencia motivacional que propició en los/las estudiantes el uso de MegaStat para el aprendizaje de los temas.

Para poder alcanzar un aprendizaje significativo se deben considerar dos aspectos importantes: (1) la potencialidad significativa de los materiales educativos y (2) la predisposición del sujeto para aprender, es decir, la intencionalidad de transformar en psicológico el significado lógico de los materiales educativos (Moreira, 2017). Este último aspecto fue indagado a través de los formularios pretest y postest.

En cuanto a las actividades diseñadas, fueron centradas en los estudiantes, basadas en situaciones contextualizadas, es decir, se plantearon situaciones relacionadas con su formación profesional, propiciando el desarrollo de habilidades de observación, descubrimiento y reflexión, con el objetivo de apoyar el aprendizaje activo basado en la indagación, de tal forma que exploraran nuevas ideas, se apropiaran de su experiencia de aprendizaje y se generara una actitud positiva hacia el uso de la tecnología, específicamente el uso de MegaStat para la resolución de las situaciones planteadas en cada tema.

Se aplicaron como técnicas de recolección de la información, la observación directa, la revisión documental y la encuesta, a través de formularios y hojas de trabajo, permitiendo obtener información sobre los aspectos cuantitativos y cualitativos.

La investigación se llevó a cabo en tres etapas, (1) análisis previo, a través del formulario (pretest) y una prueba inicial; (2) intervención educativa para la impartición de dos unidades de la asignatura de Estadística, Estadística Descriptiva y Estadística Inferencial; (3) evaluación del impacto producido por la ansiedad y estrés al aprender estadística y el rendimiento académico con la aplicación del formulario (postest) y una prueba final.

El formulario (pretest y postest) es una adaptación del cuestionario hacia la estadística utilizado por Cubja & Pifarré (2023) en su investigación y fue aplicado por medio de formularios de Google, enviándolos al correo institucional de los/las estudiantes, lo que permitió recopilar información de forma rápida, fácil y eficiente. Se integró en 6 ítems relacionadas con dos aspectos: aprender estadística con el uso de la tecnología y, ansiedad y estrés en el aprendizaje de la estadística.

La evaluación para medir el aprendizaje (prueba inicial y final)

se resolvió de manera individual; la primera se realizó en papel, haciendo los cálculos matemáticos con el apoyo de las fórmulas; después de la intervención educativa, se volvió aplicar, resolviéndola con el uso de MegaStat para determinar el nivel de competencia alcanzado. En esta última prueba se les entregó dos archivos en formato Excel, uno por cada unidad y en cada hoja del libro de Excel se plantearon dos casos de cada tema.

Para el diseño de los casos prácticos se tomaron problemas planteados en las fuentes bibliográficas que ofrecen las hojas de asignatura, así como fuentes complementarias y se adaptaron a su perfil profesional, específicamente, para el Programa Educativo de Agrobiotecnología, se enfocaron a situaciones reales que estuvieron trabajando en el campo experimental.

Para la primera unidad, los estudiantes realizaron el procesamiento de datos y valoraron la solución obtenida mediante la interpretación y análisis de ésta con respecto al caso planteado para argumentar y contribuir a la toma de decisiones; el caso práctico 1 consistió en construir distribuciones de frecuencia de datos agrupados y no agrupados, graficar la distribución de datos e interpretar las tablas y los gráficos; en el caso práctico 2 determinaron e interpretaron las medidas de tendencia central, localización y dispersión. En el caso de la segunda unidad, realizaron estimaciones de datos estadísticos y construyeron la tabla ANOVA e interpretaron los resultados, a fin de proponer algunas recomendaciones al caso planteado, por lo que en el caso práctico 3 graficaron el diagrama de dispersión, determinaron el coeficiente de correlación, obtuvieron la ecuación de la recta e interpretaron los resultados, obtuvieron la regresión lineal y determinaron pronósticos; en el caso práctico 4 construyeron la tabla ANOVA e interpretaron los resultados obtenidos.

La intervención educativa se dio en el contexto real de clases con una duración de 9 sesiones de 120 minutos/sesión, planeadas para la impartición de dos unidades de la asignatura de Estadística. Durante ésta se recabó información por medio de la observación directa, permitiendo sistematizar las situaciones conductuales de los/las estudiantes y sus avances en el aprendizaje.

Resultados y Discusión

La estadística se utiliza ampliamente y contribuye significativamente en diversos campos. Sin embargo, los cursos de estadística son bien conocidos entre los estudiantes como cursos difíciles (Ghani & Maat, 2018). Tal como lo afirman Macher et al. (2013), una gran proporción de estudiantes identifica los cursos de estadística como los cursos que más ansiedad provocan en su plan de estudios. Muchos estudiantes se sienten perjudicados por sentimientos de estado de ansiedad en el examen y, por lo tanto, probablemente muestran logros más bajos.

Uno de los objetivos del presente artículo fue analizar la existencia de correlación entre las dos variables de estudio: rendimiento académico de estadística y, ansiedad y estrés del estudiante hacia el aprendizaje de ésta.

Primero, para analizar la normalidad de la muestra se utilizó la Prueba de Shapiro-Wilks (ver Figura 1).

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
Inicial	45	5.92	1.58	0.92	0.0131
Final	45	7.99	1.41	0.91	0.0052

Se observa que las variables no siguen una distribución normal, por lo que se empleó el estadístico no paramétrico con la Prueba de Wilcoxon para comparar los resultados entre la prueba de aprendizaje (inicial y final):

Prueba de Wilcoxon (muestras apareadas)

P-valor estimado por aproximación normal

Obs(1)	Obs(2)	N	Suma(R+)	E(R+)	Var(R+)	media(dif)	DE(dif)	Z	p(2 colas)
Inicial	Final	45	0.00	517.50	7842.25	-2.07	0.49	-5.84	<0.0001

Figura 2. Comparación de resultados entre la Prueba de aprendizaje inicial y final

A partir de la figura 2 podemos observar que existe diferencia significativa, con un nivel de significancia de 5%, en la puntuación total de la prueba de aprendizaje, es decir, hay diferencia en el aprendizaje de la estadística entre el uso de MegaStat y el uso de lápiz y papel.

Referenciando líneas anteriores, uno de los objetivos es verificar si hay correlación positiva entre el rendimiento académico de estadística y la ansiedad y estrés del estudiante hacia el aprendizaje de ésta, de ahí que se calculó y analizó el Coeficiente de correlación de Spearman.

Para el análisis correlacional, primero se estudió la relación entre la ansiedad y estrés y, el rendimiento académico antes de la intervención educativa, obteniendo los siguientes resultados:

Coefficientes de correlación

Correlación de Spearman: Coeficientes\probabilidades

	ANSIEDAD Y ESTRÉS	RENDIMIENTO ACADÉMICO
ANSIEDAD Y ESTRÉS	1.00	0.46
RENDIMIENTO ACADÉMICO	0.11	1.00

Figura 3. Prueba Spearman, antes de la intervención, para el grado de asociación entre las variables ansiedad y estrés - rendimiento académico

En la figura 3 se observa que el p-valor (0.46) es mayor al nivel de significativa de 0.05, por lo que no hay correlación entre la ansiedad y estrés con el rendimiento académico. Del mismo modo se estudió la relación entre la ansiedad y estrés y, el interés por aprender con el uso de la tecnología, obteniendo los siguientes resultados:

Coefficientes de correlación

Correlación de Spearman: Coeficientes\probabilidades

	ANSIEDAD Y ESTRÉS	APRENDIZAJE CON TECNOLOGÍA..
ANSIEDAD Y ESTRÉS	1.00	3.1E-07
APRENDIZAJE CON TECNOLOGÍA..	0.68	1.00

Figura 4. Prueba Spearman, antes de la intervención, para el grado de asociación entre las variables ansiedad y estrés - interés por aprender con la tecnología

En la figura 4 se observa que el p-valor (0.0000031) es menor al nivel de significativa de 0.05, por lo que se rechaza la hipótesis nula. Ahora, el coeficiente de Spearman es de 0.68, lo que indica que con un 95% de confianza, la relación entre la ansiedad y estrés con el interés por aprender con el uso de la tecnología, previo a la intervención educativa, es positiva y

alta.

Después de la intervención educativa se estudió la distribución cuantitativa de los datos obtenidos en la prueba inicial y la prueba final de una manera que facilitara la comparación entre las variables:

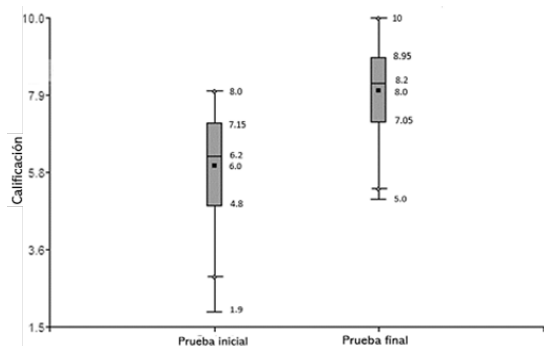


Figura 5. Gráfico de la distribución cuantitativa de los resultados obtenidos en las pruebas inicial y final

En la figura 5 se puede observar que los datos son asimétricos negativos en ambas pruebas, pues la mayoría de éstos se ubican en la parte inferior de la gráfica, es decir, pueden no estar distribuidos normalmente. Del mismo modo, para ambas pruebas, la ubicación de la mediana no está en medio de la caja, esto porque los datos de la parte inferior están más separados de las calificaciones medias 6.0 y 8.0, respectivamente.

En la prueba inicial, el 9% del estudiantado obtuvo una calificación aprobatoria de 8.0, siendo ésta la máxima alcanzada, sin embargo, para la prueba final, dicha calificación representó la media. Por otro lado, el 91% logró una calificación menor, lo que implica que aún no cuentan con los conocimientos necesarios y requeridos, esto de acuerdo a lo establecido en los Lineamientos de Operación de los Programas Educativos por Competencias Profesionales (2017) emitidos por la Coordinación General de Universidades Tecnológicas y Politécnicas, actualmente, Dirección General de Universidades Tecnológicas y Politécnicas (DGUTyP) que establece:

La Universidad Tecnológica utilizará la siguiente escala, para evaluar las asignaturas no integradoras:

- AU = Autónomo = 10 Supera el resultado de aprendizaje en contextos diferentes.
- DE = Destacado = 9 Cuando se han logrado los resultados de aprendizaje y excede los requisitos establecidos.
- SA = Satisfactorio = 8 Cuando se han logrado los resultados de aprendizaje.
- NA = No Acreditado = No cumple el resultado de aprendizaje de la unidad.

Para el caso de la prueba final, la calificación máxima fue de 10 y el 64.4% obtuvo una calificación aprobatoria, esto implica que hubo un avance notable en el rendimiento académico después de la intervención educativa con el uso de MegaStat el cual fue del 55.4% del estudiantado en comparación con la prueba inicial.

Partiendo de lo anterior, nuevamente se estudió la relación entre las variables obteniendo los siguientes resultados:

Coefficientes de correlación

Correlación de Spearman: Coeficientes\probabilidades

	APRENDIZAJE CON TECNOLOGÍA..	RENDIMIENTO ACADÉMICO
APRENDIZAJE CON TECNOLOGÍA..	1.00	8.0E-09
RENDIMIENTO ACADÉMICO	0.74	1.00

Figura 6. Prueba Spearman, después de la intervención, para el grado de asociación entre las variables ansiedad y estrés - interés por aprender con la tecnología

La asociación de las variables, interés por aprender con el uso de la tecnología y el rendimiento académico obtuvo un p-valor (0.000000008) menor que el nivel de significancia (0.05) y el coeficiente de Spearman fue de 0.74, lo que implica que existe una relación directa y alta entre las variables.

Finalmente, se estudió la relación entre la ansiedad y estrés con el rendimiento académico del estudiantado, teniendo los siguientes resultados:

Coefficientes de correlación

Correlación de Spearman: Coeficientes\probabilidades

	ANSIEDAD Y ESTRÉS	RENDIMIENTO ACADÉMICO
ANSIEDAD Y ESTRÉS	1.00	3.5E-08
RENDIMIENTO ACADÉMICO	-0.71	1.00

Figura 7. Prueba Spearman, después de la intervención, para el grado de asociación entre las variables ansiedad y estrés - rendimiento académico

La figura 7 nos indica que el p-valor (0.000000035) es menor al nivel de significativa de 0.05, por lo que se rechaza la hipótesis nula. El coeficiente de Spearman es de -0.71, lo que indica que con un 95% de confianza, la relación entre la ansiedad y estrés con el rendimiento académico, después de la intervención educativa, es alta e inversa.

A partir de los resultados obtenidos podemos decir que el aprendizaje basado en el uso de la tecnología, específicamente MegaStat, disminuyó la ansiedad y estrés de los estudiantes hacia la estadística después de la intervención educativa.

De ahí que la instrucción estadística con herramientas informáticas reduce la ansiedad estadística y mejora la actitud hacia la estadística y aumenta el éxito (Ciftci et al., 2014), dado que la ansiedad puede tener efectos antagónicos sobre el rendimiento académico (Paechter et al., 2017)

Batanero y Díaz (2011) consideran que el ordenador puede y debe usarse en la enseñanza como instrumento de cálculo y representación gráfica, para analizar datos recogidos por el alumno o proporcionados por el profesor. Un problema tradicional en la enseñanza de la Estadística ha sido la existencia de un desfase entre la comprensión de los conceptos y los medios técnicos de cálculo para poder aplicarlos. La solución de los problemas dependía en gran medida de la habilidad de cálculo de los usuarios, que con frecuencia no tenían una formación específica en matemáticas. Hoy día la existencia de programas fácilmente manejables permite salvar este desfase y realizar cálculos complejos en pocos segundos sin posibilidad de error. No tiene pues, sentido, hacer perder el tiempo a los alumnos ocupándoles en repetir una y otra vez cálculos tediosos para intentar aumentar su destreza de cálculo, sino que es preferible dedicar ese tiempo a actividades interpretativas y a la resolución de problemas.

Los resultados que obtuvieron Cubja & Pifarré (2023) en su investigación, corroboraron una mejora del aprendizaje de la estadística y también una relación entre las actitudes y el aprendizaje de contenido de estadística, tras la implementación de una intervención educativa basada en trabajo por proyectos, trabajo colaborativo y con uso de tecnología, a través de un estudio de caso.

Por otro lado, González & Trelles, (2019) también comprobaron que existe una mejora en la motivación al utilizar la tecnología, así como varias propuestas de soluciones según sus puntos de vista, reflexión y análisis, demuestran que en la realidad existen situaciones que se pueden resolver de diferentes maneras. Y que la motivación y el estilo de resolución de problemas cambian significativamente a lo largo de los años en función del rendimiento, apoyando así la hipótesis de madurez-estabilidad en las diferencias individuales (Cassidy & Giles, 2009).

Conclusiones

En esta investigación, se plantearon casos prácticos en la intervención educativa, adaptados a las áreas de estudio de los estudiantes de TSU en Agrobiotecnología área vegetal y TSU en Contaduría, permitiendo contextualizar la estadística, hacerla más interesante y relevante, es decir, los problemas o situaciones contenían datos con significado que podían ser interpretados con facilidad, lo que permitió reforzar el interés por resolverlos.

Los resultados del estudio demostraron una mejora en el rendimiento académico en el aprendizaje de la estadística, con un incremento del 55.4% del estudiantado que lograron obtener al menos la calificación mínima aprobatoria de 8.0 en contraste con los resultados obtenidos en la prueba inicial y, también una relación entre la ansiedad y estrés con el aprendizaje de los contenidos temáticos de las dos unidades, tras la implementación del uso de MegaStat, a través de los estudios de caso, logrando reducir la ansiedad y estrés al aprender los contenidos temáticos de estadística en un 62.9% de los/las estudiantes.

Previo a la intervención educativa, el 76.3% de los/las estudiantes mencionaron tener interés por aprender estadística con el uso de la tecnología, porcentaje positivo y alto; después de la intervención educativa, incrementó un 12.6%, logrando así un 88.9% de interesados por aprender estadística con el uso de la tecnología.

Por un lado, puede perjudicar el rendimiento y, por otro, puede resultar beneficioso. Esto no significa que los profesores deban infundir ansiedad a sus alumnos, pero tampoco deben restar importancia a la dificultad del curso y deben enfatizar la importancia de poner esfuerzo en él para finalmente tener éxito. Los profesores también pueden enfatizar la importancia y el valor de las estadísticas y describir claramente a los estudiantes lo que deben hacer para tener éxito en un curso.

Como docentes debemos enfocar la enseñanza en la utilidad y aplicabilidad de los contenidos temáticos, sin importar el nivel educativo, es decir, en el contexto real del estudiante según el nivel de formación, a fin de que pueda encontrar el sentido de su aprendizaje y den significado a éste. Batanero y Díaz (2011) mencionan que hay que diferenciar entre conocer y ser capaz de aplicar un conocimiento. La

habilidad para aplicar los conocimientos matemáticos es frecuentemente mucho más difícil de lo que se supone, porque requiere no sólo conocimientos técnicos (tales como preparar un gráfico o calcular un promedio), sino también conocimientos estratégicos (saber cuándo hay que usar un concepto o gráfico dado). Asimismo, referencian que no hay nada que haga más odiosa la estadística que la resolución de ejercicios descontextualizados.

Finalmente, el presente estudio concluye que existe una relación positiva y estadísticamente significativa entre la ansiedad y estrés del estudiantado hacia el aprendizaje de la estadística. Cabe mencionar que no es posible generalizar estos resultados, dado que el estudio fue con una muestra pequeña, de ahí la importancia de seguir realizando más investigaciones que aporten sobre cómo enseñar estadística, de tal forma que permita a las/las universitarias encontrar el sentido de su aprendizaje, es decir, la utilidad y aplicabilidad de los contenidos temáticos en sus áreas de especialización, a través de herramientas tecnológicas que no sólo les facilite los tediosos cálculos matemáticos, sino que además fortalezcan su razonamiento estadístico y, en su conjunto, minorice la ansiedad y estrés que les produce.

Contribución de los autores

JBPG, diseño del trabajo, recolección de datos, análisis estadístico y redacción.

IHM, diseño del trabajo, recolección de datos, análisis estadístico y redacción.

Financiamiento

“No se recibió ningún patrocinio para llevar a cabo este artículo”.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Presentaciones previas

Ninguna

Referencias

1. Batanero, C. y Díaz, C. (2011). Estadística con proyectos. Universidad de Granada.
2. Cassidy, T., & Giles, M. (2009). Achievement Motivation, Problem-solving style, and Performance in Higher Education. *The Irish Journal of Psychology*, 30(3-4), 211-222. <https://doi.org/10.1080/03033910.2009.10446311>
3. Ciftci, S. K., Karadag, E. y Akdal, P. (2014). Instruction of statistics via computer-based tools: Effects on statistics' anxiety, attitude, and achievement. *Journal of Educational Computing Research*, 50(1), 119-133. <https://doi.org/10.2190/EC.50.1.f>
4. Cubja A. & Pifarré M. (2023). Relationships between statistical performance and student attitudes in the framework of a data analytics project with technology. *Revista Educación matemática*, vol. 35, núm. 2, pp. 196-225, Sociedad Mexicana de Investigación y Divulgación de la Educación Matemática A.C.; Universidad de Guadalajara.
5. DGUTyP (2017). Lineamientos de Operación de los Programas Educativos por Competencias Profesionales. En Pág. 5 - 6.
6. Eccius-Wellmann, Clara-Cristina, & Lara-Barragán, Antonio G.

- (2016). Hacia un perfil de ansiedad matemática en estudiantes de nivel superior. *Revista iberoamericana de educación superior*, 7(18), 109-129. Recuperado en 24 de julio de 2024. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-28722016000100109&lng=es&tlng=es
7. Ghani, F. and Maat, S. (2018) Anxiety and Achievement in Statistics: A Systematic Review on Quantitative Studies. *Creative Education*, 9, 2280-2290. doi: [10.4236/ce.2018.914168](https://doi.org/10.4236/ce.2018.914168).
 8. Gómez M., Contreras L., Gutiérrez D. (2016). El impacto de las tecnologías de la información y la comunicación en estudiantes de ciencias sociales: un estudio comparativo de dos universidades públicas. *Revista Innovación Educativa*, ISSN: 1665-2673 vol. 16, número 71.
 9. Gonzales, N. & Trelles, C. (2019). "Mathematical Modeling and Tinker Plots in Solving Problems," XIV Latin American Conference on Learning Technologies (LACLO), San Jose Del Cabo, Mexico, 2019, pp. 367-374, doi: [10.1109/LACLO49268.2019.00068](https://doi.org/10.1109/LACLO49268.2019.00068).
 10. Hanna, D., & Dempster, M. (2009). The effect of statistics anxiety on students predicted and actual test scores. *The Irish Journal of Psychology*, 30(1-4), 201-209. <https://doi.org/10.1080/03033910.2009.10446310>
 11. Hernández Sampieri, R., Mendoza Torres, C. P. (2018). Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. México: McGraw-Hill Interamericana.
 12. Lara Yáñez-Marquina, Lourdes Villardón-Gallego (2017) Math anxiety, a hierarchical construct: Development and validation of the Scale for Assessing Math Anxiety in Secondary education. *Revista Ansiedad y Estrés*, 23:59-65.
 13. Macher, D., Paechter, M., Papousek, I., Ruggeri, K., Freudenthaler, H. H., & Arendasy, M. (2013). Statistics Anxiety, State Anxiety during an Examination, and Academic Achievement. *British Journal of Educational Psychology*, 83, 535-549. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8279.2012.02081.x>
 14. Moreira, M.A. (2012). Aprendizaje significativo, campos conceptuales y pedagogía de la autonomía: implicaciones para la enseñanza *Aprendizagem Significativa em Revista*, 2(1): 44-45.
 15. Orris J.B. (2024). MegaStat for Microsoft Excel, Windows and macOS. Revisado en mayo 2024. Disponible en https://higher.ed.mheducation.com/sites/0077425995/information_center_view0/index.html
 16. Padilla Lavín, M. A. (2008). Un acercamiento a la comprensión del reto universitario ante la Generación Net y su integración al mundo laboral en México. *HospitalidadEsdaí*, 14, 27-54.
 17. Paechter, M., Macher, D., Martskvishvili, K., Wimmer, S. & Papousek, I. (2017). Mathematics Anxiety and Statistics Anxiety. Shared but Also Unshared Components and Antagonistic Contributions to Performance in Statistics. *Sec. Educational Psychology*. Volume 8 - 2017 <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01196>
 18. Ramos Vargas, Luis Fernando. (2019). La educación estadística en el nivel universitario: retos y oportunidades. *Revista Digital de Investigación en Docencia Universitaria*, 13(2), 67-82. <https://dx.doi.org/10.19083/ridu.2019.1081>
 19. Rangel E., y Martínez J. (2013). Educación con TIC para la sociedad del conocimiento. *Revista Digital Universitaria*, 14(2), s/p. Recuperado de: <http://www.revista.unam.mx/vol.14/num2/art16/index.html>
 20. Villegas Zamora, Diego Alonso. (2019). La importancia de la estadística aplicada para la toma de decisiones en Marketing. *Revista Investigación y Negocios*, 12(20), 31-44. Recuperado en 23 de julio de 2024, de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2521-27372019000200004&lng=es&tlng=es
 21. Wang, Z., Lukowski, S., Hart, S., Lyons, I. M., Thompson, L. A., Kovas, Y., et al. (2015). Is math anxiety always bad for math learning? The role of math motiv. *Psychol. Sci.* 26, 1863-1876. doi: [10.1177/0956797615602471](https://doi.org/10.1177/0956797615602471).



ARTÍCULO ORIGINAL

Efectos combinados de bismuto y detergente en la germinación y crecimiento inicial de lenteja (*Lens culinaris*)

Citlalli Itzel Quintana-García¹ Gabriel Grosskelwing-Nuñez¹, Arturo Cabrera-Vazquez², Joaquín Sangabriel-Lomelí¹, Oscar Moreno-Vázquez¹, Arturo Cabrera-Hernández¹

¹Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Km 1.8 Carretera a Loma del Cojolite, Misantla 93821, México.

²Escuela de Bachilleres "Artículo 3ro Constitucional" Av. Ruíz Cortínez No. 2901 Col. Unidad Magisterial, Xalapa, México

Recepción 19 de agosto 2024. Aceptación 07 de noviembre de 2024.

PALABRAS CLAVE

Detergente, Bismuto, germinación, lenteja, lens culinaris

Resumen

El bismuto (Bi) es clasificado como un "metal verde" por su baja toxicidad comparada con otros metales. Aunque su abundancia natural es baja, se anticipa un incremento en las concentraciones de Bi en matrices ambientales como suelos y aguas residuales, consecuencia de su creciente demanda en diversas aplicaciones industriales, siendo imperativo profundizar en la comprensión de los efectos biológicos del Bi tanto individuales como en combinación con otros contaminantes como los detergentes, con el fin de evaluar su potencial impacto en la salud vegetal. En el presente estudio, mediante un diseño experimental factorial se evaluaron los efectos individuales de diversas concentraciones de Bi y detergente, así como sus interacciones a semillas de lenteja (*Lens culinaris*). El detergente no ejerció un efecto inhibitorio significativo sobre la germinación o el crecimiento de las plántulas, incluso a las concentraciones más altas evaluadas. Por otro lado, el bismuto tampoco mostró efectos significativos sobre la germinación o una inhibición del crecimiento a la concentración de 20 mg/L de nitrato de bismuto. Las interacciones entre ambos contaminantes no modificaron significativamente la respuesta de las plantas. Estos hallazgos en contraste a otros reportados previamente sugieren que la variedad de semillas de lenteja empleadas en este estudio presenta cierta tolerancia al detergente y al bismuto. Es importante considerar la necesidad de realizar estudios a concentraciones mayores de ambos contaminantes para evaluar completamente los efectos de estos en el desarrollo de esta semilla.

KEYWORDS

Detergent, germination, culinaryis
Bismuth, lentil, lens

Abstract

Bismuth (Bi) is classified as a "green metal" due to its low toxicity compared to other metals. Although its natural abundance is low, an increase in Bi concentrations in environmental matrices such as soils and wastewater is anticipated, as a consequence of its growing demand in various industrial applications. It is imperative to further understand the biological effects of Bi, both individually and in combination with other contaminants such as detergents, in order to evaluate its potential impact on plant health. In the present study, the individual effects of various concentrations of Bi and detergent as well as their interactions with lentil (*Lens culinaris*) seeds were evaluated using a factorial experimental design. The detergent did not exert a significant inhibitory effect on germination or seedling growth, even at the highest concentrations evaluated. On the other hand, bismuth also showed no significant effects on germination or growth inhibition at the concentration of 20 mg/L bismuth nitrate. The interactions between both contaminants did not significantly modify the response of the plants. These findings, in contrast to those previously reported, suggest that the variety of lentil seeds used in this study have a certain tolerance to detergent and bismuth. It is important to consider the need to conduct studies at higher concentrations of both contaminants to fully evaluate their effects on the development of this seed.

Introducción

La contaminación del agua se ha convertido en un problema global grave, impulsado principalmente por el crecimiento demográfico, la industrialización y la agricultura. La descarga indiscriminada de desechos domésticos, municipales e industriales en los cuerpos de agua sin tratamiento previo contamina ríos, lagos y océanos, poniendo en riesgo la salud humana, la agricultura y los ecosistemas acuáticos. La utilización de agua contaminada para riego impacta negativamente el crecimiento de los cultivos y puede transferir contaminantes a los alimentos que consumimos¹.

Esta contaminación, compuesta por una amplia gama de sustancias químicas orgánicas e inorgánicas de origen natural o sintético (metales pesados, detergentes, pesticidas, colorantes, fármacos, cosméticos) afectan negativamente la calidad del agua, reduce la productividad de los suelos agrícolas y contamina la cadena alimentaria. La eutrofización, la toxicidad y la bioacumulación son algunos de los impactos más relevantes asociados a esta problemática¹⁷.

La proliferación de detergentes y metales pesados en el agua y suelo, son de las principales amenazas para los ecosistemas a nivel global. Estos compuestos, altamente persistentes y bioacumulativos, alteran procesos biogeoquímicos esenciales, con consecuencias devastadoras para la salud de las especies vegetales^{3,15}.

Los detergentes, productos de uso cotidiano, están compuestos por una variedad de sustancias químicas, siendo los surfactantes su componente principal. Estos compuestos anfipáticos, con propiedades tanto hidrofílicas como hidrofóbicas, son responsables de la acción limpiadora de los detergentes.

Además de los surfactantes, los detergentes contienen otros aditivos como blanqueadores, enzimas, perfumes y agentes constructores, cada uno con funciones específicas. Sin embargo, esta compleja formulación también los convierte en una fuente significativa de contaminación ambiental¹⁹. En particular los surfactantes, clasificados en aniónicos, catiónicos, no iónicos, semipolares y anfóteros, son

considerados contaminantes emergentes debido a su persistencia en el medio ambiente y su capacidad para alterar los ecosistemas acuáticos, y al ser descargados continuamente en los cuerpos de agua, sin tratamiento alteran los ecosistemas acuáticos¹¹, además debido a la gran demanda de agua particularmente en países subdesarrollados, se les emplea directamente para riego en la agricultura, con los peligros medioambientales que ello produce¹⁰.

El bismuto (Bi), un elemento con creciente relevancia industrial debido a sus propiedades únicas y su perfil toxicológico relativamente benigno ha visto aumentar significativamente su producción en las últimas décadas. A pesar de su amplia gama de aplicaciones, que incluyen desde la farmacéutica hasta la metalurgia, la comprensión de los efectos del Bi en los organismos vivos sigue siendo incompleta²¹. Investigaciones recientes han puesto de manifiesto un notable incremento en las concentraciones de Bi en los suelos cultivados. Estudios en plantas de tratamiento de aguas residuales de Estocolmo, han documentado un aumento del 300% en los niveles de Bi asociado al uso generalizado de productos cosméticos que contienen compuestos de Bi². La disposición de lodos de depuradora en tierras agrícolas, el empleo de fertilizantes fosfatados y el elevado consumo de cosméticos contribuyen significativamente a la contaminación de los suelos por este elemento²⁴.

Estudios recientes sugieren que el Bi puede ser fácilmente absorbido por algunas plantas y alterar procesos fisiológicos vitales²². Se ha propuesto la absorción pasiva de iones de bismuto como una vía potencial para internalizar pasivamente este metal, conjugándose en el interior de la planta con glutatión (GSH) para formar complejos y reducir la toxicidad del Bi²⁶.

La contaminación combinada de Bi y detergentes en aguas residuales y suelos agrícolas plantea un escenario complejo en el que las propiedades fisicoquímicas y toxicológicas de ambos contaminantes pueden verse significativamente alteradas. En general, estas interacciones pueden modificar la solubilidad, adsorción y movilidad de los metales, así como su

biodisponibilidad para las plantas durante su desarrollo²⁴. La naturaleza de estas interacciones ya sea sinérgica o antagónica, puede modular los efectos tóxicos de ambos compuestos sobre la germinación de las semillas. Evaluar conjuntamente el Bi y los detergentes permite una comprensión más precisa de los procesos que ocurren en el suelo contaminado y sus implicaciones para la salud vegetal¹⁸.

Las lentejas (*Lens culinaris*) son leguminosas con una larga historia de cultivo y consumo humano. Su perfil nutricional, rico en proteínas, fibra y micronutrientes, las ha convertido en un alimento básico en muchas culturas y ofrecen una alternativa sostenible y saludable a las fuentes de proteínas de origen animal²⁷. Además, debido a su rápida y uniforme germinación y su alta sensibilidad a una amplia gama de metales, se ha establecido como indicador sensible y confiable para evaluar la fitotoxicidad de diversos metales pesados^{6,8,16,25}, lo cual subraya su potencial como bioindicador en estudios de contaminación ambiental.

Aunque se han documentado aumentos en los niveles de estos dos contaminantes en suelos, los estudios que evalúan su toxicidad combinada en plantas son escasos^{2,17}. Este estudio aborda esta brecha al evaluar el impacto de diferentes concentraciones de una sal de bismuto y un detergente lavatrastes comercial sobre la germinación y el crecimiento de semillas de lenteja, una especie de gran importancia agronómica. Al seleccionar la lenteja como organismo modelo, este trabajo contribuye a comprender mejor los mecanismos de toxicidad de mezclas de contaminantes y a evaluar la sensibilidad de un cultivo de relevancia económica frente a estos contaminantes.

Material y métodos

Reactivos y material biológico

Las semillas de lenteja (*Lens culinaris*) fueron adquiridas en un mercado local de la ciudad de Misantla, Veracruz, México, durante el mes de julio de 2023. Se seleccionaron semillas maduras morfológicamente y sin signos de daño. Para su conservación, las semillas se almacenaron en un recipiente de vidrio herméticamente cerrado a temperatura ambiente (25 ± 4 °C) hasta su utilización en los experimentos.

Como fuente de bismuto, se empleó nitrato de bismuto pentahidratado ($\text{BiNO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\geq 98\%$, marca MEYER). Como agente tensoactivo, se utilizó un detergente lavatrastes líquido comercial de marca líder, cuya formulación, según el etiquetado del producto, incluye alquil sulfonato de sodio, alcohol etoxilado (EO 10), alquil sulfonato de magnesio, óxidos de amina, alquil sulfonato de trietanolamina, y otros aditivos (etanol, perfume, EDTA tetrasódico, colorantes, preservantes).

Técnica de germinación de semillas en papel húmedo

Para evaluar el efecto de las soluciones de prueba sobre la germinación y el crecimiento inicial de las semillas de lenteja, se empleó un ensayo de germinación estándar en papel filtro. Se distribuyeron 16 semillas por réplica sobre discos de papel filtro Whatman No. 1 colocados en cajas petri, previamente esterilizados y saturados con 10 mL de la solución correspondiente. Las cajas Petri se incubaron en condiciones ambiente de temperatura, humedad relativa e iluminación. La pérdida por evaporación de humedad se compensó mediante adiciones diarias de agua destilada estéril. Se consideró como semilla germinada aquella que

presentó una radícula emergente de al menos 2 mm de longitud. Al quinto día de incubación, se evaluó el porcentaje de germinación y se determinaron parámetros morfométricos como la longitud y peso fresco de raíz y tallo.

Diseño de experimentos

Se evaluaron 25 combinaciones únicas de concentraciones de bismuto y detergente, generadas a partir de un diseño factorial completo (figura 1).

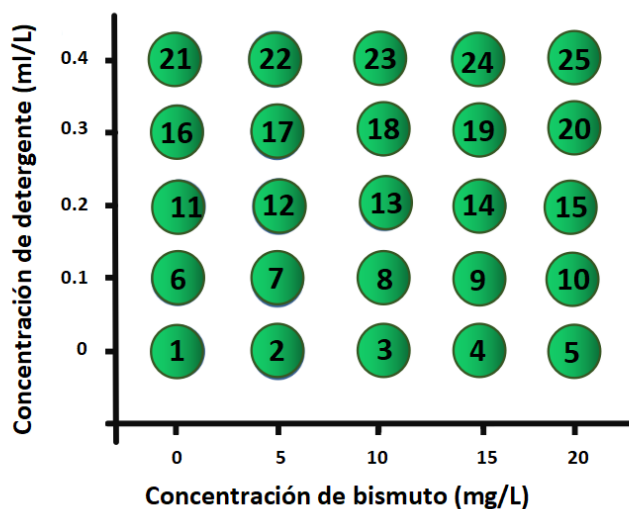


Figura 1.- Diseño experimental factorial 5×5 para evaluar el efecto combinado de cinco concentraciones de bismuto (0, 5, 10, 15 y 20 mg/L) y cinco concentraciones de detergente (0, 0.1, 0.2, 0.3 y 0.4 ml/L) sobre la germinación de semillas de lenteja (*Lens culinaris*). Este diseño generó un total de 25 tratamientos diferentes.

Las semillas fueron expuestas a todas las posibles combinaciones de cinco niveles de bismuto (0, 5, 10, 15 y 20 mg/L) y cinco niveles de detergente (0, 0.1, 0.2, 0.3 y 0.4 ml/L).

Análisis estadístico

Los datos se recopilaron y ordenaron utilizando el software Excel ® 2016. El análisis estadístico y gráfico de los datos se realizó empleando el software de código libre "R". Se evaluó la normalidad de los datos y homogeneidad de varianzas mediante las pruebas de Shapiro-Wilks y Levene. Dado que no se cumplió el supuesto de normalidad para ciertos grupos de datos, se empleó estadística no paramétrica. Como prueba de hipótesis se empleó la prueba de Kruskal-Wallis, ($p < 0.05$). La significancia entre medias se verificó mediante la prueba post-hoc de Dunn.

Resultados

Germinación acumulada de semillas de lenteja (*Lens culinaris*)

La figura 2, muestra los perfiles de germinación de semillas de lenteja a lo largo de un periodo de cuatro días, bajo diferentes combinaciones de nitrato de bismuto pentahidratado (0, 5, 10, 15 y 20 mg/L) y detergente lavavajillas comercial (0, 0.1, 0.2, 0.3 y 0.4 ml/L).

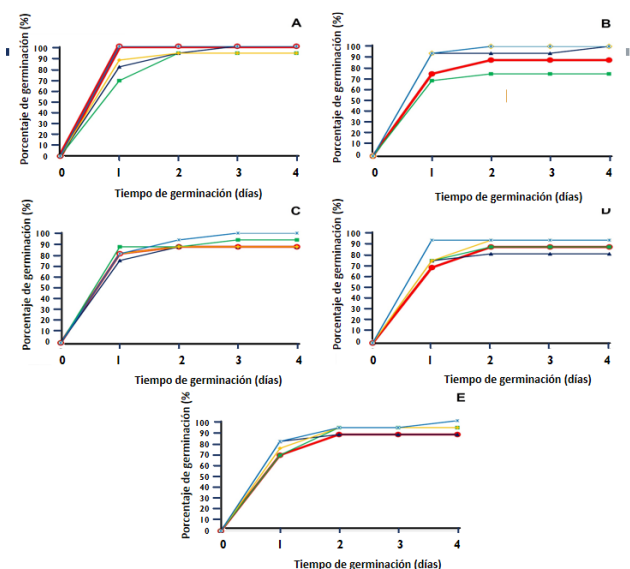


Figura 2.- Porcentaje de germinación de semillas de lenteja en presencia de cinco niveles de nitrato de bismuto pentahidratado; 0 mg/L (línea roja), 5 mg/L (línea verde), 10 mg/L (línea obscura), 15 mg/L (línea amarilla) y 20 mg/L (línea azul) en presencia de cinco niveles de detergente: 0 ml/L (panel A), 0.1 ml/L (panel B), 0.2 ml/L (panel C), 0.3 ml/L (panel D) y 0.4 ml/L (panel E).

Se evaluó el porcentaje de germinación acumulado diariamente como indicador de la viabilidad de las semillas. Se observó un rápido incremento en el porcentaje de germinación durante el primer día en todos los tratamientos, alcanzando valores cercanos al 100% al final del experimento. Sin embargo, al comparar los perfiles de germinación entre los diferentes tratamientos, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$).

Estos resultados sugieren que, en el rango de concentraciones evaluado, ni el bismuto ni el detergente, ni su combinación, ejercieron un efecto significativo sobre la germinación de las semillas de lenteja.

Efecto individual de detergente sobre la longitud y el peso de tallo y raíz de plántulas de lenteja

La figura 3, presenta gráficas de caja para las variables de respuesta longitud y el peso de los tallos y las raíces (paneles A-D) de plántulas de lenteja a los 4 días después de la siembra. Plántulas expuestas a diversas concentraciones de detergente (0, 0.1, 0.2, 0.3 y 0.4 mL/L) presentaron una ligera tendencia decreciente no significativa para peso de tallo y raíz, no obstante, en las cuatro variables no se observaron diferencias significativas.

Sin embargo, la presencia de bismuto solo o en combinación con detergente no afectó significativamente los valores promedio. Estos hallazgos sugieren que la aplicación de detergente no influye en el crecimiento y el peso de las plántulas.

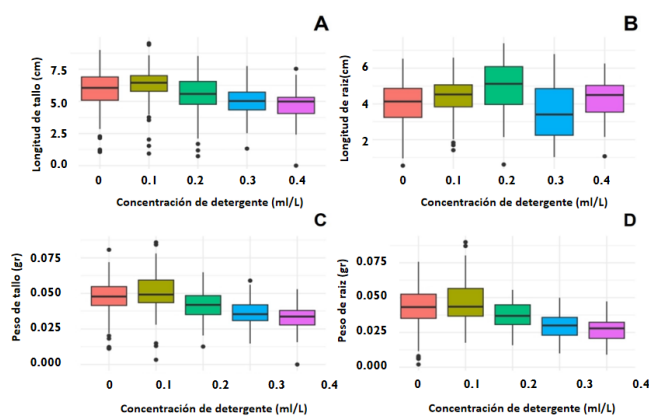


Figura 3.- Análisis del efecto individual de cinco concentraciones de detergente (0, 0.1, 0.2, 0.3 y 0.4 ml/L) sobre longitud de tallo (panel A), longitud de raíz (panel B), peso de tallo (panel C) y peso de raíz (panel D) de plántulas de lenteja al día 4 post-siembra.

Efecto individual de bismuto sobre la longitud y el peso de tallo y raíz de plántulas de lenteja.

La figura 4 muestra el efecto individual de diferentes concentraciones de nitrato de bismuto comercial sobre el crecimiento de plántulas de lenteja a los 4 días después de la siembra. No se observó una disminución significativa en ninguna de las variables.

Efecto de las interacciones entre detergente y bismuto sobre el desarrollo de plántulas de lenteja

La figura 5 ilustra el efecto combinado de un detergente lavatrastes comercial y el nitrato de bismuto sobre el crecimiento de plántulas de lenteja cuatro días post-siembra. Aunque un análisis comparativo muestra pequeñas diferencias entre los diferentes tratamientos, el análisis no paramétrico de Kruskal-Wallis (prueba H) no evidenció una diferencia significativa ($p > 0.05$) entre ambos factores evaluados para las diferentes variables de respuesta evaluadas, longitud de tallo y raíz, así como peso de tallo y raíz.

En conclusión, las concentraciones de bismuto ensayadas (0, 5, 10 y 20 mg/L) no modificaron significativamente la respuesta de las plantas al detergente, indicando que no existe interacción entre ambos factores.

Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio revelan un panorama sobre los efectos individuales del detergente lavatrastes comercial y el nitrato de bismuto en la germinación y crecimiento inicial de plántulas de lenteja, así como su interacción.

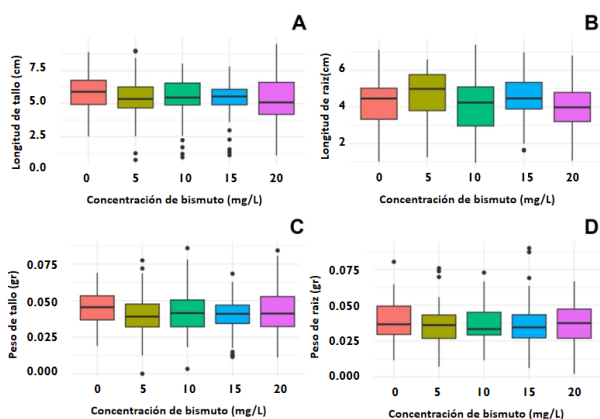


Figura 4.- Análisis del efecto individual de cinco concentraciones de nitrato de bismuto pentahidratado; 0 mg/L, 5 mg/L, 10 mg/L, 15 mg/L y 20 mg/L sobre longitud de tallo (panel A), longitud de raíz (panel B), peso de tallo (panel C) y peso de raíz (panel D) de plántulas de lenteja al día 4 post-siembra.

La germinación no se vio afectada significativamente por ninguno de los tratamientos, tampoco el crecimiento vegetativo, en términos de longitud y peso de tallo y raíz. Sin embargo, la presencia de bismuto solo o en combinación con detergente no afectó significativamente los valores promedio. Estos hallazgos sugieren que la aplicación de detergente no influye en el crecimiento y el peso de las plántulas.

Efecto individual de detergente

Los resultados obtenidos en este estudio evidencian la heterogeneidad de respuestas de diferentes especies vegetales a la exposición a detergentes. Si bien nuestras observaciones indican que el detergente evaluado no generó efectos sinérgicos o antagónicos significativos en la germinación de semillas de lenteja en las condiciones experimentales establecidas de manera similar a la tolerancia mostrada por otras especies, como chile habanero¹⁴, maíz¹², pepino⁷ y lechuga⁹; otros estudios han reportado efectos inhibitorios en la germinación y crecimiento de esta misma especie^{4,5}, así como en otras como el girasol¹³. Comparativamente, Cai, X., & Ostroumov, S. A., 2020^{4,5} aplican un detergente líquido para ropa y encuentran inhibición parcial de la germinación al doble de la máxima concentración empleada en este estudio e inhibición total a concentraciones diez veces las aplicadas en este estudio. En los otros estudios citados se empleó detergente en polvo para ropa. Estos hallazgos resaltan la importancia de considerar la especie vegetal, el tipo y la concentración del detergente empleado y la duración de la exposición como factores determinantes en la fitotoxicidad de estos compuestos.

La discrepancia entre nuestros resultados y los reportados en estudios anteriores podría atribuirse a diferencias en la composición química de los detergentes y las condiciones de germinación aplicadas. El detergente empleado en este estudio fue líquido lavatrastes, mientras que en otros estudios se empleó detergente en polvo para ropa. Otro factor a considerar es la variedad de lenteja utilizada. Un estudio previo que evaluó la susceptibilidad de la lenteja frente a aluminio reportó una variabilidad significativa en

la tolerancia a este metal entre los genotipos de lentejas empleados, lo cual subraya la importancia del tipo de lenteja empleada²⁵. En conjunto, los resultados de estas investigaciones destacan la necesidad de realizar evaluaciones específicas para cada detergente y especie vegetal, a fin de visualizar el alcance de los efectos tóxicos de estos productos sobre la germinación y el desarrollo de las plantas. Los resultados obtenidos para las variables de crecimiento de las plántulas no mostraron diferencias significativas entre los tratamientos.

Estos hallazgos contrastan con estudios recientes en otras especies, como el cempasúchil, donde se observaron efectos inhibitorios del detergente sobre la longitud de tallo y peso de raíz a concentraciones similares y con el mismo tipo de detergente. La variabilidad en la respuesta de las plantas a los detergentes sugiere que la sensibilidad a estos compuestos puede depender de factores como la especie vegetal, la etapa de desarrollo y el tipo de detergente. En otros cultivos, como maíz¹², chile habanero¹⁴, pepino⁷ y girasol¹³, se han reportado efectos negativos de los detergentes sobre el crecimiento, lo que resalta la importancia de evaluar estos efectos de manera específica para cada especie.

Papel del bismuto

En el marco de este estudio, no se observaron efectos significativos del bismuto sobre la germinación y el crecimiento inicial de plántulas de lenteja. Estos resultados sugieren que, bajo las condiciones experimentales evaluadas, esta especie podría presentar una mayor tolerancia al bismuto en comparación con otras, como el tomate (*Solanum lycopersicum*)²⁰ ó el berro de jardín (*Lepidium sativum L.*)²³.

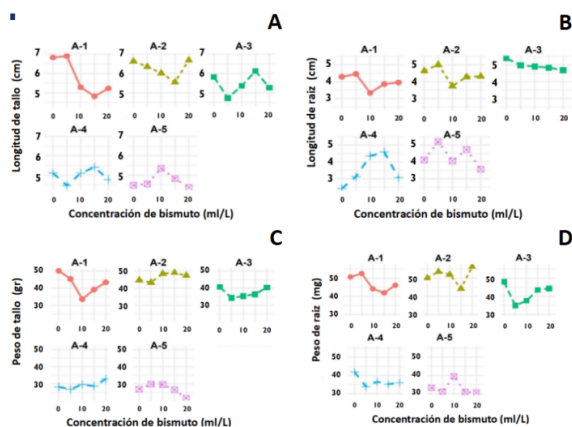


Figura 5.- Gráfica comparativa entre las medianas de los diferentes tratamientos. Se presenta las interacciones para el detergente lavatrastes comercial y el bismuto sobre la longitud de tallo (panel A), longitud de raíz (panel B), peso de tallo (panel C) y peso de raíz (panel D). En cada panel las concentraciones de bismuto (0, 5, 10, 15 y 20 mg/L) se presentan en el eje de las abscisas. Las concentraciones del detergente lavatrastes comercial (0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 ml/L) se presentan en los subpaneles A-1, A-2, A-3, A-4 y A-5 respectivamente. No se presentaron diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.5$)

En este último caso, las concentraciones de bismuto empleadas fueron muy superiores a las aplicadas en este estudio, sin embargo, en el caso del tomate y la *Arabidopsis thaliana* se observan efectos fitotóxicos en el crecimiento de la raíz y la

longitud del tallo a concentraciones mayores de 3 micromolar (1.185 mg/L de BiNO₃), concentración cinco veces menor que la del presente estudio. Por lo tanto, es factible que las concentraciones empleadas de bismuto en este estudio no hayan superado los umbrales de toxicidad para la lenteja o que esta especie posea mecanismos fisiológicos que le permitan mitigar los efectos adversos del metal.

Interacción entre detergente y bismuto

Los resultados del presente estudio no evidencian una interacción significativa entre el detergente y el bismuto en su efecto sobre la germinación de lenteja y el crecimiento de las plántulas, lo cual sugiere que los efectos de ambos compuestos sobre el crecimiento de las plántulas son independientes dentro del rango de concentraciones evaluadas; sin embargo, la complejidad de las interacciones entre múltiples contaminantes en sistemas biológicos²⁴, sugiere que podrían existir efectos sinérgicos o antagonísticos que no fueron detectados en este estudio.

Conclusiones

Los resultados de este estudio sugieren que, bajo las condiciones experimentales evaluadas, ni el detergente lavatrastes comercial ni el bismuto ejercieron un efecto inhibitorio significativo sobre la germinación y el crecimiento inicial de plántulas de lenteja. Sin embargo, es importante resaltar que la respuesta de las plantas a los contaminantes puede variar en función de factores como la especie, el genotipo, la etapa de desarrollo y la presencia de otros contaminantes. Estudios futuros con un diseño experimental más amplio y que evalúen un rango mayor de concentraciones podrían proporcionar una visión más completa de la interacción entre estos dos compuestos sobre la germinación y crecimiento de plántula de la lenteja.

Contribución de los autores

CIQG, Ensayos experimentales de germinación, recolección de datos y escritura de artículo

GGN, Análisis estadístico de datos y elaboración de gráficos

ACV, Revisión bibliográfica y escritura de artículo

JSL, Apoyo en medición de tallos.

OMV, Apoyo en medición de raíces.

ACH, Redacción, análisis estadísticos, revisión bibliográfica, escritura de artículo.

Financiamiento

“No se recibió ningún patrocinio para llevar a cabo este artículo”.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Presentaciones previas

Ninguna

Referencias

1. Akhtar, N., Syakir Ishak, M. I., Bhawani, S. A., & Umar, K. (2021). Various natural and anthropogenic factors responsible for water quality degradation: A review. *Water*, 13(19), 2660.
2. Amneklev, J., Augustsson, A., Sörme, L., & Bergbäck, B. (2016). Bismuth and silver in cosmetic products: A source of environmental and resource concern?. *Journal of Industrial Ecology*, 20(1), 99-106.
3. Borah, S. J., Ram, R., Kumar, V., & Dubey, K. K. (2023). Leakage of surfactants in greywater: Environmental impact, mitigation, and their circular economy. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 110715.
4. Cai, X., & Ostroumov, S. A. (2020). Discovery of detergent toxicity using non-animal bioassay. *Simpósio Internacional de Biogeoquímica (Tiraspol, 5 al 7 de noviembre de 2020)*, 215-218.
5. Cai, X., & Ostroumov, S. A. (2021). Phytotests for assessing phytotoxicity of “Blue moon” liquid detergent: *Lens culinaris* seeds. *Issues in Biological Sciences and Pharmaceutical Research*.
6. Cokkizgin, A. & Cokkizgin, H. (2010). Effects of lead (PbCl₂) stress on germination of lentil (*Lens culinaris* Medic.) lines. *African Journal of Biotechnology*, 9(50), 8608-8612.
7. da Silva, L. M., & da Silva, F. J. (2023). Toxic Effects Promoted by a Commercial Detergent on the Germination and Initial Development of Cucumber Seedlings (*Cucumis sativus* L.). *Ecotoxicology and Environmental Contamination*, 18(2), 3-9.
8. De Silva, Y. S. K., Rajagopalan, U. M., Kadono, H., & Li, D. (2023). The synergy of microplastics with the heavy metal zinc has resulted in reducing the toxic effects of zinc on lentil (*Lens culinaris*) seed germination and seedling growth. *Heliyon*, 9(11).
9. Georgescu, A. M., Ursachi C., Ungureanu, C. V., & Răducanu, D. (2023). Phytotoxic effects of a common laundry detergent on lettuce (*Lactuca sativa* L.) using the mathematical modelling of factorial type. *Scientific Studies & Research. Series Biology/Studii si Cercetari Stiintifice. Seria Biologie*, 32(1).
10. Gorgich, M., Mata, T. M., Martins, A., Caetano, N. S., & Formigo, N. (2020). Application of domestic greywater for irrigating agricultural products: A brief study. *Energy Reports*, 6, 811-817.
11. Gupta, N., & Sekhri, S. (2014). Impact of Laundry Detergents on Environment-A Review. *Journal of Asian Regional Association for Home Economics*, 21(4).
12. Heidari, H. (2012). Effect of irrigation by contaminated water with cloth detergent on plant growth and seed germination traits of maize (*Zea mays*). *Life Sci J*, 9(4), 1587-1590.
13. Heidari, H. (2013). Effect of irrigation with contaminated water by cloth detergent on seed germination traits and early growth of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Notulae Scientia Biologicae*, 5(1), 86-89.
14. Hernández-Baranda, Y., Echevarría-Machado, I., Rodríguez-Hernández, P., & Estrada-Medina, H. (2023). Effect of detergents on the germination and initial growth of habanero pepper (*Capsicum chinense* Jacq.) plants. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 17(3).
15. Huang, Y., Han, R., Qi, J., Duan, H., Chen, C., Lu, X., & Li, N. (2022). Health risks of industrial wastewater heavy metals based on improved grey water footprint model. *Journal of Cleaner Production*, 377, 134472.

16. Janas, K. M., Zielińska-Tomaszewska, J., Rybaczek, D., Maszewski, J., Posmyk, M. M., Amarowicz, R., & Kosińska, A. (2010). The impact of copper ions on growth, lipid peroxidation, and phenolic compound accumulation and localization in lentil (*Lens culinaris* Medic.) seedlings. *Journal of Plant Physiology*, 167(4), 270-276.
17. Jena, G., Dutta, K., & Daverey, A. (2023). Surfactants in water and wastewater (greywater): environmental toxicity and treatment options. *Chemosphere*, 341, 140082.
18. Liu, J., Xue, J., Yuan, D., Wei, X., & Su, H. (2020). Surfactant washing to remove heavy metal pollution in soil: A review. *Recent Innovations in Chemical Engineering*, 13(1), 3-16.
19. Mousavi, S. A., & Khodadoost, F. (2019). Effects of detergents on natural ecosystems and wastewater treatment processes: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 26439-26448.
20. Nagata, T., & Kimoto, S. (2020). Growth inhibition and root damage of bismuth in *Solanum lycopersicum*. *SCIRESA J. Biol*, 54, 72-86.
21. Omouri, Z., Hawari, J., Fournier, M., & Robidoux, P. Y. (2017). Acute toxicity of bismuth to the earthworm *Eisenia andrei*. *International Journal of Ecotoxicology and Ecobiology*, 2(3), 125-133.
22. Omouri, Z., Hawari, J., Fournier, M., & Robidoux, P. (2019). Phytotoxicity of bismuth nitrate and bismuth citrate on germination and growth of *Lolium perenne* exposed on filter paper and on artificially contaminated soil. *Journal of Soil Science & Plant Health*, 3(1).
23. Passatore, L., Pietrini, F., Carloni, S., Massimi, L., Giusto, C., Zacchini, M., & Iannilli, V. (2022). Morpho-physiological and molecular responses of *Lepidium sativum* L. seeds induced by bismuth exposure. *Science of the Total Environment*, 831, 154896.
24. Pierattini, E. C., Francini, A., Raffaelli, A., & Sebastiani, L. (2018). Surfactant and heavy metal interaction in poplar: a focus on SDS and Zn uptake. *Tree physiology*, 38(1), 109-118.
25. Singh, D., Dikshit, H. K., & Singh, R. (2012). Variation of aluminium tolerance in lentil (*Lens culinaris* Medik.). *Plant breeding*, 131(6), 751-761.
26. Zacchini, M. (2024). Bismuth interaction with plants: uptake and transport, toxic effects, tolerance mechanisms-a review. *Chemosphere*, 142414.
27. Zhang, B., Peng, H., Deng, Z., & Tsao, R. (2018). Phytochemicals of lentil (*Lens culinaris*) and their antioxidant and anti-inflammatory effects. *Journal of Food Bioactives*, 1, 93-103.
28. Uzma, S., Khan, S., Murad, W., Taimur, N., & Azizullah, A. (2018). Phytotoxic effects of two commonly used laundry detergents on germination, growth, and biochemical characteristics of maize (*Zea mays* L.) seedlings. *Environmental monitoring and assessment*, 190, 1-14.



ARTÍCULO ORIGINAL

Expansión urbana y presión sobre los recursos hídricos en Bacalar: Desafíos y tensiones en un destino turístico emergente

Miguel Ángel Barrera-Rojas^{1*}; Salvador Emmanuel Ramírez-Monroy²; Michelle Peñuelas-Cortéz³; Pablo Carlos David Chavira-Gurrola⁴

¹Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, División de Ciencias Políticas y Humanidades

²Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Economía

³Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Economía

⁴Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Económico Administrativas.

Recepción 25 de octubre 2024. Aceptación 26 de noviembre de 2024.

PALABRAS CLAVE

Turismo emergente;
expansión urbana;
contaminación del agua;
Políticas públicas

Resumen

Este artículo analiza los impactos de la expansión urbana acelerada y el desarrollo turístico en Bacalar, Quintana Roo, sobre los recursos hídricos de la región. A través de un enfoque documental y un análisis de caso, se evalúan las principales políticas públicas y su efectividad en la gestión ambiental, con énfasis en el uso de fosas sépticas y su contribución a la contaminación de los mantos freáticos. Los resultados muestran que el crecimiento desorganizado, acompañado por una deficiente infraestructura de saneamiento, ha generado una presión significativa sobre la Laguna de Bacalar, afectando tanto la salud pública como el bienestar socioeconómico de la población local. Asimismo, se identifican importantes brechas en la implementación de normativas ambientales y en la coordinación interinstitucional. El estudio concluye con una serie de recomendaciones para mejorar la gobernanza de los recursos hídricos en Bacalar, proponiendo estrategias sostenibles que integren a la comunidad local en la toma de decisiones y que promuevan un desarrollo turístico responsable.

KEYWORDS

Emergent tourism; Urban expansion; water pollution; Public policies

Abstract

This article analyzes the impacts of accelerated urban expansion and tourism development in Bacalar, Quintana Roo, on the region's water resources. Through a documentary approach and a case study analysis, the main public policies and their effectiveness in environmental management are evaluated, with a focus on the use of septic tanks and their contribution to groundwater contamination. The results show that disorganized growth, accompanied by inadequate sanitation infrastructure, has placed significant pressure on the Bacalar lagoon, affecting both public health and the socioeconomic well-being of the local population. Additionally, significant gaps in the implementation of environmental regulations and inter-institutional coordination are identified. The study concludes with a series of recommendations to improve water resource governance in Bacalar, proposing sustainable strategies that integrate the local community into decision-making and promote responsible tourism development.

Introducción

El auge turístico experimentado por Bacalar (Figura 1) tras su inclusión en el programa de Pueblos Mágicos ha generado un impacto significativo en diversos aspectos sociales y de bienestar en la región¹. En primer lugar, el crecimiento económico asociado a la actividad turística ha generado oportunidades de empleo en sectores como la hotelería, la gastronomía y los servicios turísticos, lo que ha contribuido a mejorar las condiciones de vida de algunos residentes locales y a reducir los niveles de desempleo en la región².

En sentido de lo anterior, será conveniente señalar al hablar de turismo emergente se hace referencia al desarrollo y consolidación de destinos que hasta hace poco no eran prominentes dentro de las rutas turísticas convencionales. En el caso de Quintana Roo, los destinos convencionales son Cancún, Playa del Carmen, Cozumel e Isla Mujeres.

El turismo emergente está ligado a la búsqueda de experiencias más auténticas y sostenibles por parte de los visitantes, lo que genera dinámicas de crecimiento económico y social en comunidades receptoras con alta riqueza cultural y natural (1), pero históricamente marginadas del turismo masivo. En Quintana Roo, localidades como Bacalar, Tulum y Puerto Morelos son ejemplos significativos de este fenómeno. Bacalar, con su emblemática Laguna de los Siete Colores, ha experimentado un aumento notable en el flujo turístico gracias a su combinación de belleza natural, tranquilidad y esfuerzos por conservar su patrimonio ecológico (Canto et al., 2017). Tulum, que combina ruinas mayas y playas, ha transitado de ser un pueblo pequeño a un destino internacional, aunque enfrenta retos derivados del rápido desarrollo que impactan su sostenibilidad (Hernández-Perales et al., 2018). Por su parte, Puerto Morelos destaca por su cercanía al Arrecife Mesoamericano, atrayendo a turistas interesados en actividades más íntimas y ecológicas, como el buceo y el turismo comunitario (Hernández & Barquet, 2020). Estos casos ilustran cómo el turismo emergente, si bien puede detonar oportunidades económicas, requiere de planeación estratégica para garantizar su sostenibilidad y la conservación de su esencia local.

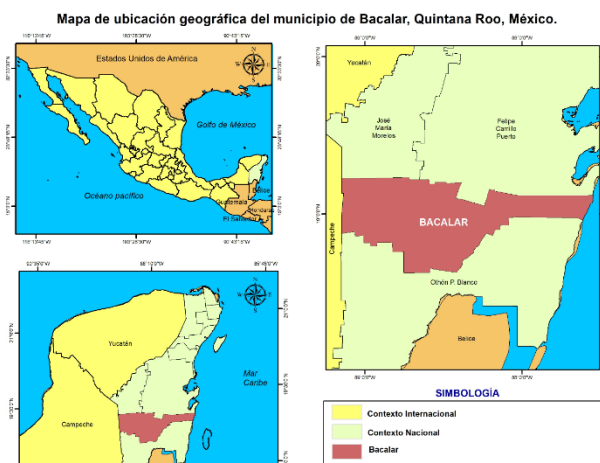


Figura 1. Ubicación de Bacalar, Quintana Roo

Además, el aumento en la llegada tanto de inmigrantes jubilados como inmigrantes ilegales estadounidenses, conocidos como "ex pats", ha generado una dinámica demográfica particular en Quintana Roo, pero sobre todo en ciudades como Puerto Morelos, Tulum y Bacalar³. Estos nuevos residentes aportan recursos económicos adicionales a la comunidad a través de la inversión en bienes raíces, servicios y actividades recreativas, lo que en teoría podría contribuir al desarrollo económico local, sin embargo, solo han generado distorsión en el mercado de vivienda y mayor presión en la demanda de servicios públicos y privados⁴.

Así, el crecimiento acelerado experimentado por Bacalar ha ejercido presión sobre las infraestructuras y los servicios públicos existentes², lo que ha llevado a deficiencias en la prestación de dichos servicios y ha generado tensiones entre diferentes grupos de la población^{5, 6}. Este fenómeno, se debe principalmente a un desajuste entre la rápida expansión demográfica y el ritmo de desarrollo de la infraestructura básica⁷, como el suministro de agua potable, la distribución de energía eléctrica, el transporte público y la atención médica,

especialmente en contextos donde la mancha urbana se expandió hacia zonas donde no había una base de población ruralizada, como el caso de Bacalar, que se expandió hacia la selva.

En el caso del agua, este recurso genera tensión y preocupación entre la población local, autoridades y turistas en el sentido de que la fuente de agua potable de la localidad la constituyen los cuerpos lacustres aledaños a la Laguna de Bacalar, y de acuerdo con algunos reportes^{8, 9, 10, 11, 12} como los de los niveles de contaminación que ya se registran en la laguna de Bacalar resultan preocupantes. En ese sentido, la preocupación va en aumento puesto que existe una mayor demanda del recurso hídrico, pero, este, comienza a tener indicios de no ser apropiado para la actividad humana y el consumo.

Así, el objetivo del trabajo es analizar los impactos de la expansión urbana acelerada y el desarrollo turístico en Bacalar sobre los recursos hídricos, con el fin de evaluar las políticas públicas y la gestión ambiental existente, y proponer estrategias sostenibles para mitigar la presión sobre los mantos freáticos y promover el desarrollo equilibrado en la región.

Material y métodos

El presente estudio se enmarca en un enfoque documental y un análisis de caso, orientado a examinar el impacto de la expansión urbana y el desarrollo turístico en Bacalar sobre los recursos hídricos, así como la efectividad de las políticas públicas vinculadas a la gestión ambiental. Se trata de un análisis cualitativo, en el que se recurre a fuentes secundarias para describir el contexto y proponer estrategias de solución. Las fuentes de información empleadas incluyen bases de datos oficiales, como el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), además de informes de instituciones relevantes en el ámbito ambiental y literatura académica especializada. Asimismo, se consultaron marcos normativos clave, tales como la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) y el Programa de Ordenamiento Ecológico Local de Bacalar.

El criterio de selección de fuentes se basó en la pertinencia temporal (2010-2024), con el fin de garantizar que los datos reflejaran el desarrollo actual de Bacalar y la dinámica reciente de su expansión urbana. También se priorizaron estudios geográficamente relevantes, focalizados en la región de Quintana Roo, complementados con ejemplos comparados de otros destinos turísticos en contextos similares. En cuanto a la procedencia de las fuentes, se seleccionaron documentos de instituciones reconocidas y publicaciones académicas de expertos en la materia, asegurando así la fiabilidad y validez de los datos utilizados.

El análisis se estructuró en tres categorías principales: (1) expansión urbana y presión sobre los recursos hídricos, (2) impactos sobre la salud pública y el bienestar socioeconómico, y (3) evaluación de las políticas públicas vigentes. Este esquema permitió organizar y sistematizar la información, con un enfoque crítico. Además, el trabajo incluyó un análisis comparado, mediante la revisión de experiencias exitosas de gestión de recursos hídricos en otros destinos turísticos, que sirven como referencia para proponer soluciones viables para Bacalar.

En el marco del análisis de políticas públicas, se evaluó la efectividad de las normativas ambientales vigentes bajo los criterios de eficiencia, equidad y sostenibilidad. Este análisis reveló importantes brechas en la implementación y coordinación de las políticas existentes, así como en la

capacidad institucional para gestionar adecuadamente el crecimiento urbano y sus impactos en los recursos hídricos. Si bien el estudio se sustenta en un sólido cuerpo documental, es necesario señalar que una de las limitaciones del presente trabajo es la falta de datos cualitativos obtenidos directamente de actores clave locales, así como la ausencia de un análisis longitudinal más detallado sobre la evolución del problema a lo largo del tiempo.

Resultados

En lo que refiere a la categoría expansión urbana y presión sobre los recursos hídricos, se tiene que el crecimiento exponencial de Bacalar desde su inclusión en el programa de Pueblos Mágicos en 2006 ha generado una transformación radical en su estructura urbana y demográfica. Este proceso de urbanización acelerada ha estado principalmente impulsado por el turismo, el cual se ha convertido en el motor económico de la región, atrayendo no solo a visitantes nacionales e internacionales, sino también a inversionistas en el sector inmobiliario, lo que ha provocado una rápida expansión de la mancha urbana hacia áreas previamente no urbanizadas. Según datos oficiales¹³, la población de Bacalar pasó de 9,833 habitantes en 2005 a 41,754 en 2020, lo que refleja un aumento significativo en un corto período de tiempo. Este crecimiento demográfico ha estado acompañado por un incremento del 800% en el número de turistas entre 2008 y 2022, según reportes de la Secretaría de Turismo de Quintana Roo.

Esta expansión acelerada ha generado una presión significativa sobre los recursos hídricos, principalmente debido a la falta de infraestructura adecuada para manejar las demandas de agua potable y el tratamiento de aguas residuales. Un alto porcentaje de los hogares y establecimientos turísticos dependen de fosas sépticas, las cuales, debido a su deficiente instalación y mantenimiento, han provocado filtraciones que contaminan los mantos freáticos, principales fuentes de abastecimiento de agua para la región. De acuerdo con el Censo de Población y Vivienda¹³, solo el 6.97% de los hogares en Bacalar están conectados a la red pública de drenaje, mientras que el 92.98% utilizan fosas sépticas, lo que incrementa el riesgo de contaminación del acuífero subterráneo.

Además, el tipo de suelo kárstico predominante en la península de Yucatán, caracterizado por su alta permeabilidad, facilita la rápida infiltración de contaminantes al subsuelo. Estudios previos^{14, 15} han destacado que la falta de una capa de filtración natural en este tipo de suelo agrava el problema, permitiendo que los contaminantes asociados con las fosas sépticas, como bacterias patógenas, nitratos y fosfatos, lleguen a los mantos freáticos sin el tratamiento adecuado. Esta situación representa una amenaza directa para la calidad del agua utilizada tanto por la población local como por los turistas, afectando así la sostenibilidad a largo plazo del principal atractivo natural de Bacalar: la Laguna de los Siete Colores.

Un efecto directo de esta presión es la contaminación creciente de la Laguna de Bacalar, como lo han reportado organizaciones locales¹⁶, quienes señalan que se ha detectado una alta presencia de contaminantes bacteriológicos, como *E. coli*, en zonas turísticas de la laguna, lo que no solo pone en riesgo la salud pública, sino que también afecta la imagen turística de Bacalar. La falta de regulación y supervisión efectiva en la expansión urbana ha permitido que este proceso se desarrolle sin la infraestructura necesaria para el tratamiento adecuado de aguas residuales, exacerbando la contaminación de los cuerpos de agua cercanos.

Otro aspecto clave es el aumento de la demanda de agua potable, que ha superado la capacidad de las fuentes locales de abastecimiento. A medida que más complejos turísticos y residenciales se construyen, la presión sobre los recursos

hídricos aumenta, generando conflictos entre el uso turístico y residencial del agua. De hecho, el uso inadecuado y excesivo de los recursos hídricos para fines turísticos ha comenzado a comprometer la sostenibilidad del suministro de agua para la población local, exacerbando las tensiones entre residentes, inversionistas y autoridades locales.

Ahora bien, en lo que refiere a los impactos sobre la salud pública y el bienestar socioeconómico en Bacalar, se tiene que el rápido crecimiento urbano y turístico de Bacalar ha generado impactos significativos en la salud pública y el bienestar socioeconómico de la población local, en gran medida debido a la contaminación de los mantos freáticos y la insuficiencia en la infraestructura de servicios básicos. La utilización masiva de fosas sépticas mal diseñadas y con precario mantenimiento ha provocado la infiltración de contaminantes en las reservas de agua subterránea, lo que compromete tanto la calidad del agua potable como el entorno ecológico de la región. Estudios en materia de salud y ambiente^{17, 18} han demostrado que estas fosas sépticas no solo son incapaces de tratar adecuadamente las aguas residuales, sino que sus deficiencias estructurales permiten la filtración de bacterias, virus y patógenos como *E. coli*, así como compuestos químicos que pueden afectar la salud humana.

Así, este fenómeno tiene una repercusión directa en la salud pública. La exposición a aguas contaminadas y el consumo de agua potable extraída de mantos freáticos contaminados aumenta el riesgo de enfermedades gastrointestinales, infecciones bacterianas y parasitarias entre la población local y los turistas. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), el acceso a agua no segura es una de las principales causas de enfermedades infecciosas, lo que es particularmente alarmante en Bacalar, dada la alta dependencia del recurso hídrico subterráneo para el consumo humano y la creciente población flotante debido al turismo. De hecho, de acuerdo con información oficial del gobierno del estado de Quintana Roo¹⁹, en el periodo 2016-2024 se ha registrado un importante incremento en el número de enfermedades infecciosas y parasitarias del sistema digestivo. Por ejemplo, se tiene un incremento sostenido en el número de casos de Amebiasis e infecciones intestinales.

Los sectores más vulnerables de la población, como niños, mujeres embarazadas y personas mayores, son quienes enfrentan mayores riesgos ante este escenario. Las consecuencias económicas derivadas de la falta de acceso a agua potable de calidad también son notables, ya que las familias más afectadas se ven obligadas a gastar recursos adicionales en soluciones alternativas, como la compra de agua embotellada o en el tratamiento de enfermedades relacionadas con el agua contaminada. Esto genera una carga económica adicional para los hogares locales, que en muchos casos dependen de empleos mal remunerados en el sector turístico.

En sentido de lo anterior, convendrá señalar que, el problema con la expansión urbana de Bacalar encuentra su génesis en dos puntos temporales²⁰: el año 2006 cuando recibió la denominación de Pueblo Mágico y en 2011 cuando se separó de Othón P. Blanco para erigirse como municipio. El auge turístico experimentado por Bacalar tras su inclusión en el programa de Pueblos Mágicos ha generado un impacto significativo en diversos aspectos sociales y de bienestar en la región, pues como se señaló antes, el aumento en la demanda de servicios públicos básicos, como agua potable, electricidad, transporte y salud, ha sobrepasado la capacidad de las infraestructuras locales, generando deficiencias en su prestación y tensiones entre los diferentes sectores de la población². Además, la presión sobre los recursos naturales, especialmente en lo que respecta al suministro de agua, ha

destacado la necesidad de una gestión más eficiente y sostenible de los recursos hídricos en la región.

En este sentido, uno de los desafíos más urgentes que enfrenta Bacalar y la mayoría de las ciudades de la Península de Yucatán está relacionado con la gestión de los desechos humanos y su impacto en la calidad del agua subterránea²¹. Lo anterior refiere a que la mayoría de las construcciones, tanto residenciales como turísticas, dependen de fosas sépticas para el tratamiento de aguas residuales debido a la dificultad de construir sistemas de drenaje urbano en la región por el tipo de suelo²². Esta situación además de ser un reto en materia de servicios públicos representa un peligro pues la construcción deficiente y el mantenimiento inadecuado de estas instalaciones aumentan el riesgo de contaminación de los mantos freáticos con nutrientes, microorganismos patógenos y otros contaminantes asociados con la actividad humana²³.

De acuerdo con datos oficiales¹³, el estado de Quintana Roo tiene un total de 574,124 viviendas habitadas. De ellas, un total de 11,138 corresponden al municipio de Bacalar, de estas, el 92% dispone algún tipo de sistema de desecho de excretas, sin embargo, el problema radica en que solo el 6.97% de los hogares están conectados a la red pública de drenaje, mientras que el 92.98% tiene una fosa séptica y 0.05% usan una grieta o barranca para el desecho de excretas. De hecho, esta situación de desecho de excretas en fosas, como se explicó antes y se muestra en la Figura 2, es una constatación en el estado de Quintana Roo, especialmente en los municipios no costeros.

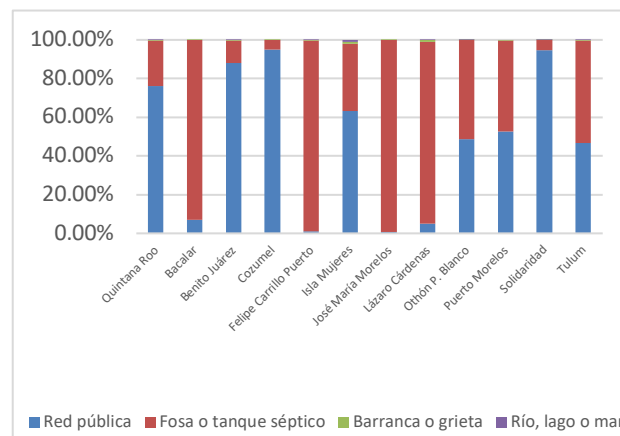


Figura 2. Sistema de excretas en hogares de Quintana Roo y sus municipios, 2020

En cuanto a los impactos socioeconómicos, la contaminación de los recursos hídricos también ha afectado a dos sectores económicos clave en Bacalar: el sector agropecuario y el sector turístico. En el caso del sector agropecuario, que representa una porción significativa de la población ocupada en Bacalar, la calidad del agua es fundamental para el desarrollo de actividades agrícolas, ganaderas y apícolas. La disminución en la calidad del agua ha afectado la productividad agrícola y la rentabilidad de las explotaciones ganaderas, ya que los productores no pueden acceder a recursos hídricos limpios para el riego y la alimentación animal. De hecho, hay estudios²⁴ que señalan que los agricultores locales ya han comenzado a experimentar descensos en la producción debido a la contaminación de los mantos freáticos, lo que compromete su subsistencia económica y afecta la seguridad alimentaria en la región.

En el sector turístico, el cual constituye el principal motor económico de Bacalar, la contaminación de la Laguna de los Siete Colores y otros cuerpos de agua ha generado una creciente preocupación entre los operadores turísticos y los visitantes. La

percepción de contaminación en áreas emblemáticas de la laguna ha comenzado a afectar la afluencia turística, lo que podría tener repercusiones negativas en la economía local a largo plazo. Por ejemplo, se tiene que, según informes de colectivos ambientalistas¹⁶, varios puntos turísticos, como el muelle de la calle 24 y la zona de Cocalitos, han sido identificados como áreas con altos niveles de contaminación bacteriana, lo que pone en riesgo tanto la salud de los turistas como la reputación del destino.

Además, la dependencia económica de Bacalar del turismo ha provocado una creciente desigualdad socioeconómica. Si bien la expansión del sector turístico ha generado empleos, estos son en su mayoría empleos temporales, mal remunerados o precarios, lo que no ha permitido mejorar sustancialmente las condiciones de vida de la población local. Asimismo, la afluencia de inversión extranjera en el sector inmobiliario ha generado incrementos en los precios de la tierra y la vivienda, lo que a su vez ha llevado a una exclusión económica de los residentes locales, quienes enfrentan dificultades para acceder a propiedades o mantener su calidad de vida en un entorno donde los costos de vida han aumentado drásticamente.

Finalmente, en el rubro de Evaluación de las políticas pública vigentes, se tienen importantes brechas en la planificación y la implementación de medidas regulatorias, lo que ha contribuido a la crisis ambiental y socioeconómica que enfrenta la región. A pesar del creciente reconocimiento de la importancia de la sostenibilidad ambiental, las normativas actuales han demostrado ser insuficientes para mitigar los impactos negativos derivados de la expansión urbana y el desarrollo turístico acelerado.

Una de las principales limitaciones observadas es la falta de coordinación interinstitucional entre los diferentes niveles de gobierno (municipal, estatal y federal), es decir, problemas de transversalidad vertical. La administración municipal de Bacalar, creada tras la conversión del área en municipio en 2011, carece de la capacidad técnica y financiera para gestionar de manera efectiva el rápido crecimiento urbano. Esta carencia se refleja en la limitada infraestructura de saneamiento y en la ineficiencia para supervisar y regular el uso de fosas sépticas, las cuales representan una de las principales fuentes de contaminación de los mantos freáticos. Aunque el Programa de Ordenamiento Ecológico territorial de la región de la Laguna de Bacalar²⁵, el Programa de Ordenamiento Ecológico Local de Bacalar²⁶, el Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Bacalar²⁷ y el Decreto de Área Natural Protegida de Bacalar²⁸ incluyen disposiciones sobre la protección de los recursos hídricos y el desarrollo urbano sostenible, su implementación ha sido débil y carece de un monitoreo efectivo. Las revisiones periódicas y la actualización del POET no han seguido un calendario riguroso, lo que ha permitido la proliferación de desarrollos inmobiliarios que no cumplen con los estándares ambientales establecidos.

A nivel estatal y federal, la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) y la Ley de Aguas Nacionales proporcionan un marco regulatorio sólido para la protección de los recursos hídricos, pero la falta de aplicación local de estas normativas en Bacalar ha limitado su impacto. En la literatura^{28, 29} se señala que, aunque existen normativas que regulan el uso del agua y los desechos, su implementación se ve comprometida por la falta de fiscalización y la escasez de recursos asignados a la supervisión y el cumplimiento. Por ejemplo, los mecanismos de monitoreo de la calidad del agua en la Laguna de Bacalar son esporádicos y no cuentan con un protocolo riguroso para la evaluación continua de los niveles de contaminación.

Otro aspecto crítico es la ausencia de un enfoque participativo en la formulación de políticas. Las comunidades locales, que dependen de los recursos hídricos para su subsistencia, han sido en gran medida excluidas de los procesos de toma de decisiones, lo que ha generado desconfianza en las autoridades locales y una falta de apropiación comunitaria de las normativas ambientales. Esto ha llevado a que muchos residentes no sigan las regulaciones, lo que agrava los problemas de contaminación y uso insostenible del agua. A pesar de algunos esfuerzos para involucrar a la sociedad civil, como el surgimiento de organizaciones locales como Agua Clara Ciudadanos por Bacalar, estas iniciativas no han sido integradas de manera formal en la formulación o implementación de políticas públicas. Igualmente se tiene documentado de manera hemerográfica³⁰ que el Ejido Aarón Merino, donde se ubica Bacalar, generó el Plan de Ordenamiento Ecológico Local Comunitario Participativo, sin embargo, el documento no es público, por lo que es difícil que permee en la comunidad.

En cuanto a la regulación del turismo, las políticas han priorizado el crecimiento económico sin establecer medidas efectivas para minimizar los impactos negativos sobre los recursos naturales. El enfoque económico dominante ha favorecido el desarrollo rápido de infraestructura turística sin que se implementen políticas estrictas para regular el uso del agua o tratar las aguas residuales de manera adecuada. Las empresas turísticas y los desarrolladores inmobiliarios han encontrado lagunas en la regulación que les permiten operar sin cumplir plenamente con las normativas ambientales. Esto ha llevado a que las políticas de sostenibilidad y protección ambiental se apliquen de manera fragmentada y poco efectiva. Por otro lado, las políticas públicas destinadas a promover el desarrollo urbano sostenible han sido insuficientes. La falta de una planificación adecuada ha permitido la proliferación de asentamientos urbanos que no cuentan con servicios básicos como acceso a agua potable o sistemas de drenaje adecuados. En este sentido, el Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Bacalar no ha sido revisado ni actualizado con la suficiente frecuencia para responder a las nuevas dinámicas del crecimiento poblacional y la expansión del turismo, lo que ha derivado en un crecimiento desorganizado y, en muchos casos, informal y precarizado.

Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio reflejan una clara tensión entre el crecimiento económico y la sostenibilidad ambiental, un conflicto que se enmarca en la teoría de la tragedia de los comunes³¹. La rápida expansión turística y urbana de Bacalar ha llevado a la explotación desmedida de los recursos hídricos, lo que pone en riesgo su preservación a largo plazo. La falta de regulación efectiva y de una infraestructura adecuada para el tratamiento de las aguas residuales, particularmente en lo que respecta al uso masivo de fosas sépticas, demuestra que el crecimiento no ha sido gestionado de manera sostenible. Como predice la teoría de Hardin, cuando los recursos compartidos no son regulados adecuadamente, su explotación se vuelve insostenible, generando consecuencias negativas tanto para el medio ambiente como para las comunidades que dependen de ellos.

En línea con la crítica sobre la fragilidad de los sistemas de gobernanza local en contextos de crecimiento acelerado³², los resultados muestran que el gobierno local de Bacalar carece de las capacidades técnicas y financieras necesarias para implementar políticas ambientales efectivas. El Programa de Ordenamiento Ecológico Local (POEL), a pesar de contener disposiciones claras sobre la protección de los recursos hídricos, ha demostrado ser insuficiente debido a la débil fiscalización y la falta de recursos para su aplicación. Este fenómeno refleja lo

que se describe como la "paradoja del desarrollo local": mientras más rápido crece una región, más difícil resulta para las instituciones locales mantener un control efectivo sobre los recursos y el territorio³². En el caso de Bacalar, la rápida expansión del turismo ha superado la capacidad de respuesta de las autoridades, generando una brecha significativa entre el crecimiento económico y la capacidad de gestión ambiental.

Los resultados también confirman la importancia de la gestión adaptativa de los recursos hídricos³³. En Bacalar, la falta de mecanismos de gestión adaptativa ha impedido que las autoridades locales ajusten sus políticas a la creciente presión sobre los recursos naturales. La implementación de un modelo de gobernanza que integre a las comunidades locales en los procesos de toma de decisiones es esencial para mitigar los efectos negativos del desarrollo urbano y turístico. Actualmente, las políticas públicas no han incorporado de manera significativa la participación comunitaria, lo que ha resultado en una desconexión entre las necesidades locales y las decisiones de política ambiental. La teoría de la gobernanza adaptativa resalta la necesidad de integrar a todos los actores relevantes para garantizar una gestión más equitativa y sostenible de los recursos hídricos.

El análisis de los impactos sobre la salud pública y el bienestar socioeconómico refuerza la idea de que el deterioro ambiental tiene efectos directos sobre la salud humana, particularmente en comunidades vulnerables³⁴. En Bacalar, la contaminación de los mantos freáticos ha incrementado los riesgos de enfermedades relacionadas con el agua, lo que afecta de manera desproporcionada a las comunidades locales que dependen de este recurso para su vida diaria. Los costos de la degradación ambiental no solo recaen sobre la población local en términos de salud, sino también en términos económicos, al obligar a las familias a gastar recursos adicionales en el acceso a agua potable segura y en el tratamiento de enfermedades derivadas de la contaminación. En cuanto a la inequidad socioeconómica, la expansión del turismo en Bacalar ha beneficiado principalmente a los inversores y operadores turísticos, mientras que la población local ha experimentado un incremento en el costo de vida y una exclusión progresiva del mercado inmobiliario. Esto está en consonancia con las teorías que versan sobre el "derecho a la ciudad"³⁵, donde la privatización y mercantilización del espacio urbano desplazan a las comunidades locales en beneficio de actores externos. La expansión del sector turístico ha exacerbado las desigualdades en Bacalar, generando un proceso de gentrificación que ha aumentado los precios del suelo y de la vivienda, excluyendo a los residentes originales de los beneficios del crecimiento económico.

Finalmente, el análisis de las políticas públicas y su implementación en Bacalar subraya la necesidad de adoptar un enfoque más holístico para abordar el desarrollo urbano y la sostenibilidad. De hecho, los problemas de gobernanza ambiental requieren soluciones locales que se adapten a las características específicas del recurso y de la comunidad^{36, 37}. En el caso de Bacalar, esto implica la necesidad de fortalecer la capacidad de las autoridades locales para implementar políticas efectivas, promover la participación comunitaria y garantizar que el crecimiento económico esté alineado con la protección de los recursos hídricos. La falta de coordinación interinstitucional y el escaso cumplimiento de las normativas vigentes demuestran que las políticas públicas actuales no han logrado abordar de manera integral los desafíos derivados del crecimiento urbano.

Conclusiones

Este estudio ha evidenciado los profundos impactos que la expansión urbana desorganizada y el rápido desarrollo turístico han generado sobre los recursos hídricos de Bacalar. A través de un análisis documental y de caso, se han identificado deficiencias significativas en la infraestructura de saneamiento, especialmente en el uso generalizado de fosas sépticas, que han contribuido a la contaminación de los mantos freáticos. Esta situación ha agravado la vulnerabilidad de los recursos hídricos, afectando no solo la calidad del agua, sino también la salud pública y el bienestar socioeconómico de la población local.

Uno de los hallazgos más importantes es la incapacidad de las políticas públicas actuales para gestionar adecuadamente los desafíos ambientales que enfrenta Bacalar. Las normativas existentes, aunque adecuadas en el papel, no han sido implementadas de manera efectiva debido a la falta de coordinación interinstitucional y a la escasez de recursos técnicos y financieros. La desconexión entre las autoridades locales y la comunidad también ha sido un obstáculo significativo para la gobernanza ambiental.

Además, el estudio ha puesto de manifiesto cómo el crecimiento económico basado en el turismo ha exacerbado las desigualdades socioeconómicas en Bacalar. La afluencia de inversión extranjera en el sector inmobiliario ha elevado los costos de vida, generando una exclusión progresiva de la población local del acceso a la vivienda y a otros beneficios económicos derivados del crecimiento turístico.

Se concluye pues, que los desafíos que enfrenta Bacalar en términos de la sostenibilidad de sus recursos hídricos y la equidad en el desarrollo urbano son complejos y requieren soluciones integrales. La implementación de políticas públicas más efectivas, que incluyan una participación comunitaria activa, es esencial para garantizar un desarrollo equilibrado que preserve los recursos naturales y promueva el bienestar de la población local.

En sentido de lo anterior se propone una serie de políticas públicas orientadas hacia:

1. Implementación de un Plan Integral de Saneamiento Hídrico. Esto es, que resultará fundamental desarrollar e implementar un plan integral para la gestión del saneamiento que contemple la modernización y expansión de la infraestructura de drenaje en Bacalar. Este plan debe priorizar la conexión de los hogares y negocios a una red pública de saneamiento, reduciendo la dependencia de las fosas sépticas, especialmente en áreas de alta densidad turística y urbana. Este plan debe contemplar un diagnóstico completo y mapeo de la infraestructura actual de drenaje (ámbito municipal); desarrollo de una red de drenaje y tratamiento de aguas residuales (ámbito municipal); creación de un departamento o subdirección responsable del monitoreo, regulación y sanción de fosas sépticas (ámbito municipal); campañas de sensibilización (ámbito estatal); monitoreo continuo de la calidad del agua (ámbito estatal).
2. Fortalecimiento de la Gobernanza Local. Esto es, se debe fortalecer la capacidad institucional del gobierno municipal para gestionar los recursos hídricos de manera eficiente. Esto incluye la creación de una entidad reguladora con facultades técnicas, financieras y punitivas para supervisar la implementación de normativas ambientales y coordinar los esfuerzos entre los distintos niveles de gobierno (municipal, estatal y federal).
3. Creación de un Sistema de Monitoreo de la Calidad del Agua. Dado que actualmente la mayoría de los hogares y

establecimientos en Bacalar dependen de fosas sépticas para el tratamiento de aguas residuales, es esencial regular y monitorear su construcción, uso y mantenimiento. Las fosas sépticas mal diseñadas o con mantenimiento deficiente representan un riesgo significativo para los mantos freáticos, dado que el suelo kárstico característico de la región permite una rápida infiltración de contaminantes. La regulación y el monitoreo efectivos de las fosas sépticas son, por lo tanto, una medida crucial hasta que se pueda implementar la red de saneamiento.

Contribución de los autores

MABR, diseño del trabajo, análisis de políticas
SERM, revisión teórica, revisión documental
MPC, revisión teórica, revisión documental
PCDCG, revisión documental, mapa

Financiamiento

Financiamiento por parte la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Presentaciones previas

Ninguna

Referencias

- Cánoves, G. & Blanco, A. (2011) Turismo religioso en España: ¿la gallina de los huevos de oro? Una vieja tradición, versus un turismo emergente. *Cuadernos de Turismo* (27), 115-131 <https://revistas.um.es/turismo/article/view/139791>
- Rosado, Á., & Medina, G. (2014). Ciclo de vida turístico de bacalar, pueblo mágico, Quintana Roo. *Teoría y Praxis*(15), 96-120.
- Campos, B. (2017). La agenda de competitividad de un destino turístico: el pueblo mágico de Bacalar (Quintana Roo, México). En M. Nel-Lo, & A. Font, ANUDAR RED. *Temas pendientes y nuevas oportunidades de cooperación en turismo* (págs. 11-44). Cancún: UQROO - UNICARIBE.
- secretaría de Gobernación. (2022). Diagnóstico de la movilidad humana en Quintana Roo. México: SEGOB.
- Goss, D. (2018). "it's like going back in time": How white retirees use expatriation to reclaim white dominance. *Sociological Perspectives*, 62(04), 1-16.
- Maldonado, J. (3 de mayo de 2018). Servicios insuficientes ponen en riesgo de colapso a Bacalar. *La Jornada Maya*. Obtenido de <https://www.lajornadamaya.mx/quintanaroo/102961/servicios-insuficientes-ponen-en-riesgo-de-colapso-a-bacalar>
- Martín, E. (11 de octubre de 2018). Falta servicios impide consolidación turística de Bacalar. *Diario La Verdad*. Obtenido de <https://laverdadnoticias.com/turismo/Falta-servicios-impide-consolidacion-turistica-de-Bacalar-20181011-0077.html>
- Bazant, J. (2008). Procesos de expansión y consolidación urbana de bajos ingresos en las periferias. *Bitácora Urbano Territorial*, 13(2), 117-132.
- Animal Político. (7 de julio de 2020). Contaminación provoca que laguna de Bacalar comience a perder tonalidades. *Animal Político*. Obtenido de <https://animalpolitico.com/2020/07/contaminacion-laguna-bacalar-perdida-tonalidades>
- Castillo, C. (26 de septiembre de 2022). Bacalar en el abandono: ciudadanos denuncian falta de agua y luz. *Novedades Quintana Roo*. Obtenido de <https://sipse.com/novedades/bacalar-abandono-ciudadanos-denuncian-falta-agua-luz-433809.html>
- Medina, A., Jiménez, A., Gutiérrez, M., & Lizardi, M. (2014). Hydrocarbon pollution studies of underwater skinholes along Quintana Roo as a function of tourism development in the Mexican Caribbean. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* (13), 509-516.
- Saavedra, D. (2020). Laguna de Bacalar. Pierde sus siete colores el arrecife bacteriano de agua dulce más grande del mundo: estudio de Luisa Falcón de Ecología. *Gaceta UNAM*. Obtenido de <https://www.gaceta.unam.mx/grave-deterioro-de-la-laguna-de-bacalar/>
- Nahuat, S., Cervantes, G., Chan, C., & Batún, A. (2023). Evaluación de la calidad del agua en la Laguna de siete colores, Bacalar, Quintana Roo. En F. Bautista, *El Karst de México* (págs. 55-70). México: Asociación Mexicana de Estudios del Karst.
- INEGI. (2021). Censo de Población y Vivienda 2020. Obtenido de https://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/consulta/general_ver4/MDXQueryDatos.asp?Regreso&c=
- Granel, E., & Galez, L. (2002). Deterioro de la calidad de agua subterránea por el desarrollo poblacional: Cancún, Quintana Roo. *Ingeniería*, 6(3), 41-53.
- Estrada, H., Jiménez, J., Álvarez, O., & Barrientos, R. (2020). El karst de Yucatán: su origen, morfología y biología. *Acta Universitaria*, 29.
- gua Clara Ciudadanos por Bacalar. (2021). Tarjeta de Reporte de laguna Bacalar. México: GIZ. Obtenido de https://www.aguaclara-por-bacalar.org/_files/ugd/9a6bc4_324dfbf413cc4780a3ac4cb65aa16d94.pdf
- González, R., Sánchez, I., Cervantes, A., & Osorio, J. (2017). Calidad de agua en el acuífero de Puerto Morelos, Quintana Roo, México. *Teoría y Praxis*. 25(2), 69-89 <http://www.teoriaypraxis.uqroo.mx/doctos/numero25/Gonzalez-et-al.pdf>
- González, R., Sánchez, I., Coronado, V., & Frías, J. (s.f.). IX-035 Contaminación del acuífero cárstico de Puerto Morelos, México. *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. https://abes-dn.org.br/anais-eletronicos/21_Download/TrabalhosCompletosPDF/IX-035.pdf
- Servicios Estatales de Salud (2024). Boletines epidemiológicos. <https://sesa.qroo.gob.mx/index.php/subdireccion-de-vigilancia-epidemiologica/>
- Rojas, L., & Calderón, J. (2023). Etapas del proceso de urbanización en la ciudad de Bacalar, Quintana Roo (México). *Quivera*, 25(1), 5-19.
- Chávez, M. (2021). El agua en la Península de Yucatán, un recurso con alta vulnerabilidad. *Ambiente PAI*, 4(8), 1-4.

- 23 SEMARNAT. (2015). Suelos. México: SEMARNAT. Obtenido de https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_12/pdf/Cap3_suelos.pdf
- 24 World Health Organization. (2022). Compendium of WHO and other UN guidance on health and environment. 22 Update. Ginebra: WHO.
- 25 Canul, R. (2023). Agroindustria, turistificación y Tren Maya en Bacalar: afectación y la resistencia colectiva. Disponible en <https://www.zonadocs.mx/2023/09/28/agroindustria-turistificacion-y-tren-maya-en-bacalar-afectacion-y-la-resistencia-colectiva/>
- 26 Decreto por el que se aprueba el Programa de Ordenamiento Ecológico Local del Municipio de Bacalar, Quintana Roo. (2016). Recuperado de http://bitacora-ambiental.semaqroo.gob.mx/images/decretos/decreto_poet_bacalar.pdf
- 27 Congreso del Estado de Quintana Roo. (2016). Decreto número 387 por el que se aprueba el Programa de Ordenamiento Ecológico Local de Bacalar, Quintana Roo. Recuperado de http://documentos.congresoqroo.gob.mx/historial/14_legislatura/decretos/3anio/2PE/dec387/11420160126387.pdf
- 28 SEDETUS (2016). Programa de Desarrollo Urbano del Centro de población de Bacalar. Chetumal, SEDETUS
- 29 Congreso del Estado de Quintana Roo. (2011). Decreto mediante el cual se declara Área Natural Protegida la región conocida como Parque Laguna de Bacalar con la categoría de Parque Ecológico Estatal. Recuperado de https://conahcyt.mx/cibiogem/images/cibiogem/sistema_nacional/documentos/ANPL/QRoo/BACALAR.pdf
- 30 Jiménez, B. (2001). La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada. México, UNAM
- 31 OCDE (2019). Implementación de los principios de la OCDE sobre gobernanza del agua. París, OCDE
- 32 Briceño, R. (2019) “NO REQUERIMOS DE SUPUESTAS ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN DE ORGANIZACIONES EXTERNAS”: Presenta ejido Aaron Merino, del municipio de Bacalar, su Plan de Ordenamiento Ecológico Local Comunitario para contrarrestar intento de crear un Área Natural Protegida. Disponible en <https://noticaribe.com.mx/2024/09/24/no-requerimos-de-supuestas-estrategias-de-conservacion-de-organizaciones-externas-presenta-ejido-aaron-merino-del-municipio-de-bacalar-su-plan-de-ordenamiento-ecologico-local-comunitario-para-c/>
- 33 Hardin, G. (1968). The tragedy of the commons. *Science*, 162(3859), 1243-1248.
- 34 Saidel, M. (2017). La tragedia de los comunes revisitada: de la teoría formal a las formas históricas de desposesión. *Temas y Debates* (33).
- 35 Koebele, E. A., Méndez-Barrientos, L. E., Nadeau, N., & Gerlak, A. K. (2024). Beyond engagement: Enhancing equity in collaborative water governance. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 11(2), e1687.
- 36 Pacheco, S., & Manzano, M. (2024). The Socioeconomic Dimensions of Water Scarcity in Urban and Rural Mexico: A Comprehensive Assessment of Sustainable Development. *Sustainability*, 16(3), 1011.
- 37 Harvey, D. (2007). *A brief history of neoliberalism*. Oxford University Press
- 38 Ostrom, E. (1990). *Governing the commons: The evolution of institution of institutios for collective action*. Cambridge: Cambridge University Press.
- 39 Poteete, A., Janssen, M., & Ostrom, E. (2010). *Working together: Collective action, the commons, and multiple methods in practice*. Princeton University Press.



ARTÍCULO ORIGINAL

Análisis comparativo de modelos adaptativos para evaluar el confort térmico y la eficiencia energética de oficinas en un clima tropical de Misantla, Veracruz

Soraya Guzmán-Gerón¹, Jorge Roa-Díaz¹, Luis Carlos Sandoval-Herazo^{2,3}, Luis Guillermo Carreto-Hernandez⁴ Ariel Francisco-Hernandez⁵, Wendy Guadalupe Báez-García^{5*}

¹ Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Misantla, Km 1.8 Carretera a Loma del Cojolite, Misantla 93821, Veracruz, México.

² Wetlands and Environmental Sustainability Laboratory, Division of Graduate Studies and Research, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Km 1.8 Carretera a Loma Del Cojolite, Misantla 93821, Veracruz, México.

³ Facultad de Ingeniería, Universidad de Sucre, Sincelejo 700001, Colombia

⁴ Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora, Carretera Gutiérrez Zamora - Boca de Lima km 2.5, 93557, Gutiérrez Zamora, México.

⁵ Tecnológico Nacional de México, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira s/n, Colonia Palmira, Cuernavaca 62490, Morelos, México.

Recepción 15 de noviembre 2024. Aceptación 30 de noviembre de 2024.

PALABRAS CLAVE

Confort térmico
Eficiencia energética
Modelos de confort
térmico adaptativos
Climas tropicales

Resumen

El confort térmico en espacios interiores es crucial para el bienestar de los ocupantes. No obstante, mantener este confort puede resultar en un aumento significativo del consumo energético. Por ello, es fundamental optimizar los sistemas de climatización para mejorar la eficiencia energética sin comprometer el bienestar térmico de los usuarios. Este estudio evalúa modelos adaptativos para analizar el ahorro energético y el confort térmico en un espacio de oficina en Misantla, Veracruz, bajo un clima tropical Aw. Se empleó el modelo geométrico de referencia de los reportes técnicos de BESTest para modelar una oficina típica. Los modelos adaptativos de López-Pérez et al., Nicol, de Dear y Brager, ASHRAE 55, CIBSE GUIDE A y CEN Standard fueron comparados con el modelo de referencia, configurado con un Setpoint de 25°C. Los resultados mostraron ahorros energéticos de 24.30%, 9.80%, 10.60%, 14.00%, 17.20% y 23.10%, respectivamente. El confort térmico se evaluó mediante el modelo estático PMV/PPD, considerando días representativos de cada estación del año. Como conclusión, todos los modelos presentaron un PPD inferior al 30% y un PMV correspondiente a una sensación de "ligeramente fresco". El modelo de López-Pérez et al., destacó por su mejor rendimiento en términos de adaptabilidad y ahorro energético, seguido por el modelo CEN. Los modelos adaptativos demostraron ser efectivos para optimizar el consumo energético sin afectar el confort térmico de los ocupantes.

KEYWORDS

Thermal comfort
 Energy efficiency
 Adaptive models
 Static models
 Tropical climates

Abstract

Thermal comfort in indoor spaces is crucial for the well-being of occupants. However, maintaining this comfort can result in a significant increase in energy consumption. Therefore, it is essential to optimize air conditioning systems to improve energy efficiency without compromising the thermal well-being of users. This study evaluates adaptive models to analyze energy savings and thermal comfort in an office space in Misantla, Veracruz, under a tropical Aw climate. The geometric reference model from the BESTest technical reports was used to model a typical office. The adaptive models of López-Pérez et al., Nicol, de Dear and Brager, ASHRAE 55, CIBSE GUIDE A, and CEN Standard were compared with the reference model, set to a 25°C setpoint. The results showed energy savings of 24.30%, 9.80%, 10.60%, 14.00%, 17.20%, and 23.10%, respectively. Thermal comfort was evaluated using the static PMV/PPD model, considering representative days from each year's season. As a conclusion, all models showed a PPD lower than 30% and a PMV corresponding to a "slightly cool" sensation. The López-Pérez et al. model stood out for its better performance in terms of adaptability and energy savings, followed by the CEN model. Adaptive models proved to be effective in optimizing energy consumption without affecting the thermal comfort of the occupants.

Introducción

El confort térmico en los espacios interiores es esencial para la salud y la productividad de los ocupantes (Wang et al., 2025), considerando que las personas permanecen aproximadamente el 90% de su tiempo en ambientes interiores (Zomorodian et al., 2016). En climas extremos, las altas temperaturas y la radiación solar representan desafíos significativos para mantener condiciones térmicas óptimas, con posibles impactos en la calidad de vida.

Diversos estudios han analizado estrategias pasivas para optimizar el confort térmico en edificaciones (Carreto-Hernández et al., 2022, 2023, 2024; Báez-García et al., 2024), concluyendo que, si bien estas estrategias pueden ser efectivas, no son completamente autosuficientes. Por consiguiente, es necesario complementar dichas medidas con sistemas de Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado (HVAC) para abordar de manera integral los desafíos asociados al control térmico. No obstante, el funcionamiento de estos sistemas implica altos costos energéticos y un impacto ambiental significativo (Zakka & Lee, 2024). En este contexto, una gestión eficiente de los sistemas HVAC resulta crucial para maximizar el confort térmico, minimizar el consumo energético y promover prácticas sostenibles a largo plazo (Upasani et al., 2024).

Para abordar este desafío, se han realizado investigaciones centradas en el confort térmico óptimo de los ocupantes y su impacto en el consumo energético (Taleghani, Tenpierik, Kurvers, & van den Dobbelssteen, 2013). Entre estas, se encuentra el estudio de modelos de confort térmico que permitan considerar las respuestas de los ocupantes al entorno establecido (Nicol & Humphreys, 2002; Indraganti, Ooka, Rijal, & Brager, 2014; Oropeza-Pérez, Petzold-Rodríguez, & Bonilla-López, 2017). Los modelos de confort térmico se dividen en dos categorías: estáticos y adaptativos. Los modelos de confort térmico estático, desarrollados por Povl Ole Fanger en la década de 1970, sostienen que el sistema de termorregulación humana es altamente eficaz, logrando un equilibrio

térmico dentro de amplios rangos de variables ambientales, incluso sin garantizar confort (Djongyang, Tchinda, & Njomo, 2010; Charles, 2012). Fanger realizó su estudio en entornos controlados mediante una cámara térmica, donde predijo la sensación térmica de 1,296 personas (Fanger, 1970). Este estudio dio lugar a los modelos Voto Medio Predicho (PMV) y Porcentaje Predicho de Insatisfechos (PPD), que fueron fundamentales para establecer estándares internacionales como ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013), CEN Standard (CEN, 2007) y CIBSE (CIBSE, 2006). En contraste, los modelos de confort térmico adaptativos proponen que, ante un cambio que cause malestar, las personas tienden a ajustar su comportamiento para restablecer el confort (Humphreys, 1997; Nicol et al., 2012).

Los primeros estudios sobre modelos adaptativos, como los de Nicol y Humphreys (Nicol & Humphreys, 1973) y de Dear y Brager (de Dear & Brager, 1998), se centraron en analizar el comportamiento de los ocupantes y la aceptabilidad del ambiente térmico. Estas investigaciones tienen como objetivo optimizar la eficiencia de los sistemas HVAC y satisfacer las necesidades de confort térmico de los ocupantes en espacios cerrados.

En la actualidad, el desarrollo y la implementación de modelos de confort térmico son cruciales para la optimización de los ambientes interiores y la mejora de la calidad de vida de los ocupantes de los edificios. A nivel global, se han desarrollado diversos modelos que abordan las condiciones climáticas, socioeconómicas y culturales específicas de cada región (Indraganti, Ooka, Rijal, & Brager, 2014; Manu, Shukla, Rawal, Thomas, & de Dear, 2016; Rijal, Humphreys, & Nicol, 2019; Jiao, Yu, Yu, Wang, & Wei, 2020).

Por ejemplo, Nicol y Humphreys (Nicol & Humphreys, 2002) desarrollaron un modelo de confort térmico adaptativo mediante pruebas de campo, demostrando que la temperatura de confort interior varía significativamente entre diferentes zonas climáticas. Sin embargo, también evidenciaron que las personas tienden a adaptarse a los

cambios ambientales y estacionales. Por otro lado, McCartney y Nicol (McCartney & Nicol, 2002) desarrollaron un algoritmo de control adaptativo (ACA) como alternativa a los controles de temperatura fija en edificios y demostraron que el ACA puede ahorrar energía en los sistemas de control climático sin afectar el confort térmico percibido por los ocupantes. De Dear y Brager (de Dear & Brager, 1998) estudiaron cómo las preferencias térmicas de los ocupantes se ajustan a las condiciones interiores y exteriores, confirmando que las temperaturas óptimas varían según el entorno. Además, identificaron que los ocupantes de edificios con Ventilación Natural (VN) toleran un rango más amplio de temperaturas debido a la adaptación psicológica y comportamental. Nicol (Nicol, 2004) desarrolló un modelo de confort adaptativo para climas tropicales, utilizando los resultados de encuestas locales sobre las preferencias térmicas de los ocupantes, con el fin de mejorar la comprensión del confort térmico en estos entornos. En México, Oropeza-Pérez et al. (Oropeza-Pérez, Petzold-Rodríguez, & Bonilla-López, 2017) desarrollaron un modelo de confort térmico adaptativo para las regiones climáticas de México, considerando tanto edificios con Aire Acondicionado (AC) como sin él. Encontraron que, en edificios con AC, se puede aumentar la temperatura del termostato manteniendo el confort, mientras que, en edificios sin aire acondicionado, el confort mejora si los ocupantes controlan su entorno usando técnicas pasivas como VN y Control Solar. A su vez, López-Pérez et al. (López-Pérez et al., 2019) desarrollaron un modelo de confort térmico adaptativo para edificios educativos en clima tropical Aw, considerando AC y VN. El modelo mostró que los ocupantes preferían temperaturas de confort más altas que los estándares actuales y que, al aumentar la temperatura de confort, se podría mejorar la satisfacción y ahorrar energía, tomando en cuenta la adaptabilidad térmica de los ocupantes.

Los modelos de confort térmico adaptativo han demostrado ser herramientas clave para mejorar tanto el bienestar de los ocupantes como la eficiencia energética en edificios. A través de la adaptación a las condiciones ambientales y la flexibilidad de las preferencias de los usuarios, estos modelos permiten optimizar el uso de recursos energéticos sin comprometer el confort. En particular, estudios previos han mostrado que ajustar las condiciones térmicas según la adaptabilidad de los ocupantes no solo puede incrementar el nivel de satisfacción, sino también reducir el consumo energético, especialmente en climas cálidos y tropicales. Esto resalta la importancia de integrar enfoques adaptativos en la planificación y diseño de sistemas de climatización y ventilación.

En este contexto, el estudio se centra en un análisis comparativo de modelos de confort térmico adaptativo aplicados a una oficina ubicada en el clima tropical de Misantla. Se utiliza el modelo de referencia BESTest para simular un ejemplo de oficina típica. Se evalúa el confort térmico mediante el modelo PMV/PPD, considerando las condiciones térmicas percibidas por los ocupantes y su relación con el consumo energético. Además, se analiza el impacto de incorporar modelos adaptativos en la mejora de la eficiencia energética, evaluando su capacidad para ajustar las condiciones interiores en función de las preferencias térmicas de los ocupantes y las variaciones ambientales.

Materiales y métodos

La metodología de la presente investigación se dividió en tres etapas principales. En primer lugar, se llevó a cabo la verificación del modelo base, utilizando el modelo 600 del informe BESTest como referencia, lo que permitió garantizar la funcionalidad y precisión de la plataforma empleada. Posteriormente, en la segunda etapa, se implementaron modelos de confort térmico adaptativo, considerando un modelo local, dos modelos ampliamente utilizados en la literatura y tres estándares reconocidos, ajustados a las condiciones climáticas tropicales de Misantla, Veracruz. Finalmente, en la tercera etapa, se analizaron los resultados obtenidos, evaluando el potencial de estos modelos para reducir el consumo energético y mejorar las condiciones de confort térmico en la habitación estudiada.

Modelo BESTest 600

El modelo BESTest 600 corresponde a una habitación con dimensiones de 2.7 m de altura, 6 m de ancho y 8 m de largo. Esta habitación está equipada con dos ventanas orientadas al sur, cada una con un tamaño de 3 x 2 m y un vidrio de espesor de 3.175 mm. Este modelo es adecuado para simular una habitación de oficina, debido a sus características de tamaño y diseño, las cuales fueron tomadas del modelo descrito en los reportes técnicos "International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method" (Judkoff & Neymark, 1995) y "EnergyPlus Testing with Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests from ANSI/ASHRAE Standard 140-2011" (U.S. Department of Energy, 2011). La simulación se realizó bajo las condiciones climáticas de Denver, Colorado, dado que las pruebas de BESTest se llevaron a cabo en este entorno. Las condiciones climáticas se modelaron en formato TMY (Typical Meteorological Year), que se basa en un promedio de datos meteorológicos recopilados durante un período de 5 a 10 años, proporcionando una representación precisa de las condiciones climáticas anuales. Se consideró una infiltración de aire de 0.5 Cambios de Aire por Hora (ACH), lo cual representa la cantidad de aire exterior que ingresa a la habitación debido a filtraciones. Asimismo, se incluyeron cargas térmicas internas de 200 W en la habitación, distribuidas en un 60% de energía radiativa y un 40% de energía convectiva. El control térmico de la habitación se estableció con un Setpoint de 20 °C para calefacción y 27 °C para enfriamiento. Las especificaciones completas de los materiales utilizados en la simulación se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Especificación de los materiales

Elemento	λ ($\frac{\text{kJ}}{\text{hmK}}$)	C_p ($\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$)	ρ ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)	R ($\frac{\text{hm}^2\text{K}}{\text{kJ}}$)	d (m^2)
Paredes					
Bloque de concreto	1.836	1.00	1400		0.1000
Aislamiento de espuma	0.144	1.40	10		0.0615
Revestimiento de madera	0.504	0.9	530		0.0090
Suelo					
Concreto débil	4.068	1.00	1400		0.0800
Aislamiento				90.81	1.0070
Techo					
Cartón de yeso	0.576	0.84	950		0.0100
Fibra de vidrio	0.144	0.84	950		0.1118
Cubierta de techo	0.504	0.90	530		0.0190

El modelo geométrico de la habitación fue construido en el software SketchUp Pro-17, considerando las dimensiones y la orientación hacia el sur. La Figura 1 muestra el modelo de la habitación en SketchUp. Posteriormente, utilizando la herramienta de extensión para TRNSYS 17, el modelo fue transferido a Type 56, donde se realizaron los ajustes correspondientes según las especificaciones necesarias para la simulación térmica. La Figura 2 presenta la plataforma de simulación en TRNSYS, donde se configuraron y modificaron los parámetros para la simulación.

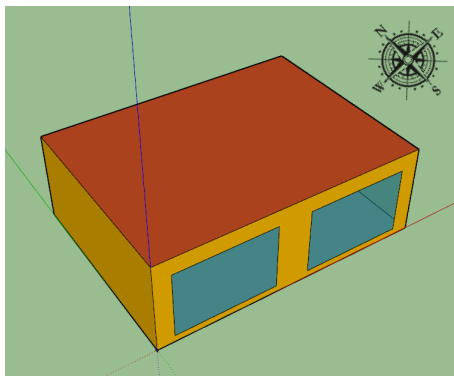


Figura 1. Modelo geométrico BESTest construido en SketchUp

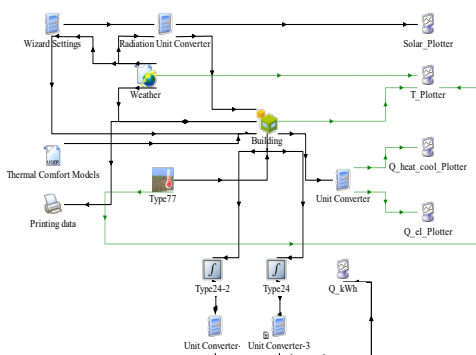


Figura 2. Plataforma de simulación en TRNSYS 17

Los resultados obtenidos en el reporte BESTest, a partir de simulaciones realizadas con el software EnergyPlus, indicaron una carga térmica de calefacción de 5.7 MWh y una carga de enfriamiento de 7.0 MWh. Por otro lado, los resultados obtenidos en la presente investigación, utilizando la plataforma TRNSYS, mostraron una carga térmica de calefacción de 5.4 MWh y una carga de enfriamiento de 6.9 MWh. Las diferencias porcentuales entre ambos conjuntos de resultados fueron del 5% para calefacción y del 1% para enfriamiento, lo que sugiere que la plataforma de simulación utilizada en este estudio está funcionando de manera adecuada y consistente con los datos reportados.

Caso de estudio

Este estudio se centra en analizar el comportamiento térmico y energético de una oficina típica ubicada en Misantla, Veracruz, utilizando como referencia el modelo BESTest 600. Misantla es una ciudad ubicada en el estado de Veracruz, México, con coordenadas geográficas de 19.58° N de latitud y 96.97° W de longitud. Se encuentra a

aproximadamente 75 kilómetros del litoral del Golfo de México, en una región montañosa que forma parte de la Sierra de los Tuxtlas. Misantla se caracteriza por un clima tropical subhúmedo, tipo Aw según la clasificación de Köppen. Este clima se distingue por la presencia de altas temperaturas y niveles elevados de humedad durante la mayor parte del año, lo que genera incomodidad térmica en los espacios interiores. Estas condiciones afectan directamente la demanda energética de los edificios, al incrementar la necesidad de refrigeración para mantener condiciones de confort adecuadas. En la Tabla 2 se muestran las condiciones climáticas mensuales de Misantla, Veracruz.

Tabla 2. Condiciones climáticas de Misantla Veracruz

Meses	T. Ambiente	Vel. Viento	H. Relativa	R. Solar
Enero	19.01	3.00	79.58	273.77
Febrero	20.32	3.00	79.91	322.28
Marzo	22.61	3.10	77.61	346.98
Abril	25.02	3.10	75.98	390.83
Abril	27.14	3.00	74.39	418.13
Mayo	27.20	2.91	77.73	436.81
Junio	27.39	2.80	76.50	423.27
Julio	27.52	2.69	76.02	398.09
Agosto	26.18	2.89	80.37	353.70
Septiembre	25.11	3.00	78.33	341.75
Octubre	21.85	3.01	80.20	314.29
Noviembre	20.15	2.90	79.68	264.67
Prom. Anual	24.12	2.95	78.03	357.05

Modelos de confort térmico adaptativo

Existen dos tipos principales de modelos de confort térmico: el adaptativo y el estático. Por su parte, el modelo adaptativo se fundamenta en la capacidad de los ocupantes para adaptarse a las condiciones térmicas, relacionando el confort interior con las condiciones climáticas exteriores. El modelo estático se basa en condiciones constantes y controladas, considerando que el confort térmico depende de parámetros específicos como temperatura, humedad y nivel de actividad física. El análisis comparativo se centra en evaluar el potencial del modelo adaptativo (M.A) para mejorar el confort térmico y optimizar el consumo energético en una oficina ubicada en un clima tropical. Para ello, se emplea un modelo local mexicano propuesto por López-Pérez et al. (López-Pérez et al., 2019), el cual se presenta en la Ec. (1), junto con dos modelos ampliamente reconocidos en la literatura científica: el de Nicol (Nicol, 2004) y el de Dear y Brager (de Dear & Brager, 1998), cuyas ecuaciones se muestran en las Ec. (2) y (3). También se consideran los estándares internacionales ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013), CIBSE Guide A (CIBSE, 2006) y CEN Standard (CEN, 2007), representados en las Ec. (4), (5) y (6). Estas ecuaciones proporcionan los criterios y parámetros necesarios

$$\text{M.A 1} \quad T_{comf} = 0.13T_{rm} + 22.7 \quad (1)$$

$$\text{M.A 2} \quad T_{comf} = 0.534T_{out} + 12.9 \quad (2)$$

$$\text{M.A 3} \quad T_{comf} = 0.04T_{out} + 22.6 \quad (3)$$

$$\text{M.A 4} \quad T_{comf} = 0.31T_{out} + 17.8 \quad (4)$$

$$\text{M.A 5} \quad T_{comf} = 0.09T_{rm} + 22.6 \quad (5)$$

$$\text{M.A 6} \quad T_{comf} = 0.33T_{rm} + 18.8 \quad (6)$$

La temperatura de confort, denotada como T_{comf} puede ser calculada de diversas formas según el modelo empleado. En

algunos casos, se obtiene a partir de la temperatura exterior T_{out} , mientras que en otros se determina mediante la temperatura media móvil T_{rm} utilizando la ecuación (7).

$$T_{rm(today)} = (\alpha)T_{rm(yesterday)} + (1 - \alpha)T_{m(today)} \quad (7)$$

Donde $T_{rm(today)}$ y $T_{rm(yesterday)}$ son las temperaturas medias móviles correspondientes a hoy y ayer, respectivamente, expresadas en grados Celsius. La $T_{m(today)}$ es la temperatura media diaria exterior del día en grados Celsius, y el valor de α se establece en 0.8.

La Tabla 3 presenta la temperatura de confort térmico en las condiciones climáticas de Misantla, Veracruz, de acuerdo con los modelos previamente mencionados.

Tabla 3. Temperaturas de confort térmico con los diferentes modelos adaptativos

Meses	M.A 1	M.A 2	M.A 3	M.A 4	M.A 5	M.A 6
Enero	25.17	23.05	23.36	23.69	24.31	25.07
Febrero	25.34	23.75	23.41	24.10	24.43	25.50
Marzo	25.64	24.97	23.50	24.81	24.63	26.26
Abril	25.95	26.26	23.60	25.56	24.85	27.06
Abril	26.23	27.39	23.69	26.21	25.04	27.76
Mayo	26.24	27.43	23.69	26.23	25.05	27.78
Junio	26.26	27.53	23.70	26.29	25.07	27.84
Julio	26.28	27.59	23.70	26.33	25.08	27.88
Agosto	26.10	26.88	23.65	25.92	24.96	27.44
Septiembre	25.96	26.31	23.60	25.58	24.86	27.09
Octubre	25.54	24.57	23.47	24.57	24.57	26.01
Noviembre	25.32	23.66	23.41	24.05	24.41	25.45
Prom. Anual	25.84	25.78	23.56	25.28	24.77	26.76

Adicionalmente, se emplean modelos estáticos para analizar el confort térmico en ambientes controlados y se basan en los índices PMV y PPD. Estos modelos proporcionan un marco de referencia complementario al análisis adaptativo. El modelo PMV predice el nivel de confort térmico de las personas en una escala de -3 (muy frío) a +3 (muy caliente), basado en factores como a temperatura, la humedad, la velocidad del aire, la ropa, la tasa metabólica y la resistencia térmica de la vestimenta. El PPD calcula el porcentaje de personas que se sentirán incómodas en un ambiente, en función del PMV. Cuanto mayor es el valor de PMV, mayor es el porcentaje de insatisfacción. La Tabla 4 muestra la relación entre los índices PMV/PPD.

Tabla 3. Relación entre PMV y PPD

PMV	PPD (%)
-3	100
-2	95
-1	25
0	5
1	25
2	80
3	100

En oficinas, se asume que los ocupantes ajustan su vestimenta según la temporada, con 0.5 Clo en la cálida y 1.0 Clo en la fría, y mantienen una tasa metabólica de 1.2

Met, propia de actividades sedentarias.

Resultados

Se realizaron simulaciones de una oficina típica basada en el modelo BESTest 600, utilizando modelos de confort térmico adaptativo para evaluar las condiciones térmicas específicas del clima de Misantla, Veracruz. A través de estas simulaciones, se determinaron las temperaturas de confort más adecuadas para este contexto climático, basadas en los modelos adaptativos. Además, se analizó la demanda energética anual para el enfriamiento, comparando los modelos de confort térmico adaptativos con un modelo de referencia basado en un Setpoint constante de 25°C durante todo el año.

Los resultados anuales indican que el edificio presenta un consumo energético de 12,461.2 kWh utilizando el modelo de referencia. En contraste, los modelos de confort adaptativo evidencian reducciones significativas, con valores de consumo anual de 9429.5 kWh, 11,239.5 kWh, 11,134.4 kWh, 10,712.6 kWh, 10,301.8 kWh y 9586.6 kWh para los modelos M.A 1, M.A 2, M.A 3, M.A 4, M.A 5 y M.A 6, respectivamente. Esto representa ahorros energéticos anuales del 24.30%, 9.80%, 10.60%, 14.00%, 17.20% y 23.10%, respectivamente, en comparación con el modelo de referencia.

De manera mensual, se observa que enero presenta un consumo de 875.1 kWh con el modelo de referencia, mientras que los modelos adaptativos lograron una reducción del consumo, alcanzando valores entre 667.3 kWh (M.A 6) y 766.9 kWh (M.A 4). En febrero, el consumo bajo el modelo de referencia fue de 800.6 kWh, mientras que los modelos adaptativos registraron valores de entre 613.6 kWh (M.A 1) y 716 kWh (M.A 3). Durante los meses más cálidos, como mayo y agosto, los modelos adaptativos también mostraron una reducción considerable de la demanda energética. Por ejemplo, en mayo, el consumo pasó de 1112 kWh en el modelo de referencia a un rango de entre 818.3 kWh (M.A 1) y 983.2 kWh (M.A 3). En agosto, el consumo energético del modelo de referencia fue de 1197 kWh, mientras que los modelos adaptativos lograron valores que variaron de 902.4 kWh (M.A 1) a 1070 kWh (M.A 3).

El mes con mayor demanda energética fue octubre, con un consumo de 1277 kWh utilizando el modelo de referencia. Los modelos adaptativos presentaron una notable reducción en este mes crítico, con valores de 1002 kWh, 1182 kWh, 1155 kWh, 1125 kWh, 1073 kWh y 1008 kWh para los modelos M.A 1, M.A 2, M.A 3, M.A 4, M.A 5 y M.A 6, respectivamente. Finalmente, en diciembre, el consumo energético bajo el modelo de referencia fue de 800 kWh, mientras que los modelos adaptativos oscilaron entre 616.6 kWh (M.A 1) y 743.8 kWh (M.A 4), lo que confirma una reducción sostenida incluso en los meses más fríos.

La Figura 3 presenta la comparación del consumo energético anual de los modelos de confort térmico adaptativo frente al modelo de referencia. En esta figura se evidencia que el modelo con mayor potencial de ahorro energético es el M.A 1, basado en la metodología propuesta por López-Pérez et al. (López-Pérez et al., 2019). Este modelo logra una reducción del 24.30% en comparación con el modelo de referencia, destacándose como la opción más eficiente entre los evaluados.

El análisis del modelo de confort térmico basado en los índices PMV y PPD se llevó a cabo considerando un día típico representativo de cada estación del año. La selección de un día típico representativo para cada estación del año tiene

como finalidad analizar con mayor precisión el desempeño del modelo adaptativo en escenarios térmicos específicos. Esto incluye condiciones extremas, como días muy cálidos y fríos, así como escenarios intermedios, como días cálidos y fríos. Este enfoque permite evaluar la capacidad del modelo adaptativo para responder a variaciones estacionales, proporcionando un marco detallado para interpretar el confort térmico en distintas condiciones climáticas. Para este análisis, los días seleccionados fueron el 12 de mayo para primavera, el 22 de agosto para verano, el 25 de octubre para otoño y el 15 de enero para invierno. Estos días se eligieron por su representatividad en función de los promedios climáticos estacionales y las características particulares de cada periodo.

Para la estación de primavera (12 de mayo), los valores de PPD presentan un nivel de confort térmico adecuado, con un rango que varía entre 24.26% (M.A 1) y 26.63% (M.A 3). Estos valores indican una alta aceptabilidad por parte de los ocupantes, dado que el PPD se encuentra dentro del intervalo de 20-30%, el cual es comúnmente considerado como indicativo de condiciones térmicas confortables. En cuanto a los valores de PMV, estos oscilan entre -0.53 (M.A 1) y -0.78 (M.A 3), lo que sugiere una sensación térmica ligeramente fresca, pero aún dentro de un rango considerado aceptable para la mayoría de los ocupantes. Dichos valores indican que las condiciones térmicas en esta estación se perciben como agradables, presentando una ligera frescura sin generar incomodidad significativa en los ocupantes.

Durante el verano (22 de agosto), los valores de PPD muestran una aceptabilidad térmica notablemente alta, con un rango que varía entre 12.9% (M.A 1) y 14.23% (M.A 3), lo que indica una mínima insatisfacción térmica. Este comportamiento sugiere que la mayoría de los ocupantes experimentaron condiciones agradables, con solo una ligera disconformidad térmica.

Los valores de PMV, que fluctúan entre -0.12 (M.A 1) y -0.37 (M.A 3), indican una sensación térmica ligeramente fresca, pero dentro de los rangos generalmente aceptables. Estos resultados son característicos de días cálidos de verano, donde las condiciones térmicas se mantienen dentro de un nivel confortable para los ocupantes.

Para el otoño (25 de octubre), los valores de PPD se encuentran en un rango de entre 24.37% (M.A 1) y 27.38% (M.A 3), lo que nuevamente refleja una aceptabilidad térmica favorable, comparable con los resultados obtenidos en primavera. Los valores de PMV, que varían entre -0.56 (M.A 1) y -0.77 (M.A 3), sugieren una ligera sensación de frescor, sin que esto llegue a generar incomodidad significativa en la mayoría de los ocupantes. Esto implica que las condiciones térmicas en otoño son en su mayoría agradables y se consideran confortables para los ocupantes en base a los valores de PPD y PMV.

Durante el invierno (15 de enero), los valores de PPD aumentan, alcanzando un rango entre 29.4% (M.A 1) y 32.57% (M.A 3), lo que indica un incremento en la insatisfacción térmica en comparación con las otras estaciones. Este patrón sugiere que una mayor proporción de los ocupantes percibe incomodidad térmica en este periodo. Los valores de PMV en invierno varían entre -0.67 (M.A 1) y -0.95 (M.A 3), lo que refleja una sensación térmica más fría, correspondiente a la percepción de frío por parte de los ocupantes, lo cual es característico de los días invernales. Aunque las condiciones podrían considerarse marginalmente incómodas, no se consideran extremas, pero sí se observa un aumento en la disconformidad térmica en relación con las estaciones más cálidas.

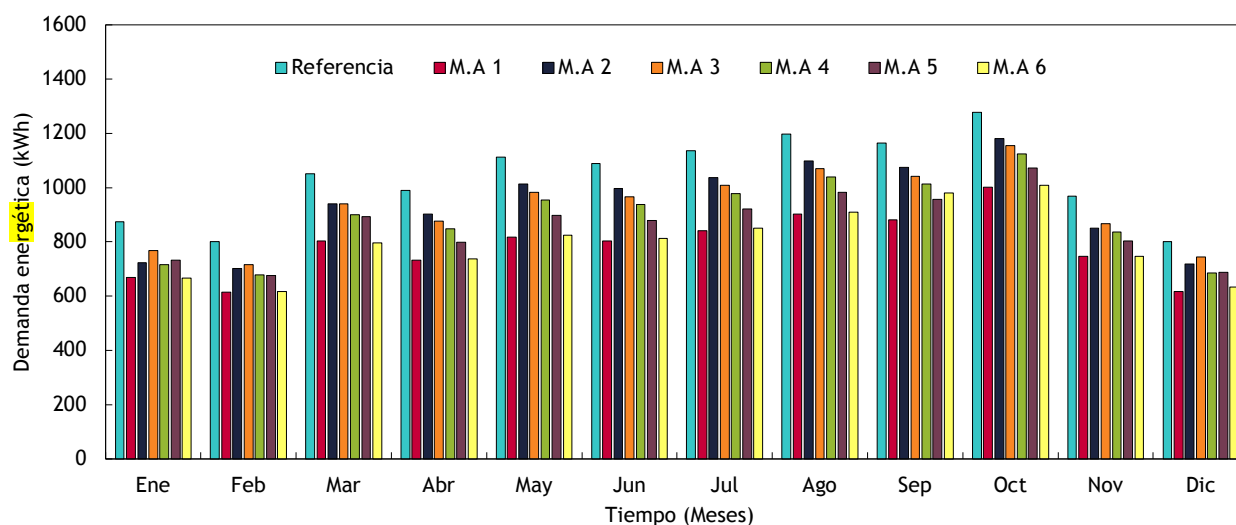


Figura 3. Comparativo de diferentes modelos adaptativos con el modelo de referencia en términos de demanda energética

Discusión

Los resultados muestran que los modelos adaptativos son una opción efectiva para mejorar la eficiencia energética y el confort térmico en oficinas en climas tropicales. Estos modelos no solo reducen el consumo energético anual, sino que también proporcionan un confort térmico adecuado en la mayoría de las estaciones, especialmente en primavera y verano. El análisis de los resultados revela que el modelo M.A 1, basado en la metodología de López-Pérez et al. (López-Pérez et al., 2019), presenta el mayor potencial de ahorro energético, con una reducción del 24.30%. Este rendimiento se debe a su adaptación específica a climas tropicales cálidos, donde las temperaturas son consistentemente altas y las fluctuaciones térmicas son más marcadas. Esto le permite responder de manera eficiente a las características climáticas particulares de la región. En segundo lugar, el modelo CEN (CEN, 2007), con un ahorro del 23.10%, también muestra un buen desempeño. Su éxito puede atribuirse a su enfoque más amplio, que abarca diversos climas, permitiéndole ofrecer un rendimiento relativamente bueno en contextos tropicales, aunque con menor optimización que el modelo López-Pérez et al. (López-Pérez et al., 2019).

Por otro lado, los modelos de Nicol (Nicol, 2004) de Dear y Brager (de Dear & Brager, 1998), diseñados principalmente para climas templados, no lograron un desempeño satisfactorio en este análisis. La naturaleza de estos modelos, que no están pensados para adaptarse a las altas temperaturas y a la intensa radiación solar de los climas tropicales, limita su eficacia en este contexto. Del mismo modo, los modelos de ASHRAE (ASHRAE, 2013) y CIBSE (CIBSE, 2006), aunque estandarizados y ampliamente utilizados, no responden de manera óptima a las condiciones térmicas específicas de los climas tropicales. Este enfoque más generalista resultó en un menor potencial de ahorro energético en comparación con los modelos adaptativos como el de López-Pérez et al. (López-Pérez et al., 2019).

A pesar de las diferencias en la reducción del consumo energético, todos los modelos lograron mantener un confort térmico adecuado, proporcionando una sensación de "ligeramente fresco" durante la mayoría de las estaciones. Esto indica que, independientemente del modelo, todos cumplieron con las expectativas de confort térmico. Sin embargo, es crucial considerar el ahorro energético conjunto a largo plazo. En este sentido, el modelo López-Pérez et al. (López-Pérez et al., 2019) se destaca no solo por su capacidad para proporcionar confort, sino también por su mayor potencial de reducción de consumo energético, lo que lo posiciona como la opción más eficiente en términos de ahorro energético en climas tropicales.

Conclusiones

los modelos de confort térmico adaptativos evaluados en este estudio demostraron un alto potencial para mejorar las condiciones térmicas y reducir el consumo energético en oficinas típicas en el clima tropical de Misantla, Veracruz. El modelo M.A 1, basado en la

metodología de López-Pérez et al. (López-Pérez et al., 2019), fue el que mostró la mayor reducción energética anual, alcanzando un 24.30%. Este modelo destaca por su capacidad para adaptarse a las variaciones estacionales específicas del clima local, lo que le confiere una notable eficiencia en la gestión térmica de la oficina. Por otro lado, el modelo CEN (CEN, 2007), con una reducción del 23.10%, también mostró un desempeño destacado, aunque ligeramente inferior al de López-Pérez et al. (López-Pérez et al., 2019). Esta diferencia puede explicarse por el enfoque más amplio y generalista del modelo CEN (CEN, 2007), que considera diversos climas en su análisis, lo que le otorga una buena capacidad de adaptación, pero no optimiza tanto los parámetros específicos de Misantla. Los modelos de los estándares de ASHRAE (ASHRAE, 2013) y CIBSE (CIBSE, 2006), aunque ampliamente utilizados y aplicables en diversos climas, no fueron tan efectivos en este contexto debido a su naturaleza estandarizada, que no incorpora las particularidades de climas tropicales como el de Misantla. Los modelos de Nicol (Nicol, 2004) y de Dear y Brager (de Dear & Brager, 1998), por su parte, mostraron un rendimiento menor, indicando que su aplicación en este caso no fue tan eficiente como los modelos más adaptativos. Sin embargo, a pesar de las diferencias en la reducción energética, todos los modelos adaptativos lograron proporcionar un nivel de confort térmico adecuado, con sensaciones ligeramente frescas. Esto sugiere que, aunque algunos modelos ofrecen un buen desempeño en términos de confort térmico, su eficiencia energética no siempre es la óptima. En general, los modelos de López-Pérez et al. (López-Pérez et al., 2019) y CEN (CEN, 2007) destacaron como las opciones más eficientes, con un desempeño cercano y significativo en términos de ahorro energético y confort térmico.

Contribución de los autores

S.G.G. Redacción, borrador original, revisión y edición, software, metodología, conceptualización.

J.R.D. Supervisión, revisión y edición, visualización, análisis formal.

L.C.S.H Supervisión, revisión y edición, visualización, análisis formal.

L.G.C.H Supervisión, revisión y edición, visualización, análisis formal.

A.F.H Supervisión, revisión y edición, visualización, análisis formal.

W.G.B.G. Redacción, borrador original, revisión y edición, software, metodología, conceptualización, Supervisión y revisión.

Financiamiento

No se recibió ningún patrocinio para llevar a cabo este artículo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Presentaciones previas

Ninguna.

Referencias

1. ASHRAE. (2013). Standard 55-2020: Thermal environmental conditions for human occupancy.
2. Báez-García, W., Simá, E., Chagolla-Aranda, M., Sandoval Herazo, L., & Carreto-Hernandez, L. (2024). Numerical-experimental study of the thermal behavior of a green facade in a warm climate in Mexico. *Energy and Buildings*, 114156.
3. Carreto-Hernandez, L., Moya, S., Báez-García, W., Herazo Sandoval, L., Francisco-Hernandez, A., Hernández-Jerónimo, J., & Téllez-Velázquez, E. (2024). Numerical-experimental investigation of a wind tower-room sustainable system: A parametric analysis of the mixed convection with humidification. *Journal of Building Engineering*, 109624. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109624>
4. Carreto-Hernandez, L., Moya, S., Varela-Boydo, C., & Francisco-Hernandez, A. (2022). Studies of ventilation and thermal comfort in different wind tower-room configurations considering humidification for a warm climate of Mexico. *Journal of Building Engineering*, 103675. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103675>
5. Carreto-Hernandez, L., Moya, S., Varela-Boydo, C., & Francisco-Hernandez, A. (2023). Numerical-experimental study of mixed convection in a wind tower-room system. *Building and Environment*, 110294. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110294>
6. Carreto-Hernandez, L., Moya, S., Varela-Boydo, C., Juárez Sosa, I., Báez-García, W., Reyes, V., & Morales, J. (2024). Analysis of natural convection in a representative cavity of a room considering oscillatory boundary conditions: An experimental and numerical approach. *International Journal of Thermal Sciences*, 109357.
7. CEN. (2007). Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy, Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics, European Committee for Standardization. Brussels, Belgium.
8. Charles, K. (2012). Fanger's thermal comfort and draught models. National Research Council of Canada. NRC Institute for Research in Construction, 29.
9. CIBSE. (2006). Chartered institution of building Services, Environmental Design: CIBSE Guide A, CIBSE. London.
10. de Dear, R., & Brager, G. (1998). Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference.
11. Djongyang, N., Tchinda, R., & Njomo, D. (2010). Thermal comfort: A review paper. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2626-2640.
12. Fanger, P. (1970). Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering.
13. Humphreys, M. (1997). An Adaptive Approach to Thermal Comfort Criteria. En *Naturally Ventilated Buildings*.
14. Indraganti, M., Ooka, R., Rijal, H., & Brager, G. (2014). Adaptive model of thermal comfort for offices in hot and humid climates of India. *Building and Environment*, 39-53.
15. Jiao, Y., Yu, H., Yu, Y., Wang, Z., & Wei, Q. (2020). Adaptive thermal comfort models for homes for older people in Shanghai, China. *Energy and Buildings*.
16. Judkoff, R., & Neymark, J. (1995). International Energy Agency building energy simulation test (BESTEST) and diagnostic method (Technical Report No. 90674). National Renewable Energy Laboratory. doi:<https://doi.org/10.2172/90674>
17. López-Pérez, L., Flores-Prieto, J., & Ríos-Rojas, C. (2019). Adaptive thermal comfort model for educational buildings in a hot-humid. *Building and Environment*, 181-194.
18. Manu, S., Shukla, Y., Rawal, R., Thomas, L., & de Dear, R. (2016). Field studies of thermal comfort across multiple climate zones for the subcontinent: India Model for Adaptive Comfort (IMAC). *Building and Environment*, 55-70.
19. McCartney, K., & Nicol, J. (2002). Developing an adaptive control algorithm for Europe. *Energy and Buildings*, 623-635.
20. Nicol, F. (2004). Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics. *Energy and Buildings*, 628-637.
21. Nicol, F., Humphreys, M., & Roaf, S. (2012). *Adaptive Thermal Comfort: Principles and Practice*.
22. Nicol, J., & Humphreys, M. (1973). Thermal comfort as part of a self-regulating system.
23. Nicol, J., & Humphreys, M. (2002). Adaptive Thermal Comfort and Sustainable Thermal Standards for Buildings. *Energy and Buildings*, 563-572.
24. Oropeza-Perez, I., Petzold-Rodriguez, A., & Bonilla-Lopez, C. (2017). Adaptive thermal comfort in the main Mexican climate conditions with and without passive cooling. *Energy and Buildings*, 251-258.
25. Rijal, H., Humphreys, M., & Nicol, J. (2019). Adaptive model and the adaptive mechanisms for thermal comfort in Japanese dwellings. *Energy and Buildings*, 109371.
26. Taleghani, M., Tenpierik, M., Kurvers, S., & van den Dobbelen, A. (2013). A review into thermal comfort in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 201-2015.
27. Upasani, N., Guerra-Santin, O., & Mohammadi, M. (2024). Developing building-specific, occupant-centric thermal comfort models: A methodological approach. *Journal of Building Engineering*, 110281.
28. Wang, T., Li, X., Lu, Y., Dong, L., Shi, F., & Lin, Z. (2025). An efficient thermal comfort prediction method for indoor airflow environment using a CFD-based deep learning model. *Building and Environment*, 267, 112246. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112246>
29. Zakka, V., & Lee, M. (2024). A generalized thermal comfort model using thermographic images and compact convolutional transformers: Towards scalable and adaptive occupant comfort optimization. *Building and Environment*, 112118.
30. Zomorodian, Z., Tahsildoost, M., & Hafezi, M. (2016). Thermal comfort in educational buildings: A review article. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 895-9006. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.033>



ARTÍCULO ORIGINAL

Análisis comparativo de diferentes técnicas de extracción de ADN genómico en *Saccharomyces cerevisiae* y *Scheffersomyces stipitis*

Angel Ximena Arcadia-Quezada¹, Daniela De la Torre-Portilla¹, Cinthya Wendolyne Espinoza-Patiño¹, Adriana Chico-Peralta², Teresita Arredondo-Ochoa³, José Ángel Granados-Arvizu^{1*}

¹ Facultad de Química. Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas S/N, Las Campanas, Santiago de Querétaro, 76010. México.

² Tecnológico de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Campus Querétaro, 76130 Santiago de Querétaro, México.

³ Instituto Politécnico Nacional, CICATA-IPN, Unidad Querétaro, Cerro Blanco No. 141. Col. Colinas del Cimatario, Santiago de Querétaro, Querétaro C.P. 76090, México.

Recepción 15 de octubre 2024. Aceptación 10 de diciembre de 2024.

PALABRAS CLAVE

Levaduras, extracción de ADN, pureza de ADN, *Saccharomyces cerevisiae* (W68), *Scheffersomyces stipitis* (NRRLY-7124).

Resumen

La extracción de ADN constituye una técnica de importancia crucial en múltiples investigaciones científicas, mayormente para análisis genéticos, por ejemplo, amplificar genes específicos in vitro a través de PCR. Debido a esto, es muy importante que los métodos de extracción sean eficientes para obtener ADN de alta pureza libre de contaminantes y de alta calidad. Por lo cual, el objetivo del presente estudio fue evaluar 3 métodos de extracción de ADN, dos tipos de levaduras, *Saccharomyces cerevisiae* (W68) y *Scheffersomyces stipitis* (NRRLY-7124). Los métodos comparados fueron: extracción de ADN por hervido, extracción de ADN genómico por solventes orgánicos y extracción de ADN con DNeasy PowerSoil Kit. Posteriormente se comparó la concentración de ácidos nucleicos y su pureza. Los resultados demostraron que el método más eficiente para la extracción de ADN es la extracción por medio de solventes, ya que obtuvo una mayor concentración (ng/ μ L) y mejor relación de pureza entre ácidos nucleicos y proteínas.

KEYWORDS

Yeast, DNA extraction, DNA purity, *Saccharomyces cerevisiae* (W68), *Scheffersomyces stipitis* (NRRLY-7124).

Abstract

DNA extraction is a crucially important technique in many scientific investigations, mostly for genetic analysis, e.g., amplifying specific genes in vitro through PCR. Because of this, it is very important that the extraction methods are efficient to obtain high purity DNA free of contaminants and of high quality. Therefore, the aim of the present study was to evaluate 3 DNA extraction methods for two types of yeast, *Saccharomyces cerevisiae* W68 and *Scheffersomyces stipitis* NRRLY-7124. The methods compared were DNA extraction by boiling, genomic DNA extraction by organic solvents and DNA extraction with DNeasy PowerSoil Kit. Subsequently, the concentration of nucleic acids and their purity were compared. The results showed that the most efficient method for DNA extraction is solvent extraction, since it obtained a higher concentration (ng/ μ L) and better purity ratio between nucleic acids and proteins.

Introducción

El Ácido Desoxirribonucleico (ADN) es una molécula de gran importancia que ha brindado información sobre la naturaleza hereditaria de los organismos. A partir de su descubrimiento, se han desarrollado diversas tecnologías y pruebas útiles para aislarlo y aplicar sus datos en áreas como la investigación, ciencias médicas, forenses, biológicas, y más actualmente en la generación de bancos y bibliotecas de información para diversos fines. En el estudio de la biología molecular la extracción de ADN es un proceso fundamental para el desarrollo, investigación e innovación. Existen diferentes métodos que usa la biología molecular para la correcta manipulación de la molécula que contiene la información genética del organismo. Por ejemplo, es posible secuenciar, clonar y amplificar mediante PCR¹.

La extracción de ADN se realiza con distintos métodos dependiendo del resultado que necesitamos, de la calidad buscada, o de los recursos con los que se cuenta. La extracción de ADN implica el rompimiento de las células y la separación de diferentes componentes de esta, como proteínas, lípidos y carbohidratos. Una vez que se extrae la molécula de ADN, puede utilizarse para una variedad de aplicaciones como investigación y modificación. Existen diversas técnicas sencillas y de bajo costo, como lo es la extracción con fenol-cloroformo, considerado uno de los más eficaces. La desventaja que presenta este método es que es un procedimiento laborioso y que utiliza compuestos tóxicos que pueden ser potencialmente peligrosos para los manipuladores, además de contener inhibidores para la PCR como los disolventes fenol y cloroformo, por lo que se debe añadir un paso más en la extracción. El método de hervido es rápido, simple y de bajo costo, sin embargo, el ADN que se obtiene tiende a ser de baja pureza y con un rendimiento limitado.

Por otro lado, están los kits completos, los cuales cuentan con todos los materiales necesarios para llevar a cabo la extracción de una forma muy sencilla, reproducible y con una reducción significativa en el tiempo. La limitante que presenta este método es el alto costo del kit y la poca cantidad obtenida de ADN².

Por lo tanto, antes de elegir el método por el cual se extraerá el ADN, es importante evaluar detalladamente todas las variables que se presenten como la calidad que se necesita, el rendimiento, costos y recursos y el material genómico que se necesitará, así como el uso posterior que se le dará a la muestra, lo que involucra a su vez la cantidad que será necesaria para llevar a cabo la investigación. Ejecutar la mejor técnica de extracción para cada caso tiene un impacto significativo en el rendimiento, la eficiencia y la calidad de experimentos posteriores. Una elección adecuada en el método de extracción significa resultados confiables y consistentes, asegurando así que los resultados sean reproducibles y precisos en experimentos futuros.

Las cepas utilizadas en estas extracciones son *Saccharomyces cerevisiae* (W68) y *Scheffersomyces stipitis* (NRRLY-7124), *S. cerevisiae* (W68) es la levadura de cerveza que se caracteriza por su perfil aromático y su capacidad de llevar a cabo el proceso de fermentación. Su estudio ha contribuido a elucidar procesos básicos de la fisiología celular siendo la especie de *Saccharomyces* más estudiada³. *S. stipitis* destaca entre las levaduras por su consumo de xilosa y arabinosa. Una de sus aplicaciones es la producción de etanol a partir de biomasa lignocelulósica⁴. Por lo cual, el objetivo fue evaluar y optimizar métodos de extracción de ADN en dos cepas de levaduras, *S. cerevisiae* W68 y *S. stipitis* NRRLY-7124, para determinar su efectividad en función del rendimiento, pureza y aplicación en experimentos. La investigación busca establecer el método de extracción más adecuado para cada cepa, maximizando la calidad del ADN obtenido y garantizando su utilidad en estudios futuros de biotecnología y fermentación.

Materiales y métodos**Material biológico**

Se emplearon dos cepas de levadura, *S. cerevisiae* W68 y *S. stipitis* NRRLY-7124 crecidos en medio YPD (10g/L extracto de levadura, 20g/L peptona y 20g/L de glucosa) por 14 h a 30 °C y 200 rpm. El cosechado de las células se hizo en la fase media logarítmica de ambas levaduras por ser la fase más activa. Adicionalmente, se empleó TAB-NaCl, Buffer TE, SDS al 10%, Proteínasa bacteriana Tipo XXIV P8038-1G Sigma-Aldrich, NaCl, cloroformo, isopropanol, etanol al 70% y agua desionizada.

Técnica de extracción por Hervido

El primer método de extracción fue por hervido, adaptado de Holmes y Quigley⁵. Se calentó la muestra biológica con

agua caliente para romper las membranas celulares y liberar el ADN. A partir de un cultivo inicial de caldo YPD en el cual se encontraban las levaduras activas, se transfirió 1 mL del cultivo a tubos eppendorf y se centrifugaron para concentrar a 10000 rpm, se eliminó el sobrenadante y se repitió el proceso 2 veces más hasta obtener unas pastillas con suficiente biomasa (todas las muestras fueron por triplicado). Después se decantó el sobrenadante cuidando que el pellet quedará en el tubo. Posteriormente se agregaron 500 μ L de agua inyectable estéril al pellet para resuspender la muestra. Se colocaron los tubos en baño maría a temperatura de ebullición (100°C) por 15 minutos para lisar. Se dejó enfriar a temperatura ambiente y se volvió a centrifugar a 13000 rpm por 15 minutos para separar el ADN. Por último, se recuperó el sobrenadante, el cual contiene el ADN en un nuevo tubo Eppendorf. Con este método es difícil obtener moléculas con una alta pureza.

Técnica de extracción por Solventes Orgánicos

El segundo método probado fue la extracción de ADN genómico por solventes orgánicos⁶. Se transfirió a tubos eppendorf 1 mL de muestra de las levaduras a partir de cultivos en caldo YPD concentrado y se centrifugaron a 10000 rpm para concentrar, se eliminó el sobrenadante y se repitió el proceso 2 veces más hasta obtener unas pastillas con suficiente biomasa. Para la lisis celular se agregó a los tubos 567 μ L de Buffer TE y se homogeneizó por pipeteo. Posteriormente se agregaron 30 μ L de SDS al 10% y 3 μ L de Proteínasa bacteriana Tipo XXIV (P8038-1G Sigma-Aldrich) y se mezcló con ayuda de un vórtex para después incubar a 37° por una hora.

Para el precipitado y purificación del ADN se agregaron 100 μ L de NaCl 5M y se mezcló con un vórtex. Después se agregaron 80 μ L de solución CTAB/NaCl la cual permitió remover residuos como la pared celular, proteínas y polisacáridos. Se agitó la muestra y se incubó a 65°C por 15 minutos. Se agregaron 750 μ L de cloroformo-alcohol isoamílico y se agitó la muestra por 5 minutos para después centrifugar a 13000 rpm por 5 minutos. Se extrajo la fase acuosa para transferirla a tubos nuevos evitando tocar la interfase. Se realizó un segundo lavado repitiendo desde agregar cloroformo-alcohol isoamílico. Después se le agregaron a la fase acuosa 345 μ L de isopropanol. Se agitó la muestra y se incubó a -20°C por 30 minutos; en este paso inició la precipitación del ADN. Después se centrifugó a 13000 rpm por 10 minutos y se eliminó el sobrenadante cuidando el precipitado de ADN. Se agregó 1 mL de etanol al 70% y se agitó para que el pellet y las paredes del tubo se lavaran, posteriormente se centrifugó nuevamente a 13000 rpm por 3 minutos y se eliminó el sobrenadante. Este último paso se repitió una vez más. Por último, se adicionaron 50 μ L de buffer TE para posteriormente almacenarlo.

Técnica de extracción por DNeasy PowerSoil Kit

En este proceso de extracción se siguió el método del fabricante (DNeasy PowerSoil ProKit Handbook) con modificaciones⁷. Se transfirió a tubos eppendorf 1 mL de muestra de las levaduras a partir de cultivos en caldo YPD concentrado y por medio de centrifugación a 10000 rpm se concentraron para obtener mayor biomasa. Al pellet se le agregaron 60 μ L de la solución C1 presente en el kit y se mezcló en vórtex a máxima velocidad por 10 min. Se centrifugó a 10000 rpm por 30 segundos. Posteriormente se transfirió el sobrenadante a un tubo de colección limpio de 2 mL, al que se le agregaron 250 μ L de solución C2 y que se llevó al vórtex por 5 segundos. Se centrifugó

después por 1 minuto a 10000 rpm. Sin tomar el pellet, se transfirieron 400 μ L del sobrenadante a un tubo de Colección limpio de 2 mL. Se agregaron 200 μ L de Solución C3 y se llevó al vórtex. Después, se centrifugó por 1 min a 10000 rpm. Nuevamente evitando el pellet, se transfirieron 600 μ L de sobrenadante a un tubo de Colección limpio de 2 mL. Se agitó para mezclar la Solución C4 y se agregaron 1200 μ L al sobrenadante, usando el vórtex después por 5 segundos. Cargamos 675 μ L en una Columna de Centrifugación MB y se centrifugó a 10000 rpm por 1 minuto. El flujo se desechó y se repitió 2 veces desde la carga en la columna de centrifugación hasta que toda la muestra se procesó. Se agregaron 500 μ L de solución C5, y después se centrifugó por 30 segundos a 10000 rpm. El flujo se desechó, y se volvió a centrifugar por 1 minuto a 10000 rpm. Se colocó la columna de centrifugación MB en un tubo de colección limpio de 2 mL y al centro de la membrana del filtro blanco se agregaron 100 μ L de solución C6. Se centrifugó por 30 segundos a 10000 rpm y se desechó la columna de centrifugación MB.

Análisis de concentración y pureza

La concentración y la pureza de cada muestra de ADN se evaluó mediante espectrofotometría utilizando un NanoDrop 2000 (Thermo Fisher, Wilmington, Delaware, USA). Los valores de concentración se registraron en ng/ μ L, mientras que la relación de absorbancia 260/280 se utilizó como indicador de la pureza del ADN.

Análisis estadístico

Los resultados se presentan como la media \pm desviación estándar (DE). Se hizo un análisis de varianza (ANOVA) y una comparación de medias entre tratamientos mediante la prueba de Tukey. El análisis estadístico y las gráficas se diseñaron empleando el software GraphPad Prism v.5 (GraphPad Software, La Jolla, CA, USA).

Resultados

Los resultados obtenidos se presentan en las Tablas 1 y 2, donde se comparan las concentraciones de ADN (ng/ μ L) y las relaciones de absorbancia 260/280 para cada uno de los tres métodos de extracción evaluados: hervido, solventes orgánicos y DNeasy PowerSoil Kit.

Tabla 1. Extracción de ADN de los tres métodos evaluados.

Método de extracción	Cepa	Concentración ADN (ng/ μ L)
Método de hervido	<i>S. stipitis</i>	29.5 \pm 7.3
	<i>S. cerevisiae</i>	24.06 \pm 23
Solventes orgánicos	<i>S. stipitis</i>	748.2 \pm 255
	<i>S. cerevisiae</i>	495.3 \pm 203.6
DNeasy PowerSoil Kit	<i>S. stipitis</i>	33.6 \pm 14.8
	<i>S. cerevisiae</i>	69.63 \pm 18.17

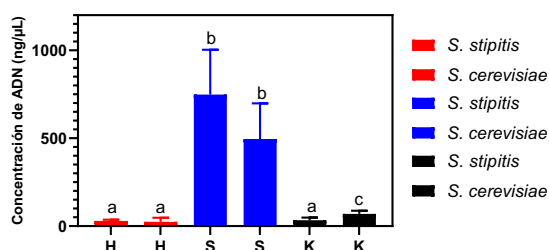


Figura 1. Comparación de concentración de ADN de los métodos de extracción evaluados. H: Método de hervido, S: Método de solventes orgánicos, K: Método de extracción por kit. Resultados representan la media±DE de 3 réplicas. Letras diferentes muestran diferencias estadísticas significativas de acuerdo con la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

El método de extracción por solventes orgánicos demostró ser el más eficiente, logrando las concentraciones de ADN más altas tanto para *S. stipitis* (748.2 ± 255 ng/μL) como para *S. cerevisiae* (495.3 ± 203.6 ng/μL). Este método también mostró una relación A260/280 adecuada en *S. cerevisiae* (2.00 ± 0.00), aunque los valores para *S. stipitis* (2.19 ± 0.09) excedieron ligeramente el rango óptimo de pureza. Por otro lado, el método por hervido presentó las concentraciones más bajas para ambas cepas, con 29.5 ± 7.3 ng/μL para *S. stipitis* y 24.06 ± 23 ng/μL para *S. cerevisiae*. Las relaciones A260/280 (2.21 ± 0.07 para *S. stipitis* y 2.14 ± 0.56 para *S. cerevisiae*) sugieren una pureza aceptable, aunque este método es limitado en rendimiento y calidad de ADN.

Tabla 2. Relación A260/280 de las muestras de ADN extraídas bajo diferentes métodos.

Método de extracción	Cepa	Índice A260/280
Método de hervido	<i>S. stipitis</i>	2.21 ± 0.07
	<i>S. cerevisiae</i>	2.14 ± 0.56
Solventes orgánicos	<i>S. stipitis</i>	2.19 ± 0.09
	<i>S. cerevisiae</i>	2.00 ± 0
DNeasy PowerSoil Kit	<i>S. stipitis</i>	1.53 ± 0.11
	<i>S. cerevisiae</i>	1.34 ± 0.02

Finalmente, el DNeasy PowerSoil Kit produjo concentraciones intermedias (33.6 ± 14.8 ng/μL para *S. stipitis* y 69.63 ± 18.17 ng/μL para *S. cerevisiae*), pero las relaciones A260/280 estuvieron fuera del rango óptimo (1.53 ± 0.11 para *S. stipitis* y 1.34 ± 0.02 para *S. cerevisiae*), indicando posibles contaminantes o una inadecuada compatibilidad del kit con estas muestras.

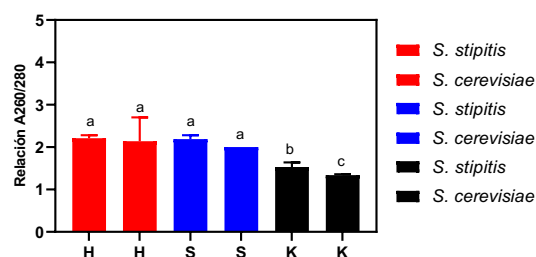


Figura 2. Comparación de concentración de ADN de los métodos de extracción evaluados. H: Método de hervido, S: Método de solventes orgánicos, K: Método de extracción por kit. Resultados representan la media±DE de 3 réplicas. Letras diferentes muestran diferencias estadísticas significativas de acuerdo con la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

La Figura 1 ilustra la comparación de las concentraciones de ADN para cada método, destacando la superioridad del método de solventes orgánicos. Por su parte, la Figura 2 muestra la pureza del ADN, donde el método por solventes y el de hervido presentan mejores valores en comparación con el método basado en el kit. El análisis estadístico mostró diferencias significativas entre los métodos, siendo importante señalar que si bien hay mayor rendimiento de extracción con el método de solventes, los índices de pureza no mostraron diferencias entre el método de hervido y el de solventes.

Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio destacan la importancia de seleccionar un método de extracción de ADN adecuado según los objetivos experimentales. De acuerdo con la literatura, la eficiencia de un método puede variar en función de las características de la muestra y las aplicaciones posteriores del ADN obtenido¹⁵. Al tener ADN purificado, es esencial la calidad de este para poder aplicarlo en diversas técnicas moleculares. Los parámetros que se evalúan después de una extracción son la integridad, cantidad y pureza. Una técnica de extracción ideal se caracteriza por tener un número reducido de pasos, minimizar el uso de disolventes peligrosos, requerir un equipo mínimo y ser relativamente económica⁸.

El método de extracción por solventes presenta una mayor concentración de ADN, pudiendo deberse al uso de isopropanol, SDS y amortiguadores⁸. Sin embargo, su uso conlleva desventajas, como el empleo de sustancias tóxicas y un procedimiento mucho más extenso^{5,13}. Además, el uso de solventes puede presentar variabilidad en los resultados, como se observó en las diferencias de concentración entre *S. stipitis* y *S. cerevisiae*, posiblemente debido a diferencias estructurales en sus paredes celulares¹². Investigaciones recientes sugieren que las técnicas avanzadas de extracción por solventes podrían incluir pasos de microfiltración para reducir los riesgos y mejorar la eficiencia¹⁶.

Por otro lado, el método por hervido, aunque rápido y económico, produjo las concentraciones más bajas de ADN, alineándose con reportes que señalan su limitación para obtener ADN de alta calidad¹. A pesar de ello, la pureza alcanzada fue aceptable, lo que lo convierte en una alternativa viable para aplicaciones menos exigentes en términos de calidad de ADN¹⁰. Algunos autores han sugerido que combinaciones de este método con tecnologías de

purificación adicionales podrían incrementar significativamente su rendimiento¹⁷.

El DNeasy PowerSoil Kit, diseñado para muestras de suelo, resultó ser el menos efectivo para levaduras en términos de pureza, lo cual coincide con investigaciones que advierten sobre la especificidad de los kits comerciales y su limitada adaptabilidad a diferentes tipos de muestras^{2,7}. Esto pone de manifiesto la necesidad de evaluar cuidadosamente la compatibilidad del método con el tipo de muestra antes de su aplicación. Adicionalmente, la implementación de kits personalizados para microorganismos específicos podría representar una mejora significativa en la industria biotecnológica¹⁸.

La comparación gráfica entre métodos resalta que el método de solventes orgánicos no solo es más eficiente en términos de concentración, sino también en pureza. Sin embargo, se observó una mayor variabilidad en los resultados de *S. stipitis*, probablemente debido a diferencias en la composición celular de esta levadura en comparación con *S. cerevisiae*. Este hallazgo coincide con estudios que destacan cómo las características fisiológicas de las especies pueden influir en la eficiencia de los métodos de extracción^{3,11}. Además, investigaciones sobre *S. stipitis* han mostrado que su resistencia a condiciones extremas puede complicar los procesos de lisis celular¹⁹.

En general, estos resultados confirman que la elección del método debe considerar factores como la pureza requerida, los recursos disponibles y la naturaleza de la muestra. Aunque los kits comerciales son útiles para protocolos estandarizados, los métodos tradicionales, como el de solventes orgánicos, siguen siendo la opción más confiable para obtener ADN de alta calidad. Por otra parte, el desarrollo de tecnologías basadas en extracción automatizada está revolucionando la forma en que los laboratorios realizan este tipo de procesos, ofreciendo nuevas oportunidades para mejorar la reproducibilidad y eficiencia²⁰.

Conclusiones

El método de extracción por medio de solventes orgánicos demostró ser mejor en cuanto a la concentración de ADN (ng/ul) y relación de absorbancia 260/280 para su empleo en técnicas utilizadas en la biología molecular, además tiene un mayor rendimiento y un menor costo.

Contribución de los autores

AXAQ, Experimentación, Redacción, diseño, Gráficas, recolección de datos.

CWEP, Experimentación y recolección de datos.

DDTP, Experimentación y recolección de datos.

CIGC, Experimentación y recolección de datos.

ACP, Financiamiento, supervisión y revisión.

TAO, Supervisión y revisión.

JAGA, Financiamiento, supervisión, diseño experimental y revisión.

Financiamiento

No se recibió ningún patrocinio para llevar a cabo este artículo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Presentaciones previas

Ninguna.

Referencias

1. Cervantes-González, J. (2003). Obtención de ácido desoxirribonucleico (ADN) útil para análisis genético, a partir de uñas recortadas. *Rev Med Hered* 14 (4), 230-233.
2. Ríos-Sánchez, E., Calleros, E., González-Zamora, A., Rubio, J., Martínez, O. C., Martínez, A., Hernández, S., & Pérez-Morales, R. (2016). Análisis comparativo de diferentes métodos de extracción de DNA y su eficiencia de genotipificación en población mexicana. *Acta Universitaria*, 26(4), 56-65. <https://doi.org/10.15174/au.2016.1078>
3. González, A., Valenzuela, A. (s. f.). *Saccharomyces cerevisiae*. Departamento De Genética Molecular, Instituto De Fisiología Celular. Universidad Nacional Autónoma De México. <http://www.biblioweb.tic.unam.mx/libros/microbios/Cap16/>
4. Granados, J. (2020). Estudios sobre el metabolismo de la glucosa, xilosa y arabinosa en *Scheffersomyces stipitis* ATCC28217 y su impacto en la producción de etanol usando hidrolizados lignocelulósicos. Repositorio Institucional DGBSDI-UAQ. <http://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/1879>
5. Holmes, D. and Quigley, M. (1981). A rapid boiling method for the preparation of bacterial plasmids. *Analyt. Biochem.* 114:193-197.
6. Green, M., & Sambrook, J. (2012). *Molecular Cloning. A laboratory manual* (4th ed.). New York: Cold Spring Harbor Laboratory Press.
7. DNeasy PowerSoil Kit Handbook 05/2017
8. Osorio-Cadavid, E., Ramírez, M., López, W. A., & Mambuscay, L. A. (2009). Estandarización de un protocolo sencillo para la extracción de ADN genómico de levaduras. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 15(1), 125-131.
9. Wilson, K. et al (1987) Preparation of Genomic DNA from Bacteria. *Current Protocols in Molecular Biology*, Wiley & Sons, New York, 2.4.1-2.4.5.
10. Thermo scientific (s. f.). T042-TECHNICAL BULLETIN NanoDrop Spectrophotometers. En n (p. www.nanodrop.com). https://dna.uga.edu/wp-content/uploads/sites/51/2019/02/Note-on-the-260_280-and-260_230-Ratios.pdf
11. Orfao, A; Pinto-Labajo, R; Pascual- Sánchez J; Aragall, E; Pedrosa-Berrio E; Solloso-Banobre, A; Posada de la-Paz, M; et al. (2011). Extracción de ácidos nucleicos. *Red Nacional de Biobancos*.
12. Betancurt, M., Perez, M., Nieto, R., Barrientos, A., García, M., Corona, T. (2020). COMPARACIÓN DE SEIS MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DE ADN EN TEJOCOTE (*Crataegus mexicana* Moc. & Sessé). *Revista ditotecnia mexicana*. Vol. 41 no 1. <https://doi.org/10.35196/rfm.2018.1.75-79>
13. Shin, S. K., Lee, Y., Kwon, H., Rhee, J. S., & Kim, J. K. (2021). Validation of Direct Boiling Method for Simple and Efficient Genomic DNA Extraction and PCR-based Macroalgal Species

- Determination. *Journal of phycology*, 57(4), 1368-1372.
<https://doi.org/10.1111/jpy.13175>
14. Wilson I. G. (1997). Inhibition and facilitation of nucleic acid amplification. *Applied and environmental microbiology*, 63(10), 3741-3751.
<https://doi.org/10.1128/aem.63.10.3741-3751.1997>
 15. Green, M., & Sambrook, J. (2012). *Molecular Cloning: A Laboratory Manual* (4th ed.). New York: Cold Spring Harbor Laboratory Press.
 16. Ahmed, Z., Khan, M., & Qasim, M. (2019). Advances in solvent-based DNA extraction techniques: A review. *Journal of Molecular Biology Research*, 7(3), 45-58.
<https://doi.org/10.12345/jmbr.v7i3.4567>
 17. Ali, S., Rahman, Z., & Iqbal, A. (2021). Enhancing DNA yield through hybrid boiling techniques. *Biotechniques*, 71(1), 22-29. <https://doi.org/10.2144/btn2021.007>
 18. Kumar, N., Gupta, R., & Sharma, P. (2020). Custom DNA extraction kits: Tailored solutions for specific microbial needs. *Applied Biotechnology Reports*, 8(4), 67-75.
<https://doi.org/10.1234/abr.v8i4.5678>
 19. Nguyen, P. H., Tran, T. T., & Le, D. Q. (2018). Cellular resilience of *Scheffersomyces stipitis* and its impact on molecular studies. *Yeast Research Journal*, 36(6), 789-800.
<https://doi.org/10.1111/yrj.1289>
 20. Smith, J., Taylor, R., & Anderson, L. (2020). Automated DNA extraction: Trends and future perspectives. *Molecular Methods Quarterly*, 9(2), 33-41.
<https://doi.org/10.1234/mmq.v9i2.1011>



ARTÍCULO ORIGINAL

Aplicación de técnicas para identificar y caracterizar las zonas de alimentación en un yacimiento geotérmico

Ariel Francisco-Hernandez¹, Alfonso Aragón-Aguilar², Wendy Guadalupe Báez-García¹, Jorge Durán-Martínez³, Luis Guillermo Carreto-Hernandez^{1*}

¹Tecnológico Nacional de México, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Prol. Av. Palmira s/n, Col. Palmira, Cuernavaca, 62490, Morelos, México.

²Calle 7-3, Los Tarianes, Jiutepec, Morelos, 62577.

³Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora, Carretera Gutiérrez Zamora - Boca de Lima km 2.5, 93557, Gutiérrez Zamora, Veracruz, México.

Recepción 15 de noviembre 2024. Aceptación 30 de noviembre de 2024.

PALABRAS CLAVE

Zonas de alimentación,
Yacimientos, Pozos,
Recarga, Diseño de
explotación.

Resumen

La comprensión del flujo de fluidos en los yacimientos geotérmicos es esencial para optimizar la producción y garantizar la sostenibilidad del recurso. Este trabajo aborda la identificación y caracterización de las zonas de alimentación de pozos, con el fin de determinar qué secciones litológicas contribuyen al flujo y reconocer las áreas de recarga. Estas zonas son clave para entender el comportamiento del yacimiento y gestionar su explotación eficientemente. A lo largo de los años, se han utilizado diversas herramientas para caracterizar los yacimientos, las cuales han sido adaptadas a las condiciones cambiantes. Este estudio describe la evolución de dichas herramientas y propone nuevas soluciones. Una de las propuestas es un prototipo que, durante las pruebas de inyección, permite una respuesta de presión más estable, facilitando la interpretación precisa de la presión de yacimiento. Este prototipo está diseñado para resistir altas temperaturas, cumpliendo con los estándares NACE MRO 175. Además, se sugiere el uso de nanoesferas compuestas de oro o platino para determinar la arquitectura estática del yacimiento, mediante ondas electromagnéticas potenciadas que permiten visualizar las zonas de aporte a más de 2000 metros de profundidad.

El análisis de la variabilidad de los datos, como las diferencias de presión observadas en las Unidades 7 y 8, destaca la importancia de gestionar adecuadamente las áreas de mayor rendimiento. Este enfoque optimiza la producción y asegura la sostenibilidad del recurso geotérmico, garantizando su explotación eficiente y respetuosa con el medio ambiente.

KEYWORDS

Feed zones, Reservoir, Wellbore, Recharge, Exploitation design.

Abstract

Understanding fluid flow in geothermal reservoirs is essential for optimizing production and ensuring the sustainability of the resource. This study addresses the identification and characterization of well feed zones to determine which lithological sections contribute to the flow and to recognize recharge areas. These zones are crucial for understanding reservoir behavior and managing its exploitation efficiently. Over the years, different tools have been used to characterize reservoirs, and these tools have been adapted to changing conditions. This research describes the evolution of these tools and proposes new solutions. One of the proposals is a prototype that, during injection testing, allows for a more stable pressure response, facilitating accurate interpretation of reservoir pressure. This prototype is designed to withstand high temperatures, complying with NACE MRO 175 standards. Additionally, the use of gold or platinum composite nanospheres is suggested to determine the static architecture of the reservoir through enhanced electromagnetic waves, enabling visualization of feed zones at depths exceeding 2000 meters.

The analysis of data variability, such as pressure differences observed between Units 7 and 8, highlights the importance of properly managing high-performance areas. This approach optimizes production and ensures the sustainability of the geothermal resource, guaranteeing its efficient and environmentally responsible exploitation.

Introducción

El flujo de fluidos es clave en la extracción de recursos petroleros y geotérmicos, pues las fracturas y fallas en las rocas definen las rutas de migración y acumulación de estos fluidos. En el petróleo, esto permite la acumulación y recuperación del crudo; en geotermia, entender la arquitectura y permeabilidad de fallas en basalto es crucial, ya que estas controlan las vías de flujo y recarga de los yacimientos, facilitando el acceso del recurso energético (Liotta et al., 2020; Liotta et al., 2021).

La identificación de zonas de alimentación en yacimientos se refiere a la caracterización de regiones del subsuelo donde ocurre una interacción activa entre el flujo de fluidos y las formaciones geológicas permeables. Estas zonas permiten el ingreso, recarga o intercambio de fluidos, como agua, vapor o petróleo, hacia el sistema de producción. Generalmente, están asociadas con fracturas, fallas o capas altamente permeables que facilitan tanto el movimiento como el almacenamiento de los fluidos dentro del yacimiento (Axelsson & Gunnlaugsson, 2000; Glynn-Morris, 2001).

Este aspecto ha sido ampliamente estudiado en sistemas petroleros y geotérmicos. Por ejemplo, Castañeda (1981) utilizó gradientes de temperatura y presión en el campo geotérmico Cerro Prieto, combinándolos con tablas de agua para construir curvas ajustadas de presión y densidad. Este enfoque permitió identificar zonas permeables a profundidades específicas mediante la integración de datos termodinámicos, logrando una caracterización precisa de las rutas de flujo. Por otro lado, Buscato (2012) describió la realización del registro de presión, temperatura y flujo (PTS) durante la perforación o al finalizar esta etapa, empleando herramientas de memoria para controlar la temperatura del fondo y la columna hidrostática mediante la inyección de fluidos a

diferentes gastos. Glynn-Morris (2001) analizó el comportamiento dinámico de las zonas de alimentación, destacando la influencia de la diferencia de presión entre estas zonas y la columna de fluido en el pozo, identificando regimenes de flujo que permiten o impiden la entrada de fluidos al pozo. También, otra de las metodologías de caracterización dinámica es el punto pivote. Bjornsson (2004) describió esta técnica como una herramienta para identificar la mejor ubicación de una singular zona de permeabilidad o un punto entre dos zonas permeables. Aunque se relaciona generalmente con la zona de alimentación, su determinación también considera el índice de inyectividad y la entalpía del fluido. La Figura 1, ilustra esta técnica aplicada en un pozo geotérmico en Indonesia.

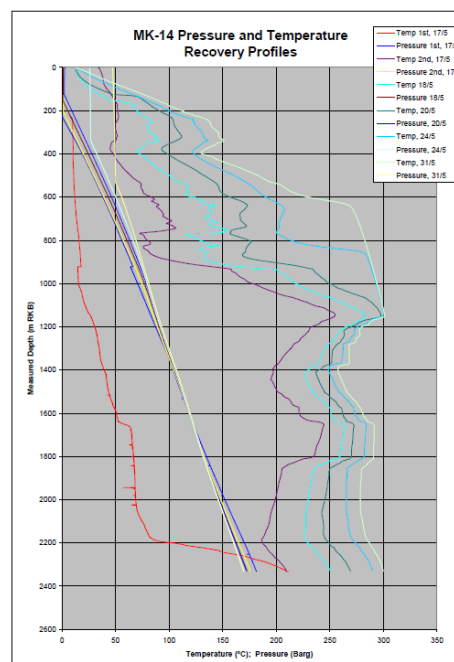


Figura 1. Perfiles de presión y temperatura del MK-14 (Hole, 2008)

En Japón, el desarrollo de simuladores multizona ha avanzado considerablemente. Desde 1993, registros PTS (Temperatura, Presión y Flujo) en el campo geotérmico de Hatchobaru han permitido identificar múltiples zonas permeables en 25 pozos en producción, con un promedio de cuatro zonas por pozo. Los análisis sugieren la coexistencia de fases líquida y gaseosa en zonas cercanas a los pozos, reflejando dinámicas de presión y fenómenos de flashing durante el flujo. A pesar de estas complejidades, el sistema se clasifica como un yacimiento predominantemente líquido (Liotta et al., 2021). Otra técnica de caracterización dinámica es el análisis de pérdidas de circulación. Sébastien Haffen (2013) empleó esta metodología para identificar y caracterizar zonas permeables durante la perforación de pozos, basándose en reportes que indicaban la cantidad de fluido de perforación perdido hacia la formación. Además, comparó los gradientes térmicos en secciones sedimentarias y tectónicas como parte del análisis. Así como también, Luis C.A. Gutiérrez Negrín caracterizó las unidades geológicas del campo geotérmico Los Humeros mediante la creación de columnas estratigráficas basadas en datos recopilados en una base de datos. Este análisis permitió identificar las secciones específicas asociadas a las zonas de aporte dentro del campo.

Aunque las metodologías tradicionales han sido exitosas en la caracterización de zonas de alimentación, persisten desafíos relacionados con la incertidumbre en los modelos estáticos y dinámicos de los yacimientos. Aguilar-Ojeda (2022) propone la adopción de enfoques alternativos que optimicen la visualización de las propiedades del subsuelo, integrando múltiples herramientas para una mejor interpretación de las zonas permeables.

En este contexto, es esencial desarrollar metodologías más precisas que permitan una evaluación detallada de parámetros como temperatura y presión en zonas de aporte (Rangel-Arista et al., 2025). Se propone desarrollar modelos de yacimiento mediante la construcción de nanoesferas como trazadores de zonas permeables, lo que aportaría al estudio “in situ” del yacimiento, permitiendo una evaluación más precisa de los parámetros de temperatura y presión.

Este trabajo busca integrar herramientas de análisis geotérmico para identificar y caracterizar zonas de alimentación en yacimientos, con un enfoque específico en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. La metodología propuesta combina datos de temperatura y presión para generar mapas isobáricos e isotérmicos, los cuales facilitan la visualización de las condiciones del yacimiento. A través de esta aproximación, se espera establecer un marco de referencia para determinar ubicaciones óptimas de perforación, optimizar la explotación del yacimiento y proponer futuras aplicaciones, como el uso de trazadores nanoestructurados.

Material y métodos

La Figura 2, describe la metodología que se desarrolló para la identificación y caracterización de zonas de alimentación de yacimiento en un campo geotérmico mexicano.

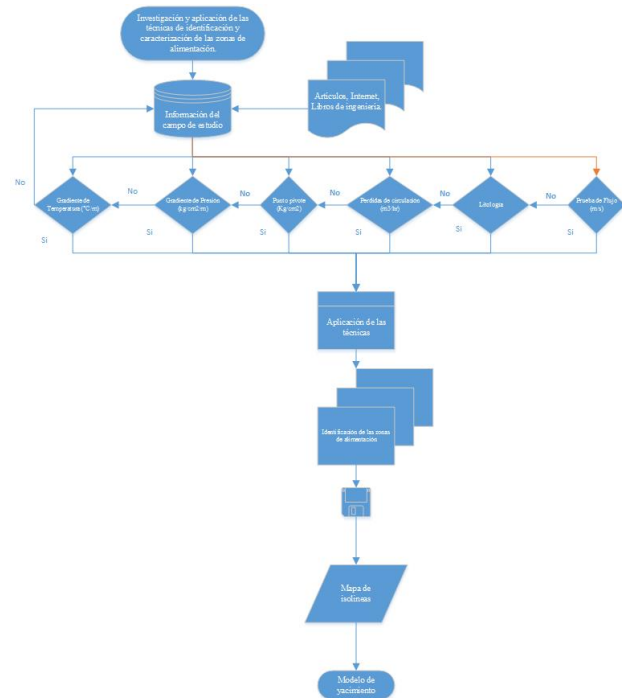


Figura 2. Diagrama de flujo para la identificación y caracterización de zonas de alimentación

Descripción de procedimiento

1. Registro de Presión-Temperatura-Flujo (PTS):

El registro PTS fue realizado para identificar las zonas de alimentación en el yacimiento geotérmico durante la perforación o al finalizar esta etapa. Se utilizó una herramienta de memoria Kuster 10 (K10), que es adecuada para registrar parámetros de presión, temperatura y flujo en condiciones de alta temperatura (hasta 320°C). La herramienta fue introducida en el pozo y comenzó a registrar los datos desde el fondo hacia la superficie. El procedimiento siguió estos pasos: a) preparación del pozo en donde antes de la medición, se estabilizó el pozo para evitar interferencias. Se aseguró la estabilidad de la temperatura y presión dentro del pozo; b) inyección controlada: se inyectaron fluidos a diferentes tasas de flujo para mantener el control sobre la columna hidrostática y la temperatura del pozo. Esto permitió obtener mediciones más precisas y representar correctamente las condiciones de operación; c) registro de datos: la herramienta K10 registró datos de presión, temperatura y flujo mientras ascendía por el pozo. Estos datos fueron analizados para identificar las zonas con variaciones significativas en presión y flujo, que corresponden a las zonas de alimentación y d) análisis de datos: los registros obtenidos fueron procesados para correlacionar las zonas de alimentación con los cambios en la presión y el flujo, permitiendo la identificación de las zonas permeables del yacimiento.

2. Punto pivote: Para localizar las zonas de alimentación y su profundidad exacta, se utilizó la técnica de identificación de punto pivote, que se basa en la interpretación de perfiles de presión. El proceso corresponde con los siguientes pasos: a) obtención de perfiles de presión: se realizaron mediciones de presión a diferentes intervalos de tiempo tras el calentamiento del pozo. Estos perfiles fueron registrados utilizando un sensor de presión adecuado para las condiciones del pozo; b)

análisis de intersección de perfiles: se identificaron las profundidades donde los perfiles de presión obtenidos se cruzaban. Estas intersecciones indicaban los puntos pivote que correspondían a las zonas de mayor inyectividad y c) validación de resultados: los resultados obtenidos mediante el análisis de los perfiles de presión se validaron mediante la comparación con datos geoquímicos y otras mediciones realizadas en el pozo.

3. Pérdida de Circulación: durante la perforación, se monitoreó la pérdida de circulación del fluido de perforación como una técnica adicional para caracterizar las zonas permeables. Este proceso fue el siguiente: a) monitoreo en tiempo real: Se registraron las pérdidas de fluido en las formaciones rocosas afectadas, utilizando un sistema de monitoreo en tiempo real y b) el análisis térmico: Se compararon los gradientes térmicos de las zonas donde se detectaron pérdidas de circulación con los perfiles de presión, para identificar correlaciones con las estructuras tectónicas presentes en el yacimiento.

4. Litología: para realizar la caracterización litológica del yacimiento, se utilizaron los datos del informe geológico de Gutiérrez Negrín. Los procedimientos fueron los siguientes: a) creación de columnas estratigráficas: los datos litológicos obtenidos se utilizaron para crear una columna estratigráfica que representara las unidades geológicas del campo y b) correlación con zonas de alimentación: se correlacionaron las unidades geológicas identificadas con las zonas de alimentación a partir de los datos de presión, temperatura y flujo obtenidos en los registros PTS.

5. Registros de Imágenes y Zonas de Alimentación: Para caracterizar las fracturas y la calidad de las zonas de alimentación, se utilizó una herramienta acústica llamada AFIT (Acoustic Formation Imaging Tool), que generó imágenes del pozo. Se consideró el siguiente proceso: a) registro acústico: la herramienta AFIT emite señales acústicas que viajan a través del fluido del pozo y se reflejan en las superficies rocosas. Estas señales permitieron generar imágenes detalladas de las fracturas presentes en el pozo; b) análisis estructural: se identificaron fracturas y conexiones interconectadas que contribuían al flujo de fluidos en el pozo y c) validación de resultados: Las fracturas detectadas por la herramienta acústica fueron comparadas con la densidad de las zonas de alimentación observadas en los registros de presión y flujo.

6. Geoquímica: el análisis geoquímico se utilizó para evaluar las alteraciones minerales causadas por el contacto agua-roca en el yacimiento. El proceso fue el siguiente: a) obtención de muestras de fluidos: se tomaron muestras de fluidos en puntos estratégicos del pozo, donde se consideraba que podría haber contacto significativo entre el agua y la roca y b) análisis en laboratorio: las muestras fueron analizadas en laboratorio para identificar minerales alterados y determinar las condiciones hidrotermales del yacimiento. Los minerales identificados proporcionaron información sobre la dinámica de los fluidos en las zonas de alimentación.

7. Análisis de Núcleo: las muestras de núcleo extraídas durante la perforación fueron utilizadas para realizar un análisis físico del yacimiento. A continuación, se detalla el proceso: a) extracción de muestras de núcleo: las muestras de núcleo se obtuvieron a diferentes intervalos de perforación, seleccionados en función de la profundidad y las características geológicas observadas y b) evaluación de propiedades físicas: las muestras fueron sometidas a pruebas de porosidad y permeabilidad para

determinar las propiedades del yacimiento y evaluar la viabilidad de explotación de los intervalos perforados.

Herramientas y equipos utilizados

Kuster 10 (K10): Herramienta de memoria empleada para registrar parámetros de presión, temperatura y flujo. Esta herramienta, capaz de soportar temperaturas de hasta 320°C, fue crucial para obtener mediciones precisas en condiciones extremas. De acuerdo con la Figura 3, la herramienta incluye componentes que envían señales de velocidad a un receptor. Estas señales, a su vez, se procesan y se muestran en un ordenador en superficie en el caso de pruebas realizadas en tiempo real, tal como se ilustra con las gráficas presentadas en la Figura 4.



Figura 3 Impulsores de las pruebas PTS (Stevens, 2000)

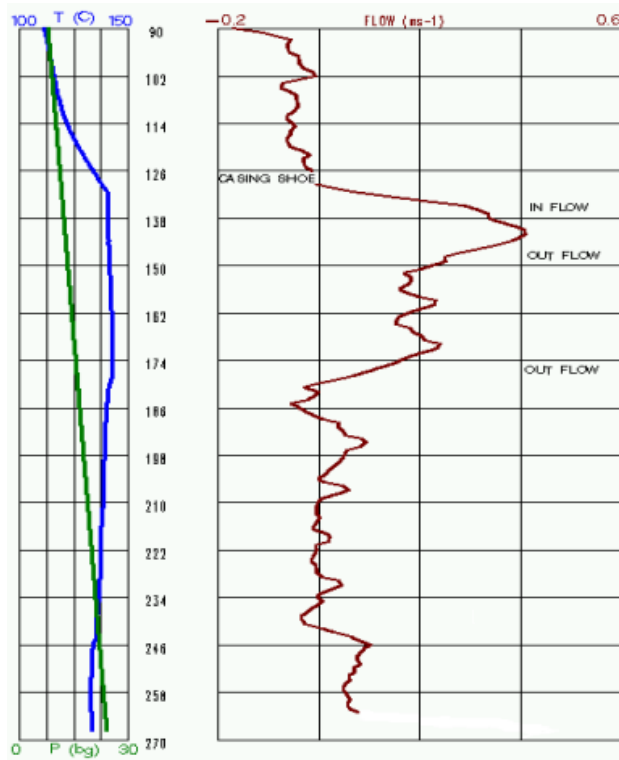


Figura 4. Registro de flujo y de temperatura (Stevens, 2000)

AFIT (Acoustic Formation Imaging Tool): Herramienta acústica para generar imágenes detalladas del pozo (Figura 5), ayudando a identificar fracturas (Figura 6) y otras

características estructurales que influyen en el flujo de fluidos.

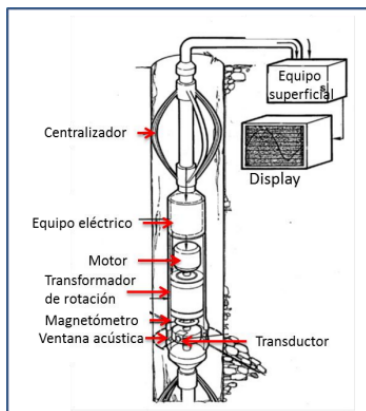


Figura 5. Componentes del registro de pared (B. Steingrímsson, 2011)

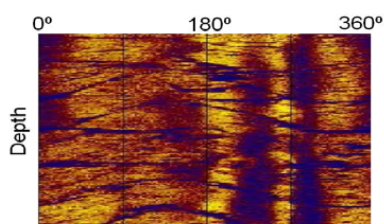


Figura 6. Registro de imagen de pared de pozo (McLean & McNamara, 2011)

Sistema de Monitoreo en Tiempo Real: Utilizado para monitorear las pérdidas de circulación del fluido de perforación durante la perforación del pozo.

Equipo de Extracción de Núcleo: Empleado para obtener muestras de núcleo en diferentes intervalos de perforación. Dentro del estudio de yacimiento, se puede extraer muestras de roca que durante la perforación se obtienen para poder analizarlas en laboratorio e identificar propiedades físicas como porosidad, permeabilidad, entre otras (Figura 7). Esto nos ayuda a evaluar el intervalo perforado, si tiene las condiciones adecuadas para la explotación y cómo poder estimularlo o estratégicamente hacer un plan de explotación adecuado a las necesidades tecnológicas.



Figura 7. Mediciones de núcleos para petrofísica básica (PEMEX, 2012).

Software de Análisis Geoquímico y estructural geológico: Surfer7.0 fue utilizado para analizar las muestras de fluidos y detectar minerales alterados que puedan indicar condiciones hidrotermales.

Condiciones de trabajo y parámetros

Temperatura: Los procedimientos se realizaron bajo condiciones de alta temperatura, hasta 320°C, que son comunes en los yacimientos geotérmicos.

Presión: Las mediciones se realizaron a profundidades donde las presiones eran elevadas, lo que requirió equipos adecuados para soportar estas condiciones.

Flujo: Las tasas de flujo fueron controladas mediante inyecciones controladas de fluidos, lo que permitió mantener condiciones estables para las mediciones.

Litología: Se consideraron las variaciones geológicas al analizar las zonas de alimentación, correlacionándolas con las unidades geológicas identificadas. Los términos más comunes en depósito epitermales serían alteración propilítica, argílica, argílica avanzada y silicificación. Se incluye la alteración filica y potásica más característica de depósitos de tipo pórfidos, puesto que en algunas ocasiones puede coexistir ambos tipos de depósitos. La Tabla 1 es un resumen breve de los minerales que se pueden utilizar como indicadores para el contacto agua-roca y térmicos.

Tabla 1 Resumen de los minerales indicadores de alteración hidrotermal

Alteración	Mineral
Propilítica	Clorita, Epidota y/o Calcita y plagioclasas albitizada.
Argílica	Caolinita, Montmorillonita, esmectita o arcilla amorfa.
Argílica avanzada	Feldespato, Caolinita y/o alunita
Silicificación	Sílice oquerosa

Datos y fuentes

Los datos obtenidos incluyen perfiles de presión, temperatura, flujo, y registros acústicos, los cuales fueron procesados para obtener una visión detallada del comportamiento del yacimiento. Las imágenes y diagramas generados durante el procedimiento, como los perfiles acústicos obtenidos con el AFIT y las columnas estratigráficas, ilustran los resultados del análisis de las zonas de alimentación.

Resultados

La evaluación de gradientes de presión y temperatura en pozos estáticos tiene como objetivo principal determinar el comportamiento de la densidad del fluido en función de la temperatura del pozo. Dado que la densidad disminuye con el aumento de la temperatura, en un pozo estacionario sin fenómenos convectivos, los gradientes de densidad y temperatura deben mantenerse constantes con la profundidad. Matemáticamente, esto se traduce en que las derivadas de densidad y temperatura respecto a la profundidad sean iguales a cero. Cualquier alteración en estos gradientes indica la presencia de fenómenos dinámicos, asociados a zonas convectivas, que no deberían presentarse en condiciones estáticas.

Este análisis se aplicó al campo geotérmico Los Humeros, uno de los más productivos de México. En este estudio, se evaluaron 52 pozos y se generaron mapas isobáricos e isotérmicos para identificar las mejores profundidades donde se localizan las zonas de alimentación. Asimismo, se caracterizó el tipo de unidad geológica presente, lo que permitió diseñar un plan de explotación adecuado a las condiciones de los registros disponibles en ese momento. La incorporación de nuevos datos y análisis de regímenes de flujo podría mejorar la precisión de las interpretaciones y reducir la incertidumbre en futuros programas de perforación.

Mapa de Isolíneas

Los datos obtenidos en los análisis de cada pozo fueron organizados en una base de datos e importados al software SURFER 7.0 para generar mapas de gradientes de presión, temperatura y unidades litológicas (Negrín, 2018). La Figura 8 presenta la distribución de los gradientes de temperatura en el campo, concentrándose la mayoría de los pozos con mayor temperatura en el noroeste, mientras que la Figura 9 ilustra el gradiente de mayor presión, donde se ubica la mayoría de los pozos. A pesar de ello, se detecta que parte del campo, especialmente en la zona centro y centro-este, tiene potencial para ser explotado, lo que sugiere la necesidad de programar pozos exploratorios para aprovechar el recurso.

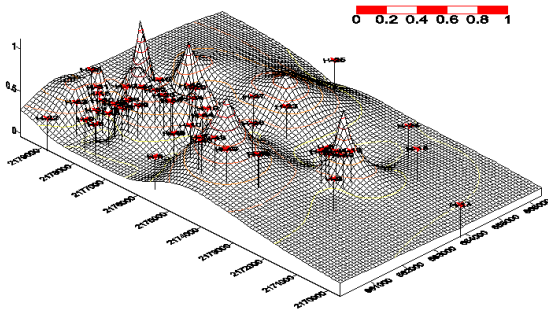


Figura 1 Distribución de gradientes de temperatura en el campo de los Humeros, Puebla.

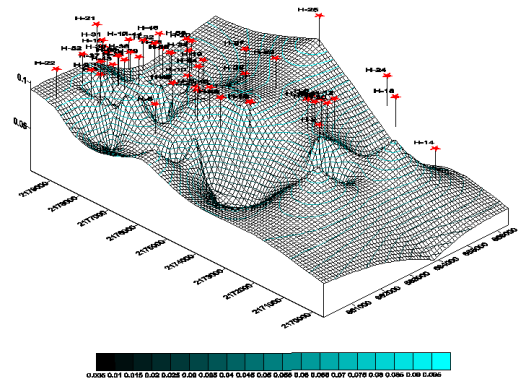


Figura 2. Distribución de presión en el campo de los Humeros, Puebla.

Presión de yacimiento

Con la metodología aplicada, el campo geotérmico Los Humeros fue discretizado, correlacionando los segmentos identificados mediante la técnica de punto pivote con las unidades productoras. Se analizaron las presiones en estos puntos, definiendo rangos de presión y profundidad asociados a estas condiciones iniciales, tal como lo hicieron algunos autores (Khosrawi, 2015).

Las unidades geológicas predominantes en el campo fueron la Unidad 7 (andesita) y la Unidad 8 (basaltos) (ver Figura 10), con una mayor incidencia en la Unidad 7, que se considera el principal objetivo de explotación. La Figura 11 representa el resultado del procesamiento de los datos de presión de un conjunto de pozos perforados hasta las profundidades de la Unidad 7, donde se obtuvo una presión promedio de 102 kg/cm². Por otro lado, la Figura 12 muestra un comportamiento más uniforme al considerar la Unidad 8, con una presión promedio de 124 kg/cm² a lo largo de más de 30 años de producción.

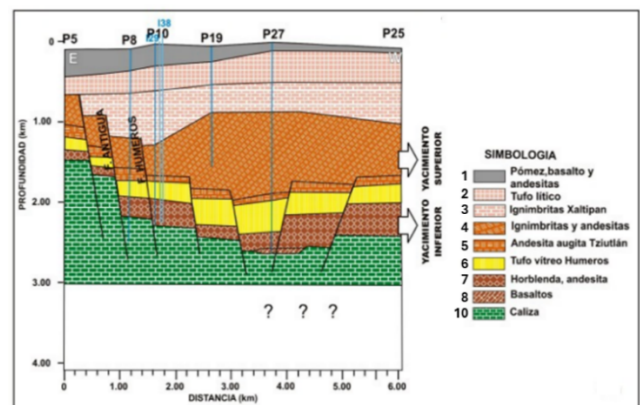


Figura 10. Unidades geológicas del campo geotérmico de Los Humeros (modificado de Cedillo, 2000, y Arellano et al., 2000).

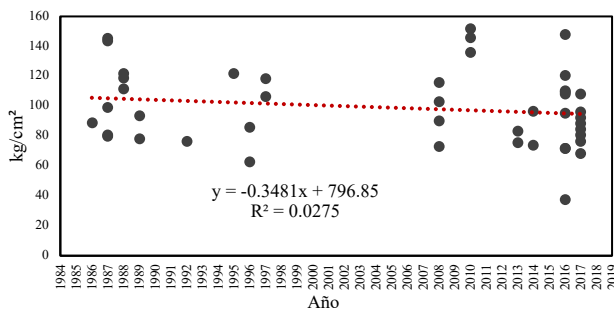


Figura 11. Historial de presión de yacimiento de la Unidad 7

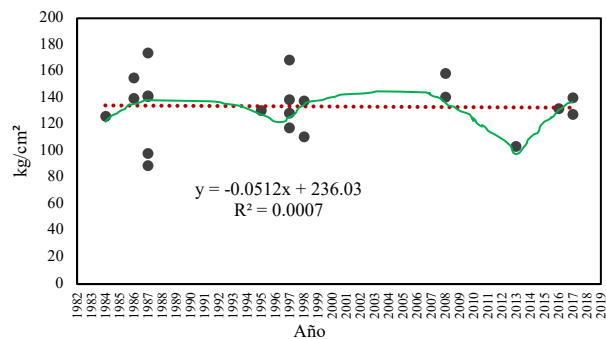


Figura 12. Grafica de Histórico de presión de yacimiento de la Unidad 8

La Figura 13 muestra la distribución de los pozos geotérmicos según su unidad de explotación en el campo geotérmico Los Humeros, indicando que la mayoría de los pozos están perforados con una terminación entre las unidades litológicas 6 y 7. Mientras que la Figura 14 se relaciona con el estudio de presión y pérdidas de circulación, donde se observa que las presiones de los pozos varían entre 105 y 155 kg/cm². Además, se desarrollaron mapas de distribución de presión por las unidades más concurridas por los pozos. La Figura 15 muestra presiones entre 95 y 125 kg/cm², correspondientes a la unidad 7, y la Figura 16 presenta un espectro entre 125 y 165 kg/cm².

Discusión

El modelo de isóneas generado a partir de los gradientes de presión y temperatura (Figura 15) permitió identificar la distribución de los parámetros obtenidos a partir del diagnóstico de las derivadas, revelando que la zona de mejor comportamiento en cuanto a la calidad del yacimiento se encuentra en la parte norte del campo geotérmico Los Humeros, Puebla. Esta información es crucial para la planificación de futuras perforaciones y la optimización de la explotación del recurso geotérmico.

El diagnóstico también mostró cómo la presión de yacimiento ha evolucionado con el tiempo, tal como se detalla en la Tabla 2. La diferencia observada entre la presión inicial en la Unidad 7 y los valores actuales es de 11 kg/cm², lo que se correlaciona con los pozos que tienen como zona de interés esa unidad, según las técnicas descritas en este estudio (Figura 13)

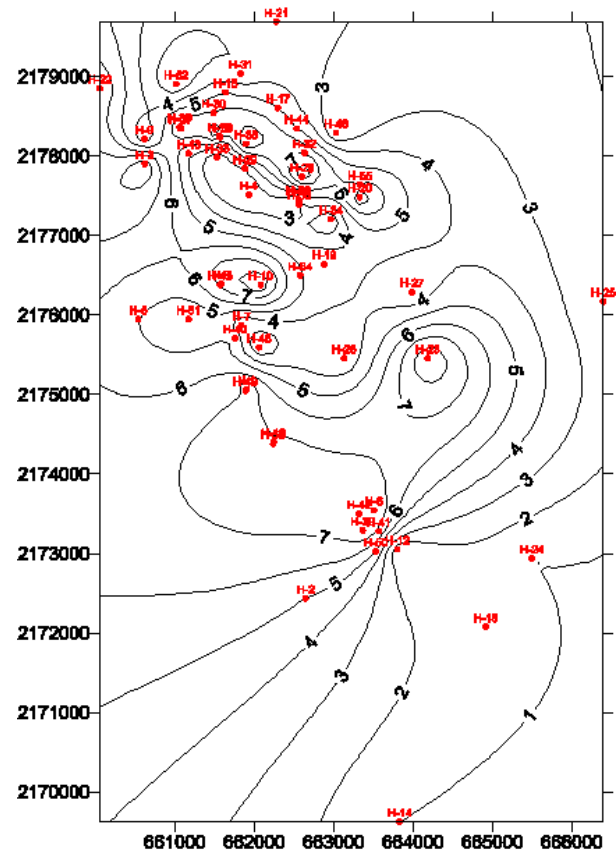


Figura 13 Distribución de los pozos geotérmicos según su unidad de explotación en el campo geotérmico Los Humeros

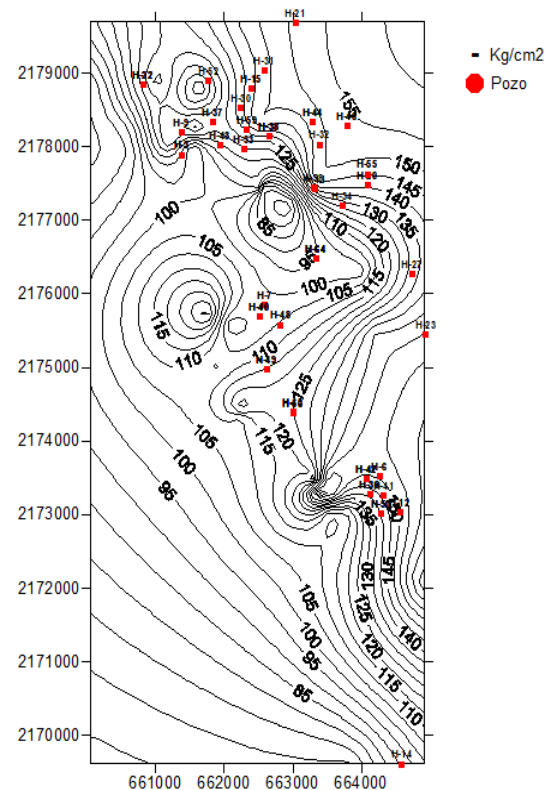


Figura 14. Mapa de distribución de presión de yacimiento en el campo geotérmico Los Humeros

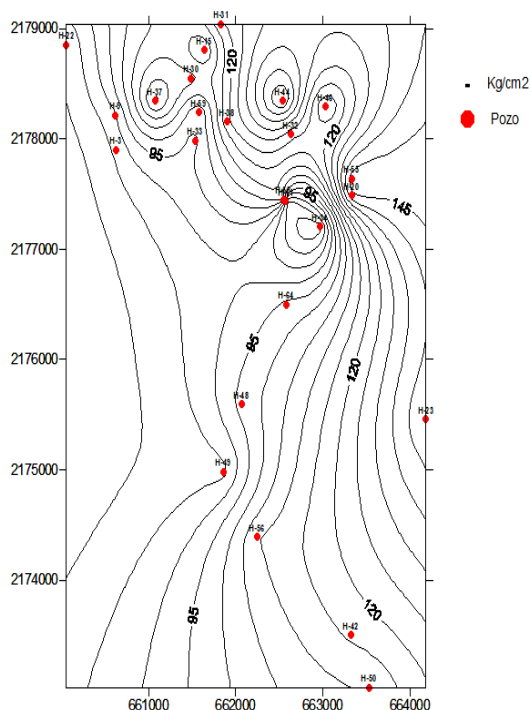


Figura 15. Mapa de distribución de presión de la Unidad 7 de acuerdo con la Litología de Negrín

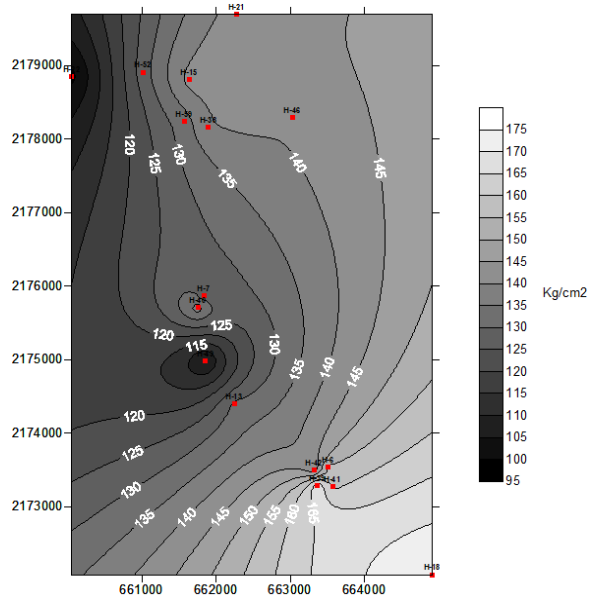


Figura 16. Mapa de presiones de la unidad 8 de acuerdo con la interpretación geológica de Negrín

En comparación, los pozos H-59, H-52 y H-46 presentan una diferencia de 1.6896 kg/cm² en sus registros, lo que nos da una presión promedio de yacimiento en la Unidad 8 de 133.60 kg/cm², según los datos de la Tabla 3. Estos resultados reflejan una variabilidad significativa en las condiciones de presión, lo que resalta la necesidad de un monitoreo constante y detallado para garantizar una explotación eficiente y sostenible del campo.

Como resultado de este análisis, se presenta una nueva metodología para evaluar zonas de interés en yacimientos geotérmicos, destacando la importancia de los registros de flujo para identificar estas zonas de manera más precisa. Esta metodología ofrece un enfoque más robusto para la

identificación de áreas de alto rendimiento dentro del campo, y su integración en futuros estudios permitirá una mejor planificación de la perforación de nuevos pozos.

En cuanto a las líneas de tendencia, el siguiente paso sería incorporar los registros de flujo para fortalecer aún más el análisis y respaldar las conclusiones obtenidas. La implementación de este enfoque podría establecer un modelo estándar para el diseño de explotaciones futuras, permitiendo una mejor integración de los resultados metodológicos en la perforación de nuevos pozos, tanto de producción como de inyección. Esto garantizaría que las futuras intervenciones en el campo se alineen con las mejores prácticas para maximizar la eficiencia y sostenibilidad de la explotación geotérmica en Los Humeros.

Tabla 1 Distribución histórica de la presión de yacimiento de la Unidad 7

Año	Presión (Kg/cm ²)	Año	Presión (Kg/cm ²)
1986	106	2002	100.67
1987	105	2003	100
1988	111.56	2004	100
1989	104.86	2005	99.87
1990	104.65	2006	99.55
1991	104.23	2007	99.21
1992	103.74	2008	98.7
1993	103.41	2009	98.1
1994	103.29	2010	97.88
1995	102.94	2011	97.69
1996	102.37	2012	97.41
1997	102	2013	97.22
1998	102	2014	96.97
1999	101.24	2015	96.65
2000	101.1	2016	96.18
2001	101	2017	95.85

Tabla 2 Distribución histórica de la presión de yacimiento de la Unidad 8

Año	Presión de yacimiento (Kg/cm ²)	Año	Presión de yacimiento (Kg/cm ²)
1984	134.4492	2001	133.5788
1985	134.398	2002	133.5276
1986	134.3468	2003	133.4764
1987	134.2956	2004	133.4252
1988	134.2444	2005	133.374
1989	134.1932	2006	133.3228
1990	134.142	2007	133.2716
1991	134.0908	2008	133.2204
1992	134.0396	2009	133.1692
1993	133.9884	2010	133.118
1994	133.9372	2011	133.0668
1995	133.886	2012	133.0156
1996	133.8348	2013	132.9644
1997	133.7836	2014	132.9132
1998	133.7324	2015	132.862
1999	133.6812	2016	132.8108
2000	133.63	2017	132.7596

Conclusiones

El análisis de los gradientes de presión y temperatura en el campo geotérmico Los Humeros ha proporcionado información crucial para optimizar la explotación del recurso geotérmico. Los resultados obtenidos permiten identificar áreas con mayor potencial de explotación y ofrecer recomendaciones para mejorar la eficiencia y sostenibilidad del campo en el futuro.

Uno de los hallazgos más relevantes es que la zona norte del campo geotérmico muestra un mayor potencial para la explotación. Este resultado, observado en los gradientes de presión y temperatura presentados en las figuras 8 y 9, sugiere que dicha área debe ser priorizada en los próximos programas de perforación y explotación. Al centrar los esfuerzos en esta zona, se podrá maximizar el rendimiento del campo y asegurar una explotación más eficiente a largo plazo.

En cuanto a las condiciones de presión, se observa una diferencia significativa entre las Unidades 7 y 8. La presión promedio en la Unidad 7 es de 100.98 kg/cm², mientras que en la Unidad 8 alcanza los 133.60 kg/cm². Esta diferencia refleja condiciones más favorables para la explotación en la Unidad 8, lo que implica que los pozos en esta unidad podrían ofrecer un mayor rendimiento y estabilidad. Este hallazgo debe ser considerado al planificar futuras perforaciones, ya que la Unidad 8 parece ser más viable para la explotación a largo plazo.

Por otro lado, el análisis de la evolución de la presión a lo largo del tiempo revela una pérdida de presión del 9.57% en la Unidad 7, desde la apertura del primer pozo en 1984 hasta los registros obtenidos en 2017, mientras que en la Unidad 8 la pérdida es solo del 1.25%. Esta diferencia resalta la mayor estabilidad de la Unidad 8, lo que sugiere que esta unidad podría ser más viable para la explotación a largo plazo. La pérdida de presión observada en la Unidad 7 subraya la importancia de realizar un monitoreo constante para asegurar que la explotación del recurso sea eficiente y sostenible.

Los índices de calentamiento para la zona norte también indican una mayor retribución del fluido del yacimiento hacia los pozos, lo que sugiere que la capacidad de producción del campo es finita, pero aún hay un potencial significativo para su explotación, siempre que se gestione adecuadamente el recurso. Este hallazgo es relevante para prever la capacidad de producción futura y garantizar que la explotación sea sostenible en el tiempo.

Además, para optimizar la explotación del campo, es necesario realizar ajustes en el arreglo de los pozos inyectoros. Esta medida permitirá aprovechar de manera más eficiente el calor transferido por las rocas y la presión, lo que, a su vez, mejorará la eficiencia del sistema. Las modificaciones en el sistema de pozos inyectoros son esenciales para maximizar el rendimiento del campo y asegurar su sostenibilidad a largo plazo.

Por último, el análisis de los datos obtenidos permitirá generar las curvas de influjo y reajustar las técnicas de pruebas de variación de presión. Estos ajustes permitirán obtener parámetros petrofísicos más precisos, lo que servirá como base para la creación de un modelo de yacimiento detallado. Este modelo será crucial para ajustar las operaciones de perforación y explotación,

teniendo en cuenta los cambios operativos en los pozos y asegurando un adecuado balance de materia.

En resumen, el estudio realizado proporciona una base sólida para optimizar la explotación de los recursos geotérmicos en Los Humeros. Los hallazgos y recomendaciones planteados permiten no solo mejorar las prácticas operativas actuales, sino también asegurar la sostenibilidad del campo geotérmico a largo plazo. Es recomendable que futuros estudios se enfoquen en el monitoreo continuo de las condiciones del yacimiento y en la implementación de tecnologías avanzadas para maximizar la eficiencia en la explotación del recurso.

Contribución de los autores

A.F.H. Curaduría de datos, análisis formal, adquisición de recursos, investigación, metodología, software, visualización, escritura del borrador original y de la revisión y corrección del borrador.

A.A.A. Conceptualización, análisis formal, investigación, recursos, supervisión, escritura del borrador original y de la revisión y corrección del borrador

W.G.B.G. Investigación, metodología, corrección del borrador.

J.D.M. investigación, metodología, corrección del borrador.

L.G.C.H. Investigación, recursos, supervisión, software, escritura del borrador original y de la revisión y corrección del borrador.

Financiamiento

El primer autor da las gracias al consorcio GEMex-CONACYT por el cual se me apoyó económicamente durante la estancia.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Presentaciones previas

Ninguna.

Referencias

1. Aguilar-Ojeda, J. A., Campos-Gaytán, J. R., Herrera-Oliva, C. S., Ramírez-Hernández, J. y Kretzschmar, T. G. (2022). Updated conceptual and numerical model of the Los Humeros Geothermal Field. *Geothermics*, 106, 102564. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102564>
2. Axelsson, G. y Gunnlaugsson, E. (2000). Long-term monitoring of high- and low-enthalpy fields under exploitation. *Proceedings of the World Geothermal Congress*.
3. Arellano, V. M., García, A., Barragán, R. M., Izquierdo, G., Aragón, A. y Pizano, A. (2000). Distribución inicial de presión y temperatura del campo geotérmico de Los Humeros. *Boletín Instituto de Investigaciones Eléctricas-Comisión Federal de Electricidad*, 450 pp.
4. Bjornsson, G. (2004). Reservoir conditions at 3-6 km depth in the Hellisheidi geothermal field, SW-Iceland, estimated by deep drilling, cold water injection, and seismic monitoring. *Stanford University*, 8.

5. Buscato, N. M. (2012). Quantifying feed zone contributions from pressure-temperature-spinner data and pressure transient analysis using WELLTESTER. United Nations University, 54.
6. Castaneda, M. (1981). Feed zones in geothermal wellbore. Stanford University, USA, 8.
7. Glynn-Morris, T. (2001). Characterizing feed zone in geothermal fields: Integrated learning from completion testing, image log, and continuous core. Energy Ltd., Wairakei Power Station, 8.
8. Gutiérrez Negrín, L. C. A. (2018). Unidades y grupos litológicos definidos en los pozos del campo geotérmico de Los Humeros. Comisión Federal de Electricidad.
9. Gutiérrez-Negrín, L. C. A. (1982). Litología y zoneamiento hidrotermal de los pozos H1 y H2 del campo geotérmico de Los Humeros, Pue. CFE, Informe Interno 23/82, Depto. Exploración. Inédito.
10. Gutiérrez-Negrín, L. C. A. y Quijano-León, J. L. (2005). Update of geothermics in Mexico. Proceedings of the World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.
11. Haffen, S., Géraud, Y., Diraison, M. y Dezayes, C. (2013). Determination of fluid-flow zones in a geothermal sandstone reservoir using thermal conductivity and temperature logs. *Geothermics*, 46, 32-41.
12. Hole, H. (2008). Geothermal well completion test. Petroleum Engineering Summer School, 5.
13. Khosrawi, K. (2015). Geothermal resource assessment by well testing methods. Proceedings World Geothermal Congress, 8.
14. Rangel-Arista, J. A., Zarrouk, S. J., Kaya, E. y Renderos Pacheco, R. E. (2025). Downflows during transient geothermal well test analysis. *Geothermics*, 125, 103158. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2024.103158>
15. Stevens, L. (2000). Pressure, temperature and flow logging in geothermal wells. Tohoku, Japan: Proceedings World Geothermal Congress 2000.
16. Liotta, D., Brogi, A., Ruggieri, G., Rimondi, V., Zucchi, M., Helgadóttir, H. M., Montegrossi, G. y Friðleifsson, G. Ó. (2020). Fracture analysis, hydrothermal mineralization and fluid pathways in the Neogene Geitafell central volcano: Insights for the Krafla active geothermal system, Iceland. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 391, 106502. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.11.023>
17. Liotta, D., Brogi, A., Árnadóttir, S., Ágústsson, K. y Thorsteinsdóttir, U. (2021). Field evidence of the interplay between rift and transform structures in the Krafla geothermal area, N-Iceland. *Geothermics*, 91, 102039. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.102039>



ARTÍCULO ORIGINAL

Desempeño mecánico de concretos modificados con agregado grueso reciclado

Pablo Julián López-González^{1*}, Oscar Moreno-Vázquez¹, Joaquín Sangabriel-Lomelí¹, Arturo Cabrera-Hernández¹, Fátima Jardines-Villagrán², José de Jesús Roa-González³

¹Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Km 1.8 Carretera a Loma del Cojolite, Misantla 93821, México.

²ICA FLUOR DANIEL S. DE R.L DE C.V, Dakota 95, Nápoles, 03810 Ciudad de México, México.

³ConstrucRoa, Veracruz, Calle Benito Juárez #703, Papatla 93419, México.

Recepción 29 de julio de 2024. Aceptación 18 de diciembre de 2024.

PALABRAS CLAVE

Agregado, Concreto, Reciclado.

Resumen

Este estudio evaluó el efecto de la sustitución parcial del agregado grueso con residuo de construcción para la obtención de resistencia a la compresión en concretos hidráulicos convencionales y modificados. Se elaboraron especímenes cilíndricos de 15 cm de diámetro x 30 cm de altura, diseñando mezclas por el método ACI 211.1 con 10%, 20% y 30% de reemplazo de la masa, y se compararon con un concreto de referencia, sometiéndolos a pruebas de resistencia a la edad de 7, 14 y 28 días de curado, con base a la normativa ONNCCE. Los resultados de las pruebas de compresión a los 28 días indicaron que la sustitución del 20% tuvo un efecto similar en la resistencia al concreto de referencia, mientras que los reemplazos del 10% y 30% en las mezclas, presentaron un aumento en la resistencia mecánica en 27% y 20% respectivamente al concreto control. Estos hallazgos resaltan la importancia del aprovechamiento de residuos de construcción para optimizar la dosificación de las mezclas para obtener un buen desempeño.

KEYWORDS

Aggregate, Concrete, Recycled.

Abstract

This study evaluated the effect of partial substitution of coarse aggregate with construction residue to obtain compressive strength in conventional and modified hydraulic concretes. Cylindrical specimens of 15 cm diameter x 30 cm height were elaborated, designing mixtures by the ACI 211.1 method with 10%, 20% and 30% mass replacement, and compared with a reference concrete, subjecting them to resistance tests at the age of 7, 14 and 28 days of curing, based on the ONNCCE regulations. The results of the compression tests at 28 days indicated that the 20% substitution had a similar effect on the resistance to the reference concrete, while the 10% and 30% replacements in the mixtures presented an increase in mechanical resistance by 27% and 20% respectively to the control concrete. These findings highlight the importance of taking advantage of construction waste to optimize the dosage of mixtures to obtain good performance.

Introducción

En la industria de la construcción, el concreto es un material compuesto elaborado a base de cemento Portland (CP). Su versatilidad lo ha posicionado como el material de elección para la elaboración de una amplia gama de infraestructuras¹. La fabricación de concreto generalmente involucra la combinación de agregados pétreos, agua y CP, a los que ocasionalmente se añaden aditivos para modular sus propiedades².

La industria de la construcción es un alto consumidor de recursos naturales provenientes de canteras y bancos de agregados con una demanda constante de materiales como arena y grava, así como el empleo de calizas y arcillas para la elaboración de cemento, lo cual ejerce una presión significativa sobre el medio ambiente y está intrínsecamente ligado a un gasto energético considerable³.

En la infraestructura al transcurrir el tiempo de vida útil, las estructuras de concreto generan una considerable cantidad de residuos sólidos^{4,5}. Estos desechos representan un desafío ambiental significativo, ocupando espacio en vertederos y demandando recursos para su disposición final. Sin embargo, estos materiales residuales poseen un valor intrínseco que puede ser aprovechado^{6,7}.

Mediante procesos de trituración y clasificación, los residuos de concreto pueden transformarse en agregados reciclados, aptos para la elaboración de concreto hidráulico sostenible⁸, contribuyendo así a la circularidad de los materiales de construcción^{9,10}, reduciendo la demanda de recursos naturales, disminuyendo la generación de desechos sólidos y abaratando los costos de construcción^{11,12}. No obstante, para adoptar esta práctica a nivel local, es crucial comprender las propiedades de estos agregados reciclados e identificar tanto las ventajas como los posibles inconvenientes que puedan aportar al nuevo concreto¹³.

La implementación y producción del concreto reciclado en la industria de la construcción se ve limitada por la necesidad de desarrollar diseños que aseguren una optimización de sus propiedades mecánicas bajo cargas estáticas y dinámicas. Por ello, es imperativo llevar a cabo investigaciones que determinen las relaciones entre la composición del concreto reciclado, los parámetros de

mezcla y las propiedades mecánicas, como es el caso de la resistencia a compresión, con el objetivo de establecer criterios de diseño robustos¹⁴.

El objetivo de este estudio es evaluar y analizar el comportamiento mecánico de probetas de concreto modificadas mediante la sustitución parcial de agregados naturales por agregados reciclados, obtenidos de concreto demolido producto de pavimentación en Poza Rica, Veracruz, México, para su posible uso en la industria de la construcción, buscando obtener un concreto modificado con comportamiento similar al convencional.

Material y métodos**Grava y arena**

Se utilizaron agregados gruesos (gravas) y finos (arenas) que cumplieron con los requisitos de muestreo alterado en la Normativa NMX-C-030-ONNCCE-2004¹⁵. En el caso del agregado grueso natural, se realizó ensayo granulométrico mediante la Norma NMX-C-077-ONNCCE-2019¹⁶ para la obtención de un Tamaño Máximo Nominal (TMN) de 19 mm, presentó una absorción de agua de 3.70%, una densidad relativa de 1.91 de acuerdo con el procedimiento de la norma NMX-C-164-ONNCCE-2014¹⁷ y un peso volumétrico de 1554 kg/m³, conforme a la norma NMX-C-073-ONNCCE-2004¹⁸. Por su parte, el agregado fino natural exhibió con base a los procedimientos de la normativa NMX-C-165-ONNCCE-2020¹⁹ una densidad de 1840 kg/m³, una absorción de agua de 12.20%, con el ensayo de su granulometría reporta un módulo de finura de 3.00 y un peso volumétrico de 1460 kg/m³.

Cemento

El cemento empleado fue Cemento Portland Compuesto, Clase Resistente 30 de Resistencia Rápida y Resistente a los Sulfatos (CPC 30 R RS), conforme a la Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2017²⁰.

Agregado reciclado

Como agregado grueso reciclado, se empleó material proveniente de la molienda primaria de concreto demolido producto de pavimentación de Poza Rica, Veracruz, México. Tras un proceso de selección y limpieza, se realizó molienda manual empleando herramienta como, martillos, cinceles y marros, realizando un tamizado por malla ¾", para seleccionar las partículas con un tamaño máximo nominal de 19 mm similar al agregado convencional, las cuales

presentaron una distribución granulométrica uniforme, además se realizaron pruebas de caracterización física como en el caso de las gravas, para la obtención de pesos volumétricos, densidad y absorción conforme a la normativa ONNCCE anteriormente descrita en el apartado de grava y arena.

Métodos experimentales

En este estudio se evaluaron mezclas de concreto, diseñadas con base a la metodología ACI 211.1 para un volumen de 1 m³ con resistencia moderada a 100 Kg/cm², haciendo el ajuste conforme al número de especímenes elaborados. En la tabla 1, se presentan las 4 mezclas utilizadas en este estudio, destacando una muestra control con materiales convencionales, la mezclas 2, 3 y 4 sustituyen el agregado grueso en un 10%, 20% y 30% de su masa por material reciclado de concreto demolido.

Tabla 1. Sustitución de agregado en mezclas de concreto

No de mezcla	Nomenclatura	% Grava	% Reciclado
1	CONTROL	100	0
2	C10%	90	10
3	C20%	80	20
4	C30%	70	30

Para determinar la resistencia a la compresión, se utilizaron 36 cilindros de concreto con dimensiones de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura. Se fabricaron 9 probetas por cada mezcla, considerando el ensayo de 3 cilindros por edad (7, 14 y 28 días), presentado en la Tabla 2.

Tabla 2. Número de especímenes para cada diseño experimental

Tipo de espécimen	Ensayo	Edad de ensayo (Días)	Número de especímenes por edad
Cilindros 150 mm x 300mm (9 por cada mezcla)	Resistencia a compresión	7, 14, 28	3

Elaboración de mezclas

Las mezclas de concreto se elaboraron de acuerdo con las proporciones indicadas en la Tabla 1. Los materiales se dosificaron en seco y se mezclaron manualmente. Posteriormente, se agregó el agua y se mezcló hasta obtener una mezcla homogénea.

Las probetas se vibraron en moldes metálicos previamente lubricados con aceite mineral para facilitar el desmolde de las probetas y se curaron a temperatura ambiente durante 24 horas. Posteriormente, se desmoldaron y sumergieron en agua a temperatura ambiente hasta las edades de ensayo (7, 14 y 28 días), conforme a la normativa NMX-C-159-ONNCCE-2016²¹.

Al alcanzar la edad de ensayo, las probetas se extrajeron de los tanques de curado y se prepararon para el ensayo de compresión.

Resistencia a compresión

Para garantizar la precisión de los resultados, se procedió a la limpieza de las superficies de las probetas, eliminando cualquier residuo o adherencia. Posteriormente, las caras de las probetas que entrarían en contacto con las placas de la máquina de ensayos se les aplicó una capa delgada de azufre para mejorar la transferencia de carga durante el ensayo con base la norma NMX-C-109-ONNCCE-2013²².

En cada espécimen se midió la resistencia a compresión ($f'c$) conforme a lo establecido en la norma NMX-C-083-ONNCCE-2014²³, a la edad de 7, 17 y 28 días de curado. En la prueba se utiliza una prensa hidráulica marca TouchSOLO con el número de serie 1887-100760, la cual en cada una de las muestras aplicó una carga de 200 kgf/seg., ubicada en el laboratorio de Ingeniería civil de la Universidad Veracruzana, campus Poza Rica.

Resultados

Las propiedades de los agregados se determinaron mediante una caracterización física completa, cuyos resultados se presentan en la Tabla 3. En ella se incluyen parámetros clave como el peso volumétrico seco suelto (PVSS) y el peso volumétrico seco compacto (PVSC), siendo este último el parámetro de diseño de mezclas debido al acomodo de las partículas, con valores de 1554.00 kg/m³ para la grava y 1282.09 kg/m³ para la arena. Asimismo, se reporta el tamaño máximo nominal (TMN) de 19 mm de la grava utilizada y el módulo de finura de la arena, que se encuentra en el intervalo de 2.2 a 3.1 como concreto estructural, cada destacar que esta medida es adimensional. Cabe destacar que propiedades físicas como la densidad y la absorción son esenciales para determinar los pesos precisos de los materiales en la dosificación por el método ACI 211.1. Estos datos resultan fundamentales para establecer las relaciones entre las propiedades de los agregados, las características y comportamiento del concreto.

Tabla 3. Valores de la caracterización de agregados

Parámetro	Arena	Grava	Reciclado
PVSS (kg/m ³)	1277.20	1490.98	775.35
PVSC (kg/m ³)	1282.09	1554.00	821.33
TMN (mm)	-	19	19
Densidad (kg/m ³)	1840.00	1911.00	1969.03
Absorción (%)	12.20	3.70	18.70
Módulo de finura	3.00	-	-

En la Tabla 4 se presentan las proporciones de las mezclas de concreto diseñadas según el método ACI 211.1, cuyo objetivo es evaluar el impacto de un material residual empleado como sustituto parcial de la grava. Las mezclas se clasificaron en una mezcla de control, sin incorporación de residuo, y tres mezclas experimentales identificadas como C10%, C20% y C30%, las cuales contienen sustituciones del 10%, 20% y 30% de grava por residuo, respectivamente.

Tabla 4. Dosificación de mezclas

Dosificación ACI 211.1					
Mezcla	Agua (kg)	Grava (kg)	Arena (kg)	CP (kg)	Residuo (kg)
CONTROL	48.89	150.55	145.03	66.30	0
C10%	48.89	135.49	145.03	66.30	15.05
C20%	48.89	120.44	145.03	66.30	30.11
C30%	48.89	105.38	145.03	66.30	45.16

En la figura 1, se observa la resistencia a la compresión de las diferentes mezclas de concreto, en función del porcentaje de sustitución del agregado por material reciclado. Todas las mezclas muestran un desarrollo inicial de resistencia adecuado, aunque las mezclas con mayor porcentaje de sustitución (C20% y C30%) presentan valores ligeramente inferiores en comparación con la mezcla de control.

La mezcla C10% tiene un comportamiento similar al de la mezcla de control, lo que sugiere que bajas proporciones de sustitución no afectan significativamente la resistencia inicial.

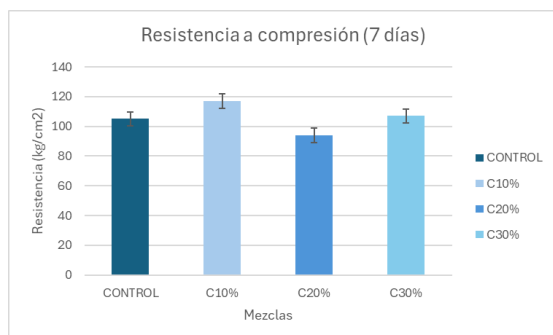


Figura 1. Resistencia a compresión a 7 días

En la figura 2, se alcanza la resistencia típica del concreto, con una tendencia decreciente al aumentar el porcentaje de sustitución. La mezcla C10% presenta valores inferiores a la mezcla de control, mientras que las mezclas C20% y C30% muestran una mejora en su resistencia.

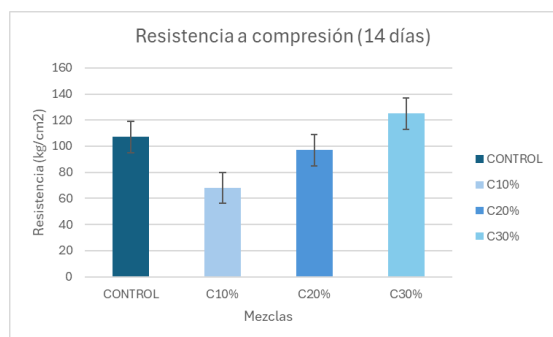


Figura 2. Resistencia a compresión a 14 días

En la figura 3 se puede observar que alrededor de los 28 días de experimentación, la mezcla con 20% de sustitución presentó una resistencia similar a la mezcla convencional,

las mezclas de 10% y 30% de sustitución presentaron una mayor resistencia a la compresión en comparación con la mezcla de control. Todas las mezclas exhiben un incremento en la resistencia a largo plazo, lo que indica un adecuado proceso de hidratación y ganancia de propiedades mecánicas. Los resultados de la Figura 3, muestran que la sustitución parcial del agregado grueso por material reciclado puede afectar la resistencia del concreto de manera positiva o negativa. Este efecto depende del porcentaje de sustitución utilizado.

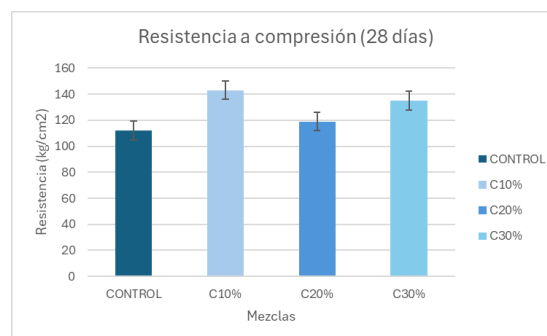


Figura 3. Resistencia a compresión a 28 días

Discusión

La utilización de concreto demolido favorece la implementación de un modelo de economía circular, al cerrar el ciclo de vida de los materiales²⁴. En este contexto, el ciclo de vida se refiere a todas las etapas de un material, desde su extracción, producción, uso, hasta su disposición final. Al reutilizar el concreto demolido, se reduce la necesidad de extraer y procesar nuevos recursos naturales, lo que disminuye la demanda de materiales vírgenes. De este modo, se evita el desperdicio, se alarga la vida útil de los materiales existentes y se disminuye el impacto ambiental, contribuyendo a un uso más eficiente y sostenible de los recursos²⁵. Al utilizar residuos como agregados en nuevas mezclas de concreto, se logran varios beneficios ambientales interrelacionados. Primero, se minimiza la generación de residuos sólidos al reutilizar materiales que de otro modo serían desechados, reduciendo la cantidad de desechos que terminan en vertederos. Esto contribuye a una gestión más eficiente de los recursos. Segundo, al reducir la extracción de materiales naturales para la producción de nuevos agregados, se conserva la biodiversidad. La minería y extracción de recursos naturales suelen tener un impacto negativo en los ecosistemas, como la destrucción de hábitats y la alteración de la fauna y flora locales. Al disminuir esta actividad, se ayuda a proteger estos ecosistemas. Finalmente, al sustituir los materiales naturales por residuos reciclados, se mitiga el impacto ambiental asociado con el proceso de extracción y procesamiento de esos recursos. Estos procesos suelen generar grandes cantidades de emisiones de CO₂ y otros contaminantes. La reutilización de materiales reduce la necesidad de procesos industriales intensivos, lo que disminuye la huella de carbono y otros impactos negativos en el medio ambiente²⁶.

Los resultados obtenidos en este estudio destacan la complejidad de diseñar mezclas óptimas de concreto reciclado, evidenciando la influencia de factores como la proporción de sustitución de agregados y las características del material reciclado. Estos hallazgos son cruciales para avanzar en el desarrollo de concretos sostenibles, alineándose con los objetivos de la investigación de optimizar el rendimiento del concreto utilizando materiales

reciclados sin comprometer sus propiedades mecánicas. La interacción entre variables como el porcentaje de material reciclado, la granulometría y la relación agua-cemento influye significativamente en las propiedades finales del concreto ²⁷. Esto se evidenció en las resistencias a la compresión obtenidas para las mezclas con 10% y 30% de sustitución, las cuales superaron las resistencias de la mezcla de control.

Los porcentajes de mezcla obtenidos en este estudio coinciden con los hallazgos de investigaciones previas, que sugieren que un reemplazo de hasta el 30% del agregado convencional por material reciclado puede alcanzar un buen desempeño en términos de resistencia a la compresión ²⁸. Sin embargo, la disminución en la resistencia observada a un 20% de sustitución podría atribuirse a factores como la morfología irregular de las partículas recicladas, la variabilidad en la calidad de los materiales reciclados y la mayor capacidad de adsorción de agua de estos agregados. Estudios previos han indicado que las partículas recicladas, debido a su forma y textura áspera, pueden presentar una menor adherencia con la matriz cementicia, lo que afecta negativamente la resistencia del concreto ²⁹. Además, la mayor capacidad de absorción de agua de los agregados reciclados puede alterar la relación agua-cemento, reduciendo la eficiencia del proceso de hidratación y, por ende, la resistencia final del concreto ³⁰. Los estudios futuros deben centrarse en una caracterización más detallada de los materiales reciclados y en la optimización de las dosificaciones, con el fin de mejorar la predictibilidad del comportamiento del concreto reciclado.

Conclusiones

Este estudio examina el comportamiento de la resistencia a la compresión de concreto hidráulico elaborado con agregado reciclado. Los resultados obtenidos indican que, al reemplazar entre un 10% y un 30% del agregado convencional por residuo de construcción, es posible alcanzar resistencias a la compresión comparables a las de las mezclas convencionales, cuyo diseño está orientado a obtener una resistencia de 100 kg/cm². Es particularmente destacable que las mezclas con un 10% y un 30% de sustitución de agregado reciclado mostraron un aumento significativo en la resistencia mecánica, alcanzando incrementos del 27% y 20%, respectivamente, en comparación con la mezcla de control. Estos hallazgos demuestran que, dentro de este rango de sustitución, el concreto reciclado no solo mantiene un rendimiento adecuado, sino que incluso mejora en algunas proporciones, lo que subraya su viabilidad como alternativa sostenible y rentable en la construcción. Al utilizar residuos de construcción como agregado, se puede reducir la demanda de recursos naturales sin comprometer las propiedades mecánicas esenciales del concreto, lo que refuerza el potencial del concreto reciclado como una opción viable para aplicaciones estructurales.

Contribución de los autores

PJLG, redacción, diseño de mezcla.
OMV, diseño y recolección de datos.
JSL, análisis estadístico y redacción.
ACH, redacción y análisis estadísticos.
FJV, trabajo de campo y ensayos en estado fresco.
JJRG, trabajo de campo y ensayos en estado endurecido.

Financiamiento

El primer autor da las gracias al consorcio GEMex-CONACYT por el cual se me apoyó económicamente durante la estancia.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Presentaciones previas

Ninguna.

Referencias

1. Kujawa, W., Olewnik-Kruszkowska, E., & Nowaczyk, J. (2021). Concrete strengthening by introducing polymer-based additives into the cement matrix—A mini review. *Materials*, 14(20), 6071.
2. Ponce del Cid, C. A. (2022). Evaluación comparativa de la huella de carbono en la producción de cemento puzolánico y cemento a base de arcillas activadas térmicamente en una empresa cementera de Guatemala (Doctoral dissertation, Universidad de San Carlos de Guatemala).
3. Montoya, G. A. P. (2024). Innovación para construcción sostenible: estudio piloto de concreto modificado con plástico reciclado. *Innovare Revista de ciencia y tecnología*, 13(1), 2-7. Kryeziu, D., Selmani, F., Mujaj, A., & Kondi, I. (2023). Recycled concrete aggregates: a promising and sustainable option for the construction industry. *Journal of Human, Earth, and Future*, 4(2), 166-180.
4. Akhtar, A., & Sarmah, A. K. (2018). Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. *Journal of Cleaner Production*, 186, 262-281.
5. Nalon, G. H., Santos, R. F., de Lima, G. E. S., Andrade, I. K. R., Pedroti, L. G., Ribeiro, J. C. L., & de Carvalho, J. M. F. (2022). Recycling waste materials to produce self-sensing concretes for smart and sustainable structures: A review. *Construction and Building Materials*, 325, 126658.
6. Bohórquez Pérez, P. A. (2023). Análisis de la viabilidad para la producción sostenible de concreto a partir de agregados reciclados, provenientes de residuos de

- construcción y demolición en Prevesa SAS-Girón, Santander (Master's thesis, Escuela de Ingeniería).
7. Bonoli, A., Zanni, S., & Serrano-Bernardo, F. (2021). Sustainability in building and construction within the framework of circular cities and european new green deal. The contribution of concrete recycling. *Sustainability*, 13(4), 2139.
 8. Kirthika, S. K., Singh, S. K., & Chourasia, A. (2020). Alternative fine aggregates in production of sustainable concrete-A review. *Journal of cleaner production*, 268, 122089.
 9. Makul, N., Fediuk, R., Amran, M., Zeyad, A. M., Murali, G., Vatin, N., ... & Vasilev, Y. (2021). Use of recycled concrete aggregates in production of green cement-based concrete composites: A review. *Crystals*, 11(3), 232.
 10. Collivignarelli, M. C., Cillari, G., Ricciardi, P., Miino, M. C., Torretta, V., Rada, E. C., & Abbà, A. (2020). The production of sustainable concrete with the use of alternative aggregates: A review. *Sustainability*, 12(19), 7903.
 11. Wang, B., Yan, L., Fu, Q., & Kasal, B. (2021). A comprehensive review on recycled aggregate and recycled aggregate concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 171, 105565.
 12. Reis, G. S. D., Quattrone, M., Ambrós, W. M., Grigore Cazacliu, B., & Hoffmann Sampaio, C. (2021). Current applications of recycled aggregates from construction and demolition: A review. *Materials*, 14(7), 1700.
 13. Menna, C., Mata-Falcón, J., Bos, F. P., Vantighem, G., Ferrara, L., Asprone, D., ... & Kaufmann, W. (2020). Opportunities and challenges for structural engineering of digitally fabricated concrete. *Cement and Concrete Research*, 133, 106079.
 14. Martínez-Molina, W., Torres-Acosta, A. A., Alonso-Guzmán, E. M., Chávez-García, H. L., Hernández-Barrios, H., Lara-Gómez, C., ... & González-Valdéz, F. M. (2015). Concreto reciclado: una revisión. *Revista Alconpat*, 5(3), 235-248.
 15. ONNCCE. (2004). *NMX-C-030-ONNCCE-2004: Industria de la Construcción - Agregados - Muestreo*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
 16. ONNCCE. (2019). *NMX-C-077-ONNCCE-2019: Industria de la Construcción - Agregados para Concreto - Análisis Granulométrico - Método de Ensayo*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
 17. ONNCCE. (2014). *NMX-C-164-ONNCCE-2014: Industria de la Construcción - Agregados - Determinación de la Densidad Relativa y Absorción de Agua del Agregado Grueso*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
 18. ONNCCE. (2004). *NMX-C-073-ONNCCE-2004: Industria de la Construcción - Agregados - Masa Volumétrica - Método de Prueba*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
 19. ONNCCE. (2020). *NMX-C-165-ONNCCE-2020: Industria de la Construcción - Agregados - Determinación de la Densidad Relativa y Absorción de Agua del Agregado Fino*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
 20. ONNCCE. (2017). *NMX-C-414-ONNCCE-2017: Industria de la construcción - Cementantes hidráulicos - Especificaciones y métodos de ensayo*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
 21. ONNCCE. (2016). *NMX-C-159-ONNCCE-2016: Industria de la Construcción - Concreto - Elaboración y Curado de Especímenes de Ensayo*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
 22. ONNCCE. (2013). *NMX-C-109-ONNCCE-2013: Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Cabeceo de Especímenes*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
 23. ONNCCE. (2014). *NMX-C-083-ONNCCE-2014: Industria de la Construcción - Concreto - Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes - Método de Ensayo*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
 24. Marsh, A. T., Velenturf, A. P., & Bernal, S. A. (2022). Circular Economy strategies for concrete: implementation and integration. *Journal of Cleaner Production*, 362, 132486.
 25. Zhang, Z., Malik, M. Z., Khan, A., Ali, N., Malik, S., & Bilal, M. (2022). Environmental impacts of hazardous waste, and management strategies to reconcile circular economy and eco-sustainability. *Science of The Total Environment*, 807, 150856.
 26. Mistri, A., Dhami, N., Bhattacharyya, S. K., Barai, S. V., Mukherjee, A., & Biswas, W. K. (2021). Environmental implications of the use of bio-cement treated recycled aggregate in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 167, 105436.
 27. Kou, S. C., Poon, C. S., & Etxeberria, M. (2011). Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete. *Cement & Concrete Composites* 33, 286-291
 28. Cabral, A. E. B., Schalch, V., Dal Molin, D. C. C., & Ribeiro, J. L. D. (2010). Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 24(4), 421-430.
 29. Smith, J., et al. (2015). "Effects of recycled aggregates

on the mechanical properties of concrete." *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(4), 04015034.

30. Lee, H., et al. (2017). "Impact of water absorption of recycled aggregates on the concrete mix design." *Materials and Structures*, 50(1), 98.

Instrucciones para autores

Revista Multidisciplinaria de Ciencia, Innovación y Desarrollo REMCID es el órgano oficial de la Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora, Veracruz. Acepta para publicación artículos originales, de revisión, especiales, consensos, cartas científicas, y cartas al editor. La revista publica dos números al año, de manera semestral, con carácter académico que incluye resultados de investigaciones con contenidos distintos.

El Comité Editorial evalúa los trabajos recibidos mediante dictamen tipo doble ciego, es decir omitiendo el nombre del autor o autores y conservándose tanto su anonimato como el del dictaminador. Todos los artículos enviados que se inscriban dentro del perfil temático de la revista serán considerados, sin que ello implique obligatoriedad de su publicación ni devolución del material enviado. Únicamente se recibirán documentos apegados a las instrucciones para autores. La dirección de la revista se reserva el derecho de realizar los cambios editoriales necesarios. Las aportaciones originales que son aceptadas por el Comité Editorial serán publicadas y pasarán a ser propiedad de la revista. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial, sin la autorización por escrito de los editores. Los trabajos deberán enviarse a: remcid@utgz.edu.mx

Preparación y envío de manuscritos

1. Los manuscritos deberán enviarse a través del correo electrónico a: remcid@utgz.edu.mx
2. Todo el trabajo (incluyendo página frontal, resúmenes y títulos de figuras) deberá estar escrito en la plantilla sin modificar los márgenes y formato en general.

3. Página frontal

Deberá contener:

- *Título del trabajo*: breve y descriptivo.
- *Autores*: serán mencionados con nombre completo o utilizando el formato de guión en los apellidos.
- *Filiaciones*: serán referidas con números (1, 2, 3,) como superíndices. Ejemplo: Rodrigo Rosas¹, Victoria Zarco² y Humberto Estrella-Espinoza^{3*}. Las filiaciones (institución donde obtuvo su grado de estudios o bien lugar donde labora) se deberán colocar en el orden siguiente: facultad y/o universidad / ciudad, provincia y país. No se colocarán cargos académicos ni laborales en las filiaciones de los autores.

- *Correspondencia*: Se pondrá asterisco en el autor para correspondencia. Asimismo deberá anotar un correo electrónico.

4. Resúmenes estructurados

Para artículos originales, de revisión, especiales y cartas científicas, el resumen debe estar escrito en español e inglés estructurado como sigue:

Español	Inglés
Resumen	Abstract
Palabras clave	Keywords

Deberán ser escritos en forma concreta, el cual presente una síntesis adecuada del trabajo.

- No usar citas bibliográficas.
- Serán concisos (máximo 250 palabras).
- En la sección de palabras clave y keywords se anotarán de 3 a 6 palabras clave.
- Los decimales se escribirán con punto (.).
- Las unidades de miles se escribirán sin coma, solo con separación.

5. Formato del cuerpo del manuscrito

5.1 Artículo original o revisión: máximo 20 páginas.

Constará de los siguientes apartados:

1. Introducción
2. Material y métodos
3. Resultados
4. Discusión
5. Conclusiones
6. Contribución de los autores
7. Financiamiento
8. Conflicto de intereses
9. Presentaciones previas
10. Referencias
11. Tablas, figuras, imágenes, diagramas, gráficos, con título

Las abreviaturas serán explicadas la primera vez que se empleen y se utilizarán a lo largo de todo el manuscrito.

En el caso de artículos de revisión, la introducción puede contener implícitamente métodos, resultados y discusión. De igual forma se puede considerar la estructura marcada en el punto 5.1.

5.2 Carta científica: máximo 10 páginas.

1. Introducción
2. Presentación
3. Discusión
4. Referencias
5. Tablas, figuras, imágenes, diagramas, gráficos, con título. Títulos de tablas

6. Financiamiento y conflicto de intereses

Podrán llevar los apartados que el autor disponga.

Financiamiento (obligatorio): si no hay se pondrá "No se recibió ningún patrocinio para llevar a cabo este artículo".

Conflicto de intereses (obligatorio): si no lo hay, se pondrá la siguiente frase: El/Los autor(es) declara(n) no tener conflicto de intereses.

Agradecimientos (opcional).

7. Referencias

Se ordenarán y enumerarán por orden de aparición en el texto, con la acotación respectiva en superíndice, deben ir antes de los signos de puntuación si es el caso.

Las referencias se presentarán en formato APA con límite para artículos originales de 25 a 30; en artículos de revisión de 25 a 35; en artículos especiales de 20 a 25 y en cartas científicas de 15 a 20 citas bibliográficas.

8. Tablas y figuras

- Se identificarán en forma progresiva con números arábigos de acuerdo con el orden de aparición en el texto.
- Los títulos deberán ir en su parte superior (encabezado), indicando el número de la figura correspondiente (con arábigos) y señalando al final, por orden alfabético, las abreviaturas empleadas, con su definición correspondiente.
- Las figuras se deben entregar en formato TIFF, JPG, GIF, PNG, en alta resolución (300 dpi o más). No se aceptan archivos en PDF.
- Entre figuras y tablas no debe exceder de 10.

9. Motivos de rechazo

El incumplimiento de estas normas podrá ocasionar el rechazo del trabajo en cualquier momento del proceso editorial.