

Año 12, Número 2, 2025

REA>XION

Ciencia y tecnología universitaria

XXXV

ISSN: 2007 - 7750

Dióxido de silicio obtenido de cáscara de arroz como material candidato para almacenamiento de energía

Clasificación de emociones con reconocimiento facial utilizando aprendizaje profundo

Efecto de la aplicación de cuatro tratamientos en el cultivo de cilantro (*Coriandrum sativum*) Pakistán

Propuesta de reducción en los defectos de la línea C08 Moldeo mediante herramientas de control

Gestión de recursos hídricos: un análisis sobre la situación del agua en Guanajuato



comiterevista@utleon.edu.mx

reaxion.utleon.edu.mx



UTL

LEÓN

Directorio

Luis Ignacio Sánchez Gómez

Secretario de Educación de Guanajuato

José Christian Padilla Navarro

Rector de la Universidad Tecnológica de León

José Ernesto López Juárez

Secretario Académico

Martha Betzabé Murillo

Hernández

Directora de Desarrollo Académico y Docente

José de Jesús Mendoza Rivas

Director de Económico Administrativo

Eduardo Pérez Gutiérrez

Director de Tecnologías Emergentes Industriales e Informáticas

Ma. de Jesús Armenta Ortiz

Subdirectora de Económico Administrativo

José Jaime Ávila Morales

Subdirector de la Unidad Académica del Sureste

Laura Paulina Badillo Canchola

Subdirectora de Tecnologías Emergentes Industriales e Informáticas

Adolfo Israel Lomelí García

Subdirector de Industrial Sustentable

Comité Editorial

Liliana González Arredondo

Directora Editorial

Pedro Andrés Meza Torres

Aseguramiento de calidad

Daniel Israel Rodríguez Gante

Diseño web

Laura Elizabeth Martínez Olaz

Diseño gráfico y editorial

María de la Luz García Cárdenas

Corrección Editorial

Jessica Sandoval Palomares

Representante de Área de la Dirección de Desarrollo Académico y Docente

Ma. Guadalupe Serrano Torres

Representante de Área de la Dirección Económico-Administrativa

Roberto Gutiérrez Guerra

Representante de Área de la Dirección de Tecnologías Emergentes Industriales e Informáticas

Anahí Torres Tinoco

Representante de Área de la Dirección de Tecnologías Emergentes Industriales e Informáticas

J. Guadalupe Santos Gómez

Representante de Área de la Dirección de Tecnologías Emergentes Industriales e Informáticas

Mayra Verónica Barrera

Figueroa

Representante de la Unidad Académica del Sureste





Carta editorial

Reacción Año 12, número 2

En el trayecto continuo de la investigación y el desarrollo tecnológico, la revista Reacción contribuye en la divulgación de hallazgos y el entendimiento de los avances. En torno a ese propósito, es un gusto presentar la trigésima quinta edición, la cual contiene cinco contribuciones (cuatro del eje de las Ingenierías y una de Biotecnología y Ciencias Agropecuarias).

Para iniciar, en el actual contexto de alta demanda de energía para conservar el funcionamiento de vehículos eléctricos y dispositivos electrónicos, aunado a la necesidad de actuar sustentablemente, en **Dióxido de silicio obtenido de cáscara de arroz como material candidato para almacenamiento de energía**, se demuestra que las partículas obtenidas de este residuo agroindustrial tienen características fisicoquímicas y estructurales (pureza, tamaño, forma de los cristales), que posibilitan el uso de esta materia prima en baterías de iones de litio (que, en cuanto a almacenamiento energético, son de las tecnologías más avanzadas en la actualidad).

El segundo artículo trata acerca del reconocimiento automático de las emociones, y es de relevancia al considerar que en la sociedad del siglo XXI este tema impacta en ámbitos diversos como la psicología, mercadotecnia, salud, seguridad informática, interacción entre humanos y máquinas. En **Clasificación de emociones con reconocimiento facial utilizando aprendizaje profundo** se explica cómo se eligió, aplicó y evaluó un modelo computacional para la detección automática de estados afectivos (enojo, felicidad, neutralidad, tristeza, sorpresa) a través del análisis del rostro de personas.

En cuanto al eje de la Biotecnología y Ciencias Agropecuarias, en la investigación **Efecto de la aplicación de cuatro tratamientos en el cultivo de cilantro (*Coriandrum sativum*) Pakistán**, se comprueba que, en el caso de esta hierba aromática de amplia utilización en diversas cocinas del mundo, los abonos orgánicos pueden tener un impacto productivo, y en algunos parámetros (altura, número de foliolos, biomasa fresca total) incluso mejor que los fertilizantes de origen sintético. Estos hallazgos son particularmente importantes al considerar que México es uno de los principales productores de esta planta de uso culinario.

Por lo que se refiere a la gestión de calidad, el artículo **Propuesta de reducción en los defectos de la línea C08 Moldeo mediante herramientas de control**, describe el empleo de técnicas de ingeniería, tales como el Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF), el Plan de Control (CP) y la matriz de acciones correctivas, y cómo la conjunción de estas herramientas, aunada al trabajo interdisciplinario entre las áreas de una empresa de inyección de plástico, pueden resultar en una mejora importante del rendimiento e incrementar el nivel de satisfacción de las y los clientes.



Para finalizar, en el artículo **Gestión de recursos hídricos: un análisis sobre la situación del agua en Guanajuato**, por medio de la aplicación de la ciencia de datos, se presenta un análisis de estadística descriptiva sobre los volúmenes utilizados de aguas de fuentes residuales, subterráneas, superficiales y de zonas federales, tanto a nivel estatal como por cada uno de los cuarenta y seis municipios que integran la entidad; así como el uso de este bien en los sectores agropecuario, potable (consumo humano), ecológico, hidroeléctrico e industrial. Su estudio es un llamado a que sociedad y gobierno definan estrategias que permitan asegurar el suministro equitativo del líquido vital.

Es así como la exploración que realizan las y los autores de las colaboraciones contenidas en este número de la revista, conduce a la reflexión y la acción sobre opciones que mejoren la solución ante los desafíos que plantea la necesidad de un entorno sustentable, productivo, seguro y con mejor calidad.

A t e n t a m e n t e .

Comité Editorial de Reacción



Índice

7. Dióxido de silicio obtenido de cáscara de arroz como material candidato para almacenamiento de energía

19. Clasificación de emociones con reconocimiento facial utilizando aprendizaje profundo

36. Efecto de la aplicación de cuatro tratamientos en el cultivo de cilantro (*Coriandrum sativum*) Pakistán

47. Propuesta de reducción en los defectos de la línea C08 Moldeo mediante herramientas de control

59. Gestión de recursos hídricos: un análisis sobre la situación del agua en Guanajuato

REAXXION



Dióxido de silicio obtenido de cáscara de arroz como material candidato para almacenamiento de energía

Silicon dioxide obtained from rice husk as a candidate material for energy storage

Germán Pérez-Zúñiga, Juan de Anda-Suárez y José Luis López-Ramírez /

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Purísima del Rincón

Resumen

Este trabajo presenta un estudio sobre la obtención de dióxido de silicio (SiO_2) a partir de cáscara de arroz, un residuo agroindustrial, y su posible aplicación como ánodo en baterías de ion de litio para almacenamiento de energía. La síntesis de SiO_2 a partir de cáscara de arroz se realizó mediante un proceso que involucra una combinación de tratamientos ácidos y térmicos. Los materiales se caracterizaron mediante microespectroscopía Raman, para determinar los modos de vibración del SiO_2 . En microscopía electrónica de barrido (SEM) se observaron partículas con morfología de barras y amorfas. Los patrones de difracción de rayos X (XRD) confirman que solo está presente la fase del SiO_2 , y el análisis Rietveld confirma el tamaño nanométrico de la cristalita. En conclusión, la cáscara de arroz es una materia prima prometedora para producir SiO_2 de alta pureza y su posible uso como ánodo en baterías de ion de litio.

Palabras clave: dióxido de silicio, almacenamiento de energía, cáscara de arroz.

Abstract

This work presents a study on the production of silicon dioxide (SiO_2) from rice husk, an agro-industrial waste, and its possible application as an anode in lithium-ion batteries for energy storage. The synthesis of SiO_2 from rice husk was carried out through a process involving a combination of acid and thermal treatments. The materials were characterized using Raman microspectroscopy to determine the vibration modes of SiO_2 . In scanning electron microscopy (SEM) revealed particles with rod and amorphous morphology. X-ray diffraction (XRD) patterns confirm that only the SiO_2 phase is present, and Rietveld analysis confirms the nanometric size of the crystallite. In conclusion, rice husk is a promising raw material for producing high-purity SiO_2 and its possible use as an anode in lithium-ion batteries.

Keywords: silicon dioxide, energy storage, rice husk.



Introducción

El uso excesivo de combustibles fósiles en la generación de energía ha generado grandes cantidades de emisiones de dióxido de carbono (CO_2), que son la principal causa de los problemas ambientales que se tienen en la actualidad. Por ello, se están implementando sistemas de generación de energía de fuentes renovables como la fotovoltaica, eólica y geotérmica, por mencionar algunas¹. Sin embargo, estas tecnologías tienen la desventaja de depender de las condiciones climáticas, y para compensarlo suelen emplearse sistemas de almacenamiento de energía. Las baterías de iones de litio (BIL) son la mejor tecnología que se tiene actualmente y su desarrollo es uno de los grandes retos para incrementar el uso de fuentes de generación de energías renovables².

La ciencia y tecnología de materiales han alcanzado un punto culminante en la era moderna, y uno de los campos más impactantes de esta revolución se encuentra en el desarrollo en las BIL. Estos dispositivos de la ingeniería han transformado la forma en que viven las personas día con día, alimentando los dispositivos electrónicos móviles, hasta ser una de las tecnologías principales para la revolución de los vehículos eléctricos. En el fondo de esta innovación se encuentra una comprensión profunda de los materiales utilizados en las BIL y, no menos importante, las características de síntesis y obtención³.

Las BIL, a diferencia de sus predecesoras, ofrecen una densidad de energía mucho mayor, ya que son más ligeras y menos volumétricas, lo que las convierte en una de las mejores opciones para una gran variedad de aplicaciones⁴. El desarrollo de materiales, junto con avances en la nanotecnología, han permitido aumentar la capacidad y la eficiencia de las BIL, desarrollando electrolitos sólidos y polímeros conductores que reducen el riesgo de cortocircuitos y sobrecalentamiento, problemas comunes en las baterías de iones de litio.

El desarrollo de nuevos materiales ha llevado a la producción de baterías más seguras y confiables, que son fundamentales para la expansión de la industria de vehículos eléctricos y el almacenamiento de energía a gran escala. Además, las BIL también están desempeñando un papel vital en la transición hacia fuentes de energía renovable⁵.

Hoy en día, las investigaciones continúan y prometen avances en el desarrollo de materiales aún más eficientes, hasta la creación de tecnologías que incluso beneficien el reciclaje y recuperación de dichos materiales. Por ello, aquí se presenta la propuesta de síntesis de un material de SiO_2 como posible material anódico en BIL. La propuesta consiste en obtener partículas de dióxido de silicio a partir de la cáscara de arroz y aprovechar la capacidad teórica de 1965 mAhg^{-1} del SiO_2 que es muy superior a los 376 mAhg^{-1} del grafito comercial⁶.



Planteamiento del problema Objetivo

En la actualidad, la demanda energética y la preocupación por el medio ambiente, así como la búsqueda de tecnologías sostenibles y eficientes, pone en el centro de atención las tecnologías de almacenamiento de energía. Las BIL son ampliamente utilizadas en dispositivos electrónicos y vehículos eléctricos, por lo que se requiere de materiales que sean económicos, seguros y no dañen el medio ambiente⁷.

Las nanopartículas de dióxido de silicio (SiO_2) son una opción dentro del espectro de materiales prometedores en aplicaciones de almacenamiento de energía, debido a sus propiedades excepcionales, principalmente su alta capacidad y estabilidad química (seguridad). La síntesis de SiO_2 a partir de recursos renovables, como la cáscara de arroz, no solo aborda la necesidad de encontrar fuentes sostenibles, sino que también contribuye a la reducción y aprovechamiento de residuos (en este caso, agrícolas). Los principales productos que se obtienen de la cáscara de arroz son la celulosa (60 %) y la sílice (20 %) ^{8,9}.

Dicho lo anterior, este trabajo propone abordar las problemáticas y desafíos mediante la obtención de nanopartículas de SiO_2 a partir de la cáscara de arroz, proponiendo un método de síntesis térmica eficiente y reproducible. Las nanopartículas se caracterizaron con diferentes técnicas para determinar las propiedades fisicoquímicas y estructurales para determinar si es un material adecuado para ser utilizado como electrodo en BIL.

Obtener nanopartículas de SiO_2 a partir de cáscara de arroz por reducción térmica, que permita el control de las características estructurales y fisicoquímicas que lo hagan viable como material de almacenamiento de energía en baterías de iones de litio.

Marco teórico

Una batería de iones de litio (BIL) se conforma esencialmente por tres elementos o componentes: ánodo, cátodo en los extremos y, entre ellos, el electrolito. El almacenamiento de energía en las BIL es electroquímico y la clasificación y nombre están definidos por el ion utilizado en el electrolito, como es el caso de las baterías de iones litio⁴. La energía es almacenada en el ánodo cuando la batería está cargada y los iones de litio se mantienen en estado metálico. Cuando la batería es descargada, es decir, cuando está en uso, los átomos de litio son oxidados y los iones de litio se difunden desde el ánodo a través del electrolito hasta el cátodo. Normalmente, el material del ánodo es el que define la capacidad teórica de una batería, ya que es donde se almacenan los átomos de litio. En la Figura 1 se muestra la representación de una celda de iones de litio, con los componentes de grafito en el ánodo, mientras que, en el cátodo, óxido de litio de cobalto (III), que fueron los primeros materiales utilizados en estas celdas⁴.

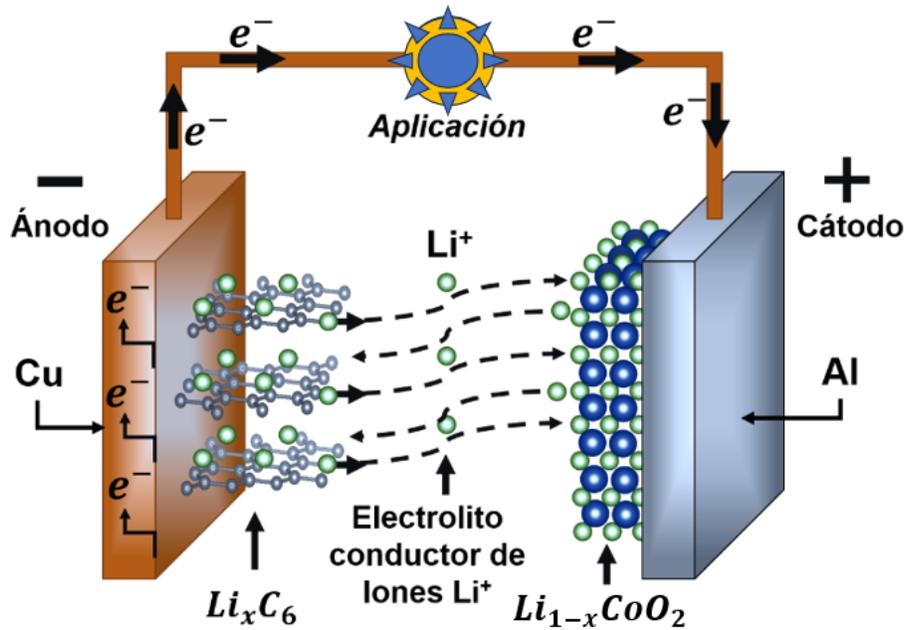


Figura 1. Esquema representativo de los componentes de una celda de iones de litio (elaboración propia)

El grafito que se utiliza hasta ahora comercialmente, está limitado a una capacidad teórica de 376 mAhg^{-1} , sin embargo, también hay una gran cantidad de materiales propuestos para sustituirlo¹⁰. Dentro de los materiales que están siendo investigados, están los de intercalación de litio, los que forman aleaciones y los de conversión. Los materiales base carbono se encuentran entre los de intercalación, mientras que entre los de aleación y conversión se encuentran algunos metales como el Ge o Si, y algunos óxidos como el de SiO_2 respectivamente⁶. Dentro de los principales problemas en las BIL está la reducción de capacidad a causa de lo siguiente: i) degradación de los materiales y ii) la irreversibilidad después de una cantidad considerable de ciclos y la pérdida de la capacidad. A causa de esto, uno de los grandes retos en la actualidad es solucionar dichos problemas^{11,12}. Esto condujo al objetivo de esta investigación, que es proponer un material de SiO_2 de alta capacidad, con las características estructurales de tamaño y pureza adecuados.

Los materiales de conversión como el SiO_2 son de gran interés, ya que tienen capacidades mucho mayores comparados con otro tipo de materiales, como los de intercalación. De las ventajas que tiene el SiO_2 son las siguientes: alta capacidad teórica (1965 mAhg^{-1} para el SiO_2), estabilidad estructural, es abundante y bajo costo y, finalmente, proporciona seguridad al reducir los riesgos de posibles explosiones.

Los procesos de síntesis para el SiO_2 son muy diversos, entre los que destacan el de sol-gel y la síntesis hidrotérmica. En ambos casos, estos métodos permiten un control del tamaño, forma y composición de las partículas. Por otro lado, se han propuesto otros métodos novedosos, donde se obtiene de subproductos agrícolas como la cáscara de arroz, un subproducto agrícola muy abundante. Este proceso permite obtener partículas de SiO_2 aplicando una gran cantidad de técnicas y métodos. Aquí es donde este proyecto propone una metodología propia, para la obtención de partículas de SiO_2 a partir de cáscara de arroz.



Metodología

La metodología para la realización de este experimento fue basada en el trabajo de Guo *et al.*¹³ con algunas modificaciones. Obtuvieron SiO₂ de alta pureza desde la cáscara de arroz utilizando un tratamiento químico de lavado en ácido clorhídrico (HCl). Esto elimina gran parte de las impurezas en la cáscara de arroz. Posteriormente el material obtenido es sometido a un tratamiento térmico en el que se obtienen las partículas de SiO₂ de alta pureza. En la Figura 2 se presenta un esquema representativo para el proceso de obtención del SiO₂.

La primera etapa del proceso consiste en realizar un lavado a la cáscara de arroz para retirar la mayoría de las impurezas con agua destilada. Posteriormente, se filtra el agua y la cáscara es secada a 100 °C durante 24 h. Una vez la cáscara esté totalmente seca, es molida en un molino de cuchillas y el polvo obtenido es tamizado con una malla 60 cuyo tamaño es de 0.25 μm . La lixiviación se realiza en medio ácido con H₂O:HCl en una relación 10:1 a una temperatura de 45 °C, agregando gradualmente la cáscara de arroz. Este proceso se mantiene en agitación constante a 200 rpm durante 4 h. Pasado este tiempo, la solución se enfría a temperatura ambiente y se decanta el exceso de la solución. Los precipitados se lavan con agua destilada por centrifugado hasta alcanzar un pH neutro. Después del lavado, la muestra obtenida es secada a 100 °C durante 24 h.

Obtención del SiO₂ a partir de la cáscara de arroz



Figura 2. Proceso de síntesis para el SiO₂ a partir de cáscara de arroz (elaboración e imágenes propias)

El tratamiento térmico de las muestras se realizó a diferentes niveles de calor con base en la literatura, donde se utilizan valores por arriba de los 500 °C. Se sabe que a partir de dicha temperatura se pierde casi la totalidad de la materia orgánica. Además, a partir de este nivel el SiO₂ sufre cambios fisicoquímicos y principalmente estructurales. Por ello, en este trabajo se propusieron las siguientes temperaturas: 500 °C, 600 °C, 700 °C y 800 °C durante 2 h. En la Tabla 1 se enlistan las muestras y experimentos realizados. La cáscara de arroz se identificó como “CA”, el proceso de lixiviado como “L” y sin lixiviado como “SL” y, finalmente, se indican las diferentes temperaturas de calcificación utilizadas.

Tabla 1. Condiciones de síntesis para las muestras de SiO₂ y las claves asignadas a cada muestra (elaboración propia)

Muestra	Temperatura de calcinación (°C)	Clave
CASL	700	CASL-700
CAL	500	CAL-500
CAL	600	CAL-600
CAL	700	CAL-700
CAL	800	CAL-800

La caracterización de los materiales se realizó utilizando radiación de Cu (en un rango de 10° a 70° de 2-theta. Para el análisis por microespectroscopía Raman se utilizó un láser verde de longitud de onda de 532 nm en un rango de 50 a 3000 cm⁻¹. Las imágenes de microscopía electrónica de barrido (MEB) se obtuvieron con las técnicas de electrones secundarios (SE).

Resultados

Las muestras obtenidas se caracterizaron por difracción de rayos X (DRX), para determinar sus características estructurales. Pevio al análisis se realizaron simulaciones de la estructura teórica del SiO₂, con la intención de entender las características que se esperan del material obtenido experimentalmente. En la Figura 3 se muestra la celda unitaria del SiO₂, cuya estructura cristalina es una celda triclinica de grupo espacial C_{2h}^2 cuya celda contiene 72 átomos en total. El hecho de ser una celda triclinica es de esperarse que todos sus parámetros de red sean diferentes, por lo tanto, su simetría es muy baja, lo que se refleja en una gran cantidad de planos de reflexión. Este tipo de materiales, a pesar de tener cierto orden cristalino, tienden a ser considerablemente un material con cierto grado de amorfismo.

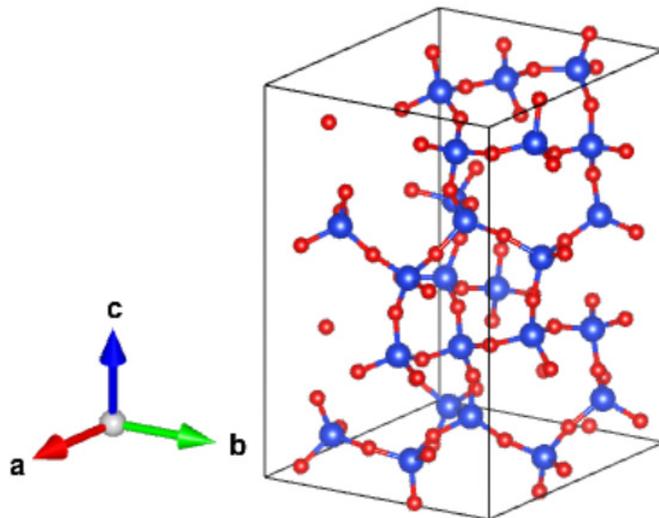


Figura 3. Celda unitaria del SiO₂. La simulación se realizó en el software de uso libre *Visualization for Electronic and Structural Analysis (VESTA)*. Fuente: elaboración propia



Los datos utilizados para para realizar la simulación se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 2. Parámetros de red para el SiO₂ de estructura triclinica (elaboración propia)

Parámetro de red	Valor
a	8.59 Å
b	8.66 Å
c	16.44 Å
α	91.46 °
β	90.02 °

Por otro lado, utilizando el mismo software (VESTA) se generó una vista con los tetraedros formados por átomos de oxígeno en los vértices (esferas rojas) y en el centro del tetraedro un átomo de silicio (esferas azules) como se muestra en la Figura 4. Una característica de este material, son los espacios relativamente grandes que se mantienen entre los tetraedros mostrados en la celda unitaria. El hecho de tener 72 átomos por celda unitaria, nos indica que es un material que probablemente sea amorfo, sin embargo, en la literatura se sabe que la sílice es un material polimórfico por lo que puede encontrarse: amorfo, cuarzo, cristobalita, tridimita, entre otras fases.

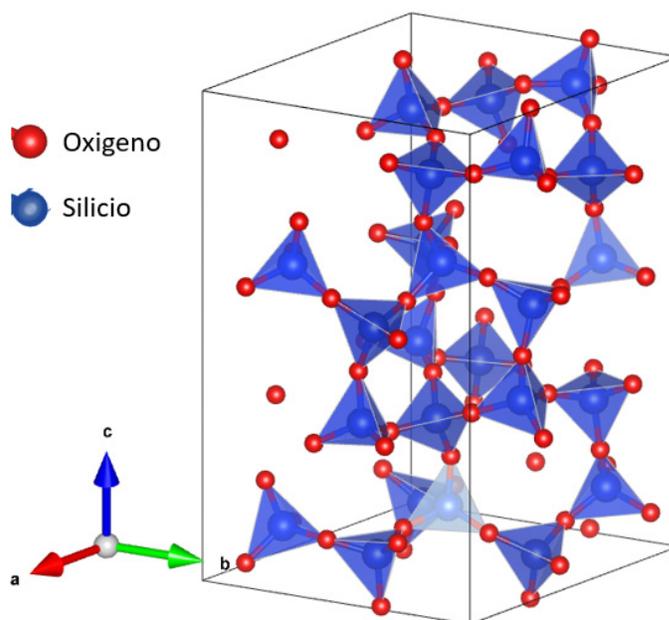


Figura 4. Celda unitaria del SiO₂ con la vista. Fuente: elaboración propia

La celda unitaria y todos los datos cristalinos que se tienen del SiO₂ permiten obtener un patrón de difracción teórico del material y se presenta en la Figura 5. Como se puede notar, el plano de difracción del SiO₂ de mayor intensidad es el (004) y se observa a los 21.6085 ° de 2-theta; sin embargo, el material tiene una gran cantidad de planos que difractan muy cerca entre ellos.

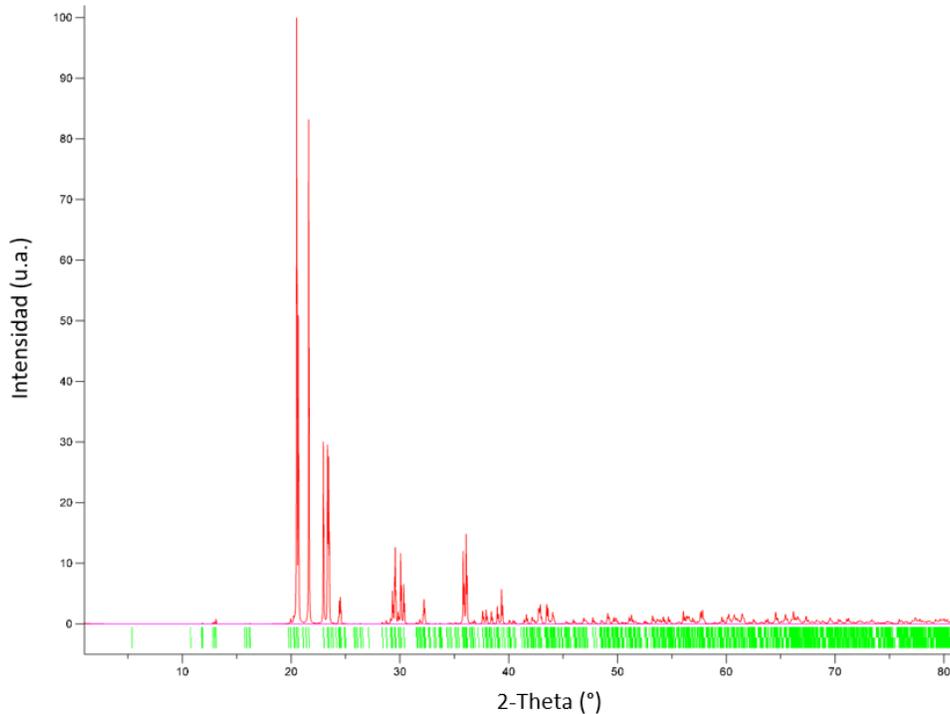


Figura 5. Patrón de difracción teórico del SiO_2 . u.a. = unidades arbitrarias.
Fuente: elaboración propia

En la Figura 6 se muestran los patrones de difracción experimentales de las muestras calcinadas a diferentes temperaturas indicadas en la Tabla 1. Como se observa en los resultados, en todas las muestras a las diferentes temperaturas aparece una señal con un máximo de aproximadamente 22° de 2-theta. Este máximo del patrón experimental está muy cercano a la señal característica del patrón teórico obtenido, es decir, del plano (004). Estos resultados, también sugieren que los planos de difracción que se obtuvieron están formados por el traslape y apilamiento de los planos de difracción del SiO_2 , por ello es por lo que se observa un pico con una base muy amplia, es decir, el ancho de las señales es de casi 20° de 2-theta relativamente¹⁴.

El ensanchamiento de las señales se puede generar por dos causas principales: la suma y apilamiento de planos, como ya se dijo, y por el tamaño nanométrico de los cristales que difractan.

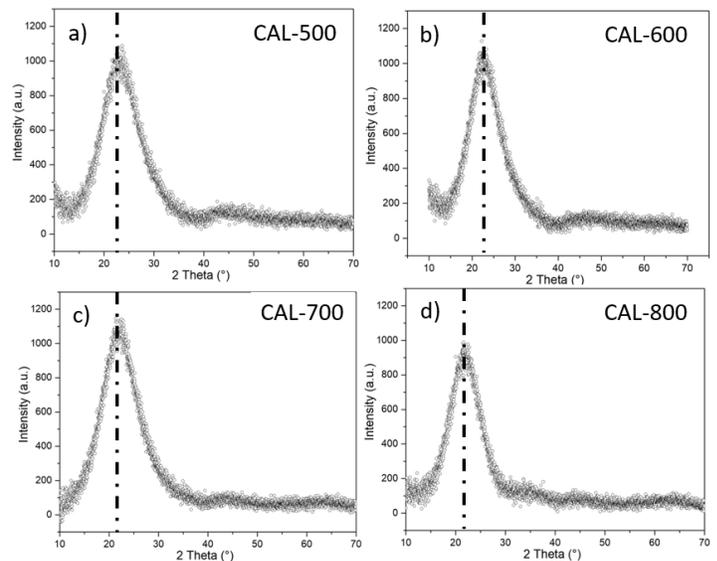


Figura 6. Patrones de difracción de las muestras de SiO_2 obtenidas a diferentes temperaturas de calcinación: a) 500°C , b) 600°C , c) 700°C y d) 800°C .
Fuente: elaboración propia



Los patrones de difracción de las muestras experimentales se compararon en un rango de 10° a 70° de 2-theta y se muestran en la Figura 7. En la Figura 7a) se muestra el patrón de difracción teórico en el mismo rango, y en la Figura 7b) se observan todos los patrones de difracción de las muestras calcinadas. Se trazaron líneas verticales punteadas para señalar los ángulos en los que se presentan los picos de mayor intensidad en el patrón teórico. Dichas señales corresponden y coinciden con los patrones experimentales. Sin embargo, se pueden notar ligeros corrimientos de los picos hacia ángulos mayores, esto significa que las distancias entre los planos atómicos están disminuyendo con relación a al incremento de la temperatura. Por lo tanto, al hacer una comparación entre el patrón teórico y el observado, se puede deducir lo siguiente: i) se obtuvo el material de SiO_2 cuyas características cristalinas corresponden a lo discutido en la Figura 3, además ii) el ensanchamiento de las señales sugiere que las partículas del SiO_2 están conformadas de cristalitos de tamaño nanométrico.

Cabe mencionar que las muestras que se obtuvieron a 500°C y 600°C presentaron una tonalidad amarillenta y a partir de los 700°C las muestras tenían una apariencia totalmente blanca. Y de acuerdo con la literatura, esta tonalidad amarilla se debe a las impurezas presentes en el SiO_2 .

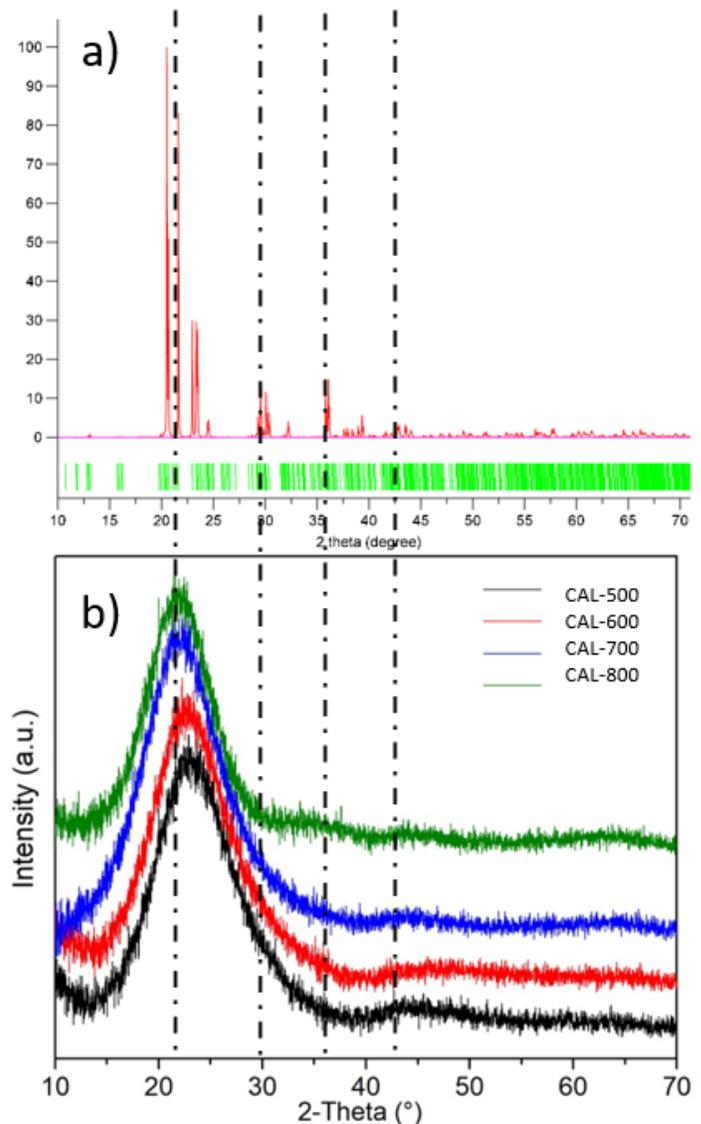


Figura 7. Patrones de difracción a) teórico del SiO_2 y b) de las muestras calcinadas a diferentes temperaturas. Fuente: elaboración propia

Las muestras se analizaron por microespectroscopía Raman en un rango de 100 a 1250 cm^{-1} de número de onda y con un láser verde de 514 nm de longitud de onda. El espectro Raman se observan en la Figura 8, donde se indican las bandas a 450 y 800 cm^{-1} asociadas a los modos vibracionales de los tetraedros¹³ formados por los átomos de O-Si en la Figura 4. Estos resultados complementan los obtenidos en DRX.

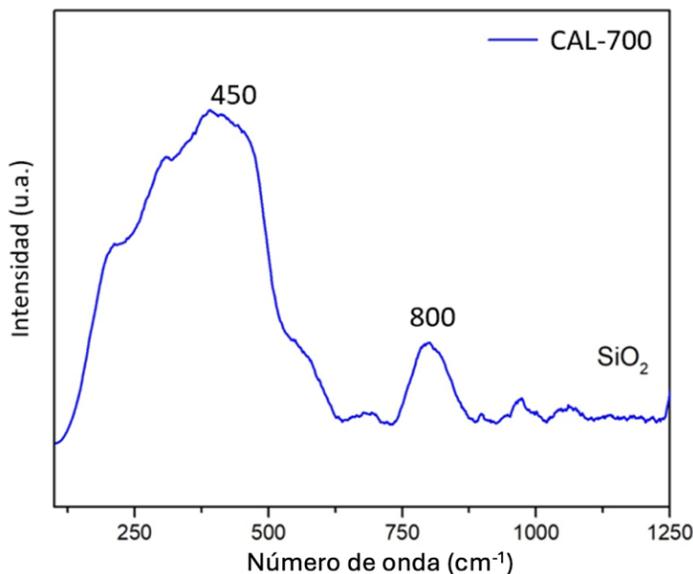


Figura 8. Espectro Raman de la muestra CAL-700.
Fuente: elaboración propia

Las muestras también se analizaron por microscopía electrónica de barrido (MEB) con la técnica de electrones secundarios (SE) para determinar la morfología y tamaño de las partículas. En la Figura 9 se observan las micrografías obtenidas, en donde se pueden observar algunas partículas con forma de barras que rondan las 10 micras de diámetro, sin embargo, la mayoría tienen

formas irregulares. Cabe decir que el objetivo de este trabajo por ahora no está dirigido al control de la morfología de las partículas, sino a las características estructurales.

Con relación a los resultados obtenidos en DRX, estas partículas están constituidas en un arreglo de cristalitos o cristalita, de tamaño nanométrico, como se observó en los patrones de difracción. Sin embargo, a pesar de que las partículas obtenidas tienen tamaños micrométricos, es fundamental el control de la cristalita para materiales con aplicaciones en almacenamiento de energía. Este control permite una mayor exposición de planos atómicos que favorecen la difusión de los iones de litio.

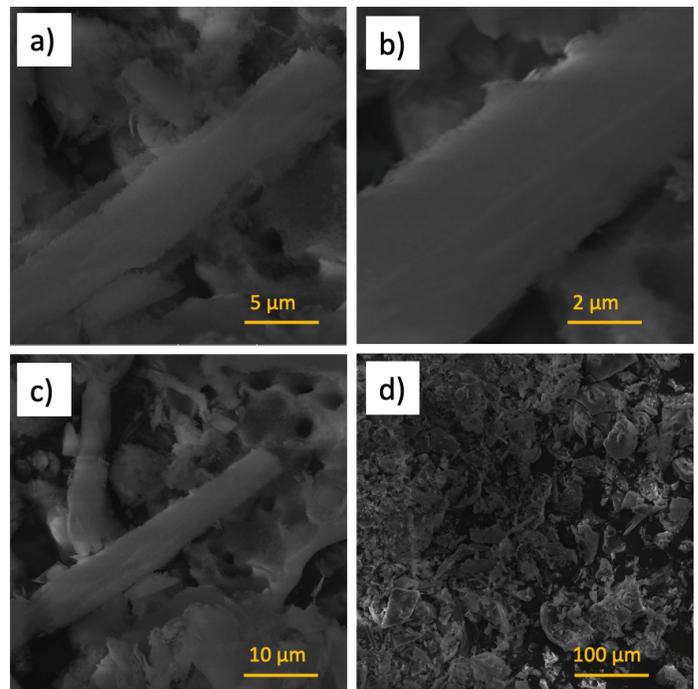


Figura 9. Micrografías de la muestra CAL-700 por SE a diferentes escalas.
Fuente: elaboración propia



Conclusiones

En este estudio se ha investigado la obtención de dióxido de silicio de alta pureza a partir de la cáscara de arroz, un residuo agroindustrial abundante. El proceso de síntesis propuesto, que combina tratamientos ácidos y térmicos, permitió obtener las partículas. De acuerdo con los resultados de DRX, el material coincide con una estructura triclinica del SiO_2 , la cual no es muy simétrica y se observa con cierto grado de amorfismo. Además, el factor de ensanchamiento en los patrones también se relaciona con los tamaños nanométricos de la cristalita, lo que es más probable por el hecho de que son visibles en DRX. Sumado a esto, los parámetros de red son afectados por las temperaturas utilizadas en el proceso, lo que comprueba la influencia en la estructura. Por otro lado, los resultados de microespectroscopía Raman probaron que **únicamente se observaron los modos vibracionales de los enlaces** de Si-O. Finalmente, los resultados de microscopía mostraron las partículas micrométricas de SiO_2 , con cristalita nanométrica, de acuerdo con los resultados de DRX y con influencia directa de la temperatura de calcinación. Estas características estructurales y fisicoquímicas como la pureza, el tamaño y forma de los cristales, hacen posible considerarlo candidato como material anódico en baterías de ion litio ya que se demuestra un control en la exposición de planos de átomos y las distancias entre **éstos**, lo que favorece la difusión de átomos de litio.

Referencias

1. MUKHERJEE, Santanu; Albertengo, Alban and Djenizian, Thierry. Beyond flexible-Li-ion battery systems for soft electronics. *Energy Storage Materials*. Vol. 42, pp. 773–785. November 2021. [Fecha de consulta: 01 de noviembre de 2023]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2021.08.020> ISSN: 2405-8297.
2. GREY, Clare P. and Hall, David S. 2020. Prospects for lithium-ion batteries and beyond—a 2030 vision. *Nature Communications*. Vol. 11, no. 1, pp. 2–5. 08 December 2020. [Fecha de consulta: 03 de noviembre de 2023]. Disponible en DOI 10.1038/s41467-020-19991-4 ISSN: 2041-1723.
3. CASTELVECCHI, Davide. Electric cars and batteries: how will the world produce enough? *Nature*. Vol. 596, núm. 7872, pp. 336–339. August 2021. DOI 10.1038/d41586-021-02222-1 ISSN: 1476-4687.
4. LINDEN, David and Reddy, Thomas. *Handbook of Batteries*. 3rd. edition. New York. McGraw Hill Professional. 2001. ISBN 0071359788.
5. TSIROPOULOS, I., Taryvdas, D. and Lebedeva, N. *Li-ion batteries for mobility and stationary storage applications*. Publications Office of the European Union. 2018. Luxembourg (Luxembourg). DOI 10.2760/87175 (online). ISBN 978-92-79-97254-6.
6. LI, Xin; Sun, Xiaohong; Hu, Xudong; Fan, Fengru; Cai, Shu; Zheng, Chunming; et al. Review on comprehending and enhancing the initial Coulombic efficiency of anode materials in lithium-ion/sodium-ion batteries. *Nano Energy*. Vol. 77. November 2020. DOI 10.1016/j.nanoen.2020.105143 ISSN: 2211-2855.
7. WANG, Fei and Mao, Jian. Extra Li-Ion Storage and Rapid Li-Ion Transfer of a Graphene Quantum Dot Tiling Hollow Porous SiO_2 Anode. *ACS Applied Materials and Interfaces*. Vol. 13, no. 11, pp. 13191–13199. 2021, March 24. DOI 10.1021/acsami.0c22636. ISSN: 1944-8244.



8. AL JA' FARAWY, Muhammad Shalahuddin; Hikmah, Dewi Nur; Riyadi, Untung; Purwanto, Agus and Widiyandari, Hendri. A Review: The Development of SiO₂/C Anode Materials for Lithium-Ion Batteries. *Journal of Electronic Materials*. Vol. 50. 2021. DOI 10.1007/s11664-021-09187-x. ISSN: 0361-5235.
9. HERNÁNDEZ, Ricardo; Olarte, Alfredo; Salgado, René; Medrano, Atenas Salomé y Martínez, Fryda. Manejo de la cascarilla de arroz como residuo postcosecha y su conversión en nanocelulosa. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*. Vol. 16, no. 30, pp. 1e-17e. DOI 10.22201/ceiich.24485691e.2023.30.69697 ISSN: 2007-5979.
10. ZHANG, Hao; Yang, Yang; Ren, Dongsheng; Wang, Li and He, Xiangming. Graphite as anode materials: Fundamental mechanism, recent progress and advances. *Energy Storage Materials*. Vol. 36 (19), pp. 147–170. April 2021. DOI 10.1016/j.ensm.2020.12.027. ISSN: 2405-8297.
11. FANG, Shan; Bresser, Dominic and Passerini, Stefano. Transition Metal Oxide Anodes for Electrochemical Energy Storage in Lithium- and Sodium-Ion Batteries. *Advanced Energy Materials*. [En línea]. Vol. 10, no. 1. 18 November 2019. [Fecha de consulta: 05 de noviembre de 2023]. Disponible en <https://doi.org/10.1002/aenm.201902485> ISSN: 1614-6840.
12. CAO, Kangzhe; Jin, Ting; Yang, Li and Jiao, Lifang. Recent progress in conversion reaction metal oxide anodes for Li-ion batteries. *Materials Chemistry Frontiers*. Vol. 1, no. 11, pp. 2213–2242. 26 June 2017. <https://doi.org/10.1039/C7QM00175D> ISSN: 2052-1537.
13. GUO, Wenwen; Lu, Guoneng; Zheng, Youqu and Li, Ke. Nano-silica extracted from rice husk and its application in acetic acid steam reforming. *RSC Advances*. Vol. 11, no. 55, pp. 34915–34922. 28 October 2021. DOI 10.1039/d1ra05255a. ISSN: 2046-2069.
14. KONGMANKLANG, Chaiwat and Rangsriwatananon, Kunwadee. Hydrothermal Synthesis of High Crystalline Silicalite from Rice Husk Ash. *Journal of Spectroscopy*. [En línea]. Número especial 2015, pp. 2–7. 03 August 2015. [Fecha de consulta: 02 de noviembre de 2023]. Disponible en <https://doi.org/10.1155/2015/696513> ISSN: 2314-4939.

Fecha de recepción

Fecha de aceptación

Fecha de publicación

10/11/2023

11/7/2024

31/1/2025



Clasificación de emociones con reconocimiento facial utilizando aprendizaje profundo

Emotion classification using face recognition and deep learning

Gabriel Ramos-Zacarías, Miguel Ángel Gil-Ríos, Alan López Martínez y María Dolores Juárez Ramírez / Universidad Tecnológica de León / Algorithmica Solutions

Resumen

Este artículo describe el uso de una arquitectura de red neuronal convolucional para clasificar emociones a partir de imágenes faciales, la cual se entrenó con una base de datos pública, utilizando 24,176 y 6,053 instancias para entrenamiento y prueba, respectivamente. La arquitectura utilizada involucra el uso de una capa de entrada seguida de doce capas de procesamiento conectadas de manera secuencial y, una capa final de salida para realizar la clasificación de las emociones. Se consideraron emociones de enojo, felicidad, neutralidad, tristeza y sorpresa. La precisión de clasificación fue de 0.97 y 0.96 en términos de las métricas *accuracy* y coeficiente de *Jaccard*, respectivamente. Adicionalmente, al utilizar un banco privado de 100 imágenes, se obtuvo un desempeño de 0.93 en términos de las métricas *accuracy* y coeficiente de *Jaccard*. Los resultados obtenidos probaron la efectividad de la arquitectura elegida para ser implementada en un entorno productivo.

Palabras clave: aprendizaje profundo, reconocimiento facial, clasificación de emociones

Abstract

This paper describes the use of a Convolutional Neural Network architecture to classify emotions from facial images. The network was trained and tested with a public database using 24,176 and 6,053 instances, respectively. The Convolutional Neural Network was designed using an architecture involving an input layer followed by 12 processing layers sequentially connected and a final output layer to classify the emotions. For the study, five distinct emotions were considered such as anger, happiness, neutrality, sadness and surprise. The classification performance was 0.97 and 0.96 in terms of the accuracy and Jaccard coefficient metrics. Additionally, a private bank of 100 images was used to test and probe the network reliability. It was achieved a performance of 0.93 in terms of the accuracy and Jaccard coefficient metrics. The obtained results probed the effectiveness of the chosen architecture to be used in a production environment.

Keywords: deep learning, facial recognition, classification of emotions



Introducción

El reconocimiento facial ha experimentado grandes avances en las últimas décadas, gracias al continuo desarrollo en el campo del aprendizaje profundo (*deep learning*)¹. Estas técnicas han cambiado la forma en que se identifican y comprenden las emociones humanas a través del reconocimiento facial, proporcionando una nueva dimensión de análisis y aplicaciones en diversas áreas, como la psicología, el *marketing*, la seguridad y la interacción humano-computadora.

En el contexto del reconocimiento facial, el *deep learning* puede descubrir patrones sutiles, identificar rasgos únicos y capturar matices emocionales en las expresiones faciales². Esto ha llevado a avances significativos en la precisión, la velocidad y la confiabilidad del reconocimiento facial. Se puede observar en el día a día, desde el desbloqueo de dispositivos móviles hasta la identificación de sospechosos en sistemas de seguridad³. Mediante la identificación y análisis de elementos clave, como los ojos, la nariz y la boca, los sistemas de reconocimiento facial pueden discernir entre individuos y categorizar emociones^{4,5}.

Alternativamente, los enfoques de coincidencia holística han sido ampliamente utilizados en el reconocimiento facial⁶. Estos métodos abordan la tarea de reconocimiento comparando directamente las características faciales completas, sin dividir las partes específicas. Mediante el uso de técnicas de análisis de patrones y aprendizaje automático, estos métodos pueden identificar patrones únicos en rostros y realizar la correspondencia con imágenes almacenadas en la base de datos⁷.

Los métodos basados en características o estructuras han sido valiosos en el reconocimiento facial. Estos enfoques se centran en la extracción y comparación de características específicas del rostro, como los ojos, la nariz y la boca. Utilizando técnicas de geometría y morfología, los puntos de referencia en la cara pueden ser identificados y se miden distancias y ángulos entre ellos, estas características se utilizan luego para identificar y comparar rostros⁸.

Los métodos híbridos han ganado popularidad debido a su capacidad para mejorar la precisión del reconocimiento facial. Estos métodos combinan enfoques holísticos y basados en características para aprovechar las ventajas de ambos enfoques. Al utilizar técnicas de extracción de características locales junto con el análisis completo de la cara, los métodos híbridos logran resultados más precisos y robustos en la identificación de rostros⁹.

Los rostros laplacianos o *laplacian faces*, se basan en el análisis de componentes principales (PCA)^{10,11}. A su vez, el reconocimiento facial basado en métodos bayesianos ha demostrado ser efectivo en situaciones con datos incompletos o desbalanceados. Estos enfoques utilizan la teoría estadística de Bayes para modelar las relaciones probabilísticas entre las características faciales e identidades. La capacidad de adaptarse a datos con niveles de ruido considerable y con pocos ejemplos de entrenamiento hace que los métodos bayesianos sean una opción valiosa en diversas aplicaciones de reconocimiento facial¹².

En este artículo, se presentan los resultados obtenidos al realizar la clasificación de emociones a partir de una imagen digital del rostro de las personas. El método utilizado hace uso de una red neuronal convolucional (CNN) secuencial simple con trece capas.



Para el entrenamiento y prueba se utilizó la base de datos FER-2013, la cual contiene 30,226 imágenes de rostros de personas¹³ catalogadas en cinco emociones: enojo, felicidad, neutra, tristeza y sorpresa. Además, se utilizó una base de datos independiente con veinte imágenes que corresponden a empleados y empleadas de la empresa Forte Innovation¹⁴. Los resultados obtenidos demostraron que la elección de la red neuronal utilizada fue adecuada, pues se realizó un rastreo del proceso de entrenamiento de la arquitectura utilizada. Adicionalmente, los resultados obtenidos en las pruebas fueron satisfactorios logrando un 0.93 de exactitud (*accuracy*), demostrando la factibilidad de que el método pueda ser implementado en un entorno productivo.

El artículo está dividido en cinco secciones. En la primera sección se hace una descripción del estado del arte relacionado con la identificación y clasificación de rostros. En la segunda se describen los conceptos y fundamentos aplicados en este artículo. En la tercera sección se describe a detalle el método propuesto. En la cuarta se presentan los resultados obtenidos y, finalmente, se presentan las conclusiones y hallazgos relevantes encontrados.

Objetivo

Aplicar una arquitectura de red neuronal convolucional que permita la clasificación de emociones, a partir de imágenes de rostros de personas con una eficiencia de clasificación superior a 0.85 en términos de métrica de exactitud (*accuracy*).

Planteamiento del problema

El problema que se requiere resolver es la identificación de la emoción que tiene una persona, a partir de una fotografía del rostro, mediante un modelo computacional que automatice el proceso de clasificación.

De igual manera, se necesita que la eficiencia de clasificación realizada a partir del modelo clasificador sea superior al 0.85 en términos de exactitud con la finalidad de asegurar su efectividad.

Adicionalmente, se requiere validar el modelo, que previamente fue entrenado, con imágenes de personal de la empresa Forte Innovation, con la finalidad de validar su factibilidad y ser implementado en un ambiente productivo dentro de la organización.

Método de trabajo

Redes neuronales convolucionales

La arquitectura de la red neuronal convolucional (CNN) está diseñada específicamente para extraer características relevantes de las imágenes y aprender representaciones significativas de los rostros. Empleando filtros convolucionales, estas redes son capaces de identificar bordes, texturas y características distintivas que resultan esenciales para la identificación de rostros y, más específicamente, para la clasificación de emociones¹⁵. Las CNN no solo han demostrado ser capaces de reconocer las expresiones faciales más comunes, como felicidad, tristeza y enojo, sino que también han incursionado en detectar emociones más sutiles en los rostros¹⁶.

Las redes neuronales convolucionales (CNN) han sido un pilar fundamental en el desarrollo de la inteligencia artificial y el aprendizaje profundo. Inspiradas en la forma en que el cerebro humano procesa y comprende la información visual, estas arquitecturas han revolucionado la visión por computadora y han logrado resultados sorprendentes en tareas como el reconocimiento de objetos, la clasificación de imágenes, la detección de rostros y mucho más¹⁷. Las redes neuronales convolucionales son un tipo de red neuronal artificial diseñada especialmente para procesar y analizar imágenes¹⁸.



Tipos de capas de una red neuronal convolucional

Una CNN está compuesta por distintas capas las cuales, juegan roles específicos en el procesamiento y extracción de características significativas de las imágenes de entrada, permitiendo a la red aprender a interpretar y comprender la información de manera más eficiente y precisa¹⁹.

La combinación y el orden de estas capas pueden variar según la arquitectura específica de la red y la tarea a resolver²⁰. A su vez, cada tipo de capa juega un papel crucial en la arquitectura, como se describe a continuación:

- Capa convolucional (*convolutional layer*): es la capa principal que da nombre a la red convolucional. La tarea principal de esta capa es aplicar operaciones de convolución en la imagen de entrada. La convolución implica deslizar una serie de filtros (*kernels*) sobre la imagen, para extraer características importantes, como bordes, texturas y patrones específicos. Cada filtro aprende a reconocer una característica específica. La salida de esta capa se llama mapa de características o *feature map*.
- Capa de activación (*activation layer*): después de la capa convolucional, se aplica una función de activación no lineal a los valores obtenidos en el mapa de características. Esto introduce no linealidades en la red y permite que esta sea más expresiva y capaz de aprender relaciones complejas en los datos.
- Capa de agrupación (*pooling layer*): se utiliza para reducir el tamaño espacial del mapa de características y disminuir la cantidad de parámetros de la red.

El agrupamiento se realiza mediante operaciones como el *max pooling* o *average pooling*, que reducen las dimensiones del mapa, conservando solo las características más importantes y dominantes.

- Capa completamente conectada (*fully connected layer*): esta capa se coloca al final de la red y se utiliza para realizar la clasificación o la regresión. Toma las características extraídas por las capas anteriores y las procesa para generar las salidas finales. Esta capa tiene conexiones entre todos sus nodos y, por lo general, se utiliza en tareas de clasificación para asignar una probabilidad a cada clase.
- Capa de normalización (*normalization layer*): la normalización, como *batch normalization*, se utiliza para acelerar el entrenamiento de la red y mejorar la estabilidad del gradiente. Normaliza los valores de las características en cada capa, lo que puede conducir a una convergencia más rápida y una mejora en el rendimiento de la red.
- Capa de caída (*dropout*): se utiliza para reducir el sobreajuste en la red. Durante el entrenamiento, esta capa “apaga” aleatoriamente una fracción de las neuronas, lo que evita que la red se vuelva demasiado dependiente de ciertas características específicas.

Arquitectura de redes convolucionales

Las arquitecturas convolucionales típicas constan de capas de convolución seguidas de capas *ReLU* (unidad lineal rectificadora) y capas de *pooling*. A medida que la imagen se procesa a través de la red, se vuelve más



Objetivo

pequeña pero más profunda debido a las capas de convolución. En la parte superior, se agrega una red neuronal *feedforward* con conexiones completamente integradas y una capa de predicción final, como una *softmax*, para estimar las probabilidades de clases. Este diseño permite la extracción gradual de características y la toma de decisiones finales para la clasificación²¹.

Métricas de evaluación

La evaluación desempeña un papel central en la validación y la mejora continua de los sistemas. De igual manera, brinda las herramientas para medir, cuantificar y comprender cómo un sistema interpreta y responde a las sutilezas de las expresiones faciales.

Existen varias formas de medir el desempeño con el que un clasificador es capaz de realizar su tarea al utilizar un banco de datos de pruebas. Una de las métricas más utilizadas para este caso es la exactitud, comúnmente descrita en la literatura como *accuracy*, la cual se puede calcular de la siguiente manera:

$$Acc = \frac{CP}{CP + FP},$$

Donde *Acc* es la exactitud (*accuracy*), representa la cantidad de casos que la CNN clasificó correctamente (*correct predictions*) y *FP* representa la cantidad de casos que la CNN clasificó de manera incorrecta (*failed predictions*).

Adicionalmente, se utilizó la métrica del índice de Jaccard o coeficiente de similitud de Jaccard. Esta métrica se utiliza para evaluar la similitud entre dos conjuntos. El índice de Jaccard se calcula dividiendo el tamaño de la intersección de los dos conjuntos (es

decir, los casos clasificados y los datos reales) dividido entre el tamaño de la unión de los conjuntos (que incluye todos los casos, tanto los clasificados de forma correcta como incorrecta). A continuación, se describe la fórmula para su cálculo.

$$J(A,B) = \frac{A \cap B}{A \cup B},$$

donde $J(A,B)$ es el índice de Jaccard entre los conjuntos A y B , $A \cap B$ es el tamaño de la intersección de los conjuntos y $A \cup B$ es el tamaño de la unión de los conjuntos. Un valor del índice de Jaccard cercano a uno indica una alta similitud entre los conjuntos, lo que significa que se están clasificando correctamente las instancias. Por el contrario, un índice cercano a cero indica una baja similitud, lo que sugiere discrepancias significativas entre las predicciones del sistema y las emociones reales expresadas en las imágenes.

Matriz de confusión multiclase

La matriz de confusión multiclase es una herramienta que permite analizar cómo el clasificador de emociones interpreta y clasifica las diferentes expresiones faciales. A su vez, esta matriz sirve de base para calcular la exactitud de la clasificación. La Figura 1, ilustra el esquema de una matriz de confusión multiclase.

		Clase obtenida			
		Clase 1	Clase 2	...	Clase N
Clase esperada	Clase 1	CP	FN	FN	FN
	Clase 2	FP	CP	FN	FN
	...	FP	FP	CP	FN
	Clase N	FP	FP	FP	CP

Figura 1. Esquema de una matriz de confusión multiclase. Fuente: elaboración propia

Tomando como base la Figura 1, el número de clasificaciones correctas (*correct predictions*) o CP, para cada clase, se encuentran dentro de la diagonal de la matriz. Por otro lado, los valores en las celdas fuera de la diagonal cuantifican los errores de clasificación. A los errores de clasificación por encima de la diagonal se les conoce como falsos-negativos (*false-negative*) o FN. De manera consecuente, a los errores de clasificación debajo de la diagonal se les denomina falsos positivos (*false-positive*) o FP.

Método propuesto

Con la finalidad de lograr el objetivo general descrito previamente, se eligió utilizar una CNN secuencial simple de trece capas²², más una capa de entrada. La elección de la arquitectura se realizó con base en el estudio del estado del arte relacionado exclusivamente con el problema tratado. El diseño elegido presentó un mejor desempeño en la clasificación de emociones con respecto a otras arquitecturas^{23,24}.

Posterior a la de entrada, la CNN contiene dos capas de convolución y enseguida se aplicó una reducción de tamaño de imagen (*max pooling*). A continuación, se agregó una capa de poda (*dropout*) con la finalidad de discriminar aquellas neuronas que la CNN considera como no relevantes para realizar la clasificación. Luego se aplicó una capa de convolución para continuar extrayendo las características más complejas y después de reducir el tamaño se repitieron estos dos pasos, antes de regularizar la red con una capa de poda para evitar el sobreajuste. Consecuentemente, las personas autoras transformaron los datos en un vector unidimensional en la capa *flatten* a fin de prepararlo para la capa densa (*fully connected*) donde se procesa la información y enseguida se agregó una capa de poda, finalmente la capa densa se encargó de realizar la clasificación de emociones.



La Figura 2 ilustra la arquitectura de la red neuronal convolucional utilizada.

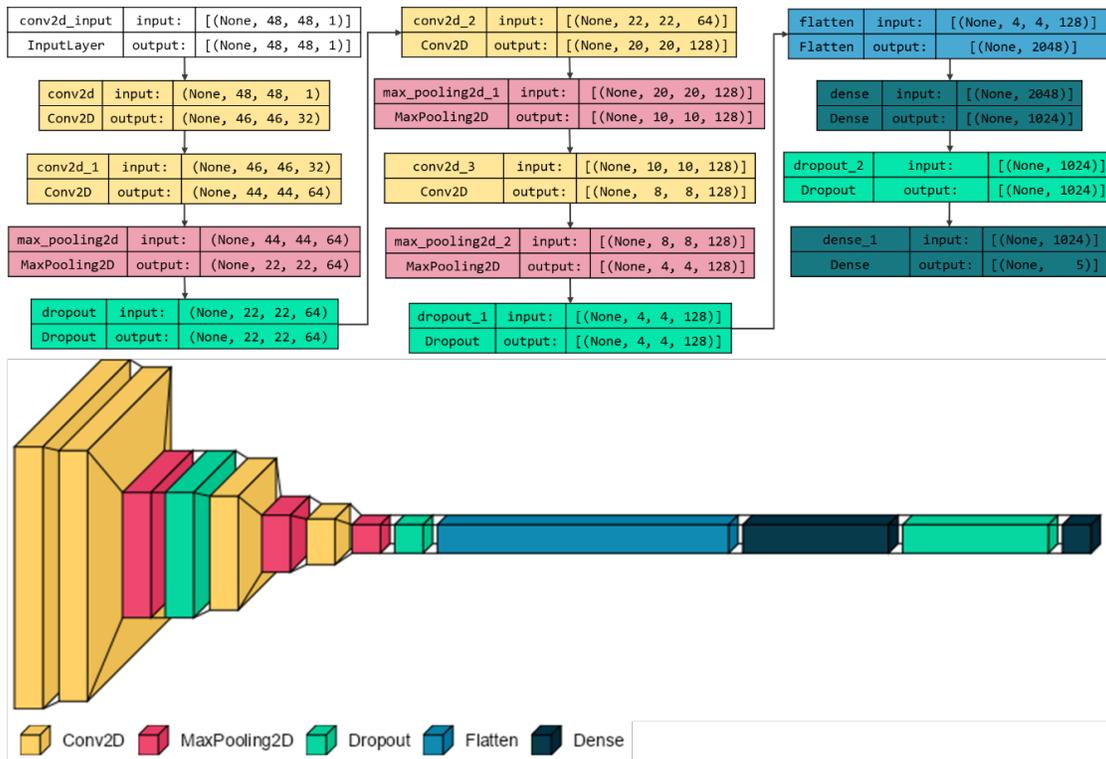


Figura 2. Arquitectura de la red neuronal convolucional con trece capas secuenciales, utilizada para la clasificación de emociones. Fuente: elaboración propia

Como se puede apreciar en la Figura 2, la red convolucional utilizada es de tipo secuencial y cuenta con trece capas de procesamiento posteriores a la primera capa, que es la de entrada. Es importante mencionar que las imágenes de entrada deben tener un tamaño de 48 x 48 píxeles, y estar representadas en escala de grises de un solo canal de color. Conforme la imagen de entrada se procesa en cada una de las capas internas de la CNN, se generan diferentes mapas de características que le permiten a la red conocer las regiones más relevantes para realizar la clasificación. Finalmente, la capa de salida que realiza la clasificación final consta de neuronas, las cuales representan cada una de las emociones consideradas en la clasificación. La Figura 3 ilustra el flujo del proceso de clasificación.

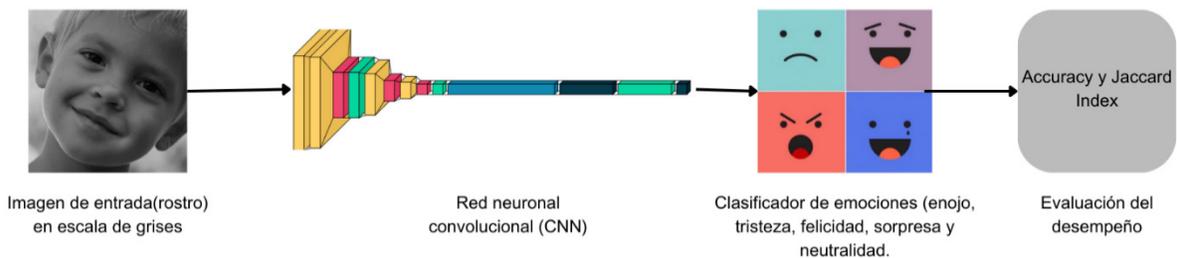


Figura 3. Diagrama de flujo del algoritmo propuesto. Fuente: elaboración propia

Resultados

Para la experimentación se utilizaron dos bases de datos distintas con imágenes de rostros de personas con un tamaño de 48 x 48 píxeles en escala de gris. La primera base de datos se denomina FER-2013 y se obtuvo de Kaggle, la cual es de dominio público¹³. Cuenta con 30,229 instancias (imágenes) considerando cinco emociones, como se describe en la Tabla 1.

Tabla 1. Número de instancias para cada emoción tomadas de la base de datos FER-2013. Fuente: elaboración propia

	Enojo	Felicidad	Neutro	Tristeza	Sorpresa
Entrenamiento	3995	7215	4965	4830	3171
Prueba	958	1774	1233	1257	831
Total	4953	8989	6198	6087	4002

Del número total de instancias, se utilizaron 24,176 (80 %) para entrenamiento y 6,053 (20%) para pruebas. La distribución previamente descrita se realizó para asegurar una alta eficiencia de aprendizaje durante la etapa de entrenamiento de la CNN. La Figura 4 ilustra una muestra de rostros con diferentes emociones, tomada de la base de datos FER-2013.



Figura 4. Muestra de rostros con diferentes emociones, tomadas de la base de datos FER-2013. Cada fila, de arriba hacia abajo, representa una emoción como se describe a continuación: enojo, felicidad, neutral, tristeza y sorpresa

Posteriormente, para comprobar los resultados obtenidos en la prueba anterior, se utilizó una base de datos independiente con cien imágenes correspondientes a empleados de la empresa Forte Innovation. El banco de imágenes contempla las diferentes emociones de manera equilibrada, es decir, veinte imágenes para cada una de las emociones previamente descritas. Dichas imágenes fueron adquiridas en un entorno controlado. Se capturó un video del rostro de los participantes mientras expresaban diferentes emociones, como enojo, felicidad, tristeza, sorpresa, entre otras. Posteriormente, se utilizaron las librerías OpenCV y Haar Cascades, para extraer fotogramas representativos de estas emociones. Derivado de este proceso, las imágenes obtenidas tuvieron una resolución de 48 x 48 píxeles y estuvieron representadas en un modelo de color en escala de gris. El formato de los archivos resultantes fue jpg.



Es importante mencionar que, durante la toma del video, las personas fueron grabadas delante de un fondo blanco con la finalidad de aumentar el contraste. De manera consecuente, la empresa Forte designó a un grupo de personas ajenas a esta investigación a extraer las imágenes de los rostros y solo se proporcionó la base de datos final. De forma adicional, es importante mencionar que el rango de edades de las y los participantes oscila entre los 17 y los 35 años, lo que proporciona una amplia representación de grupos de edad. Aproximadamente el 70% de las imágenes corresponden a participantes masculinos y el 30% a participantes femeninas. Todas las imágenes para las diferentes emociones fueron capturadas para todos los usuarios participantes. No se realizaron procesos de selección previa ni exclusión de imágenes, lo que garantiza una representación completa de las expresiones emocionales de las y los participantes en la base de datos.

Es importante destacar que la base de datos de Forte no se utilizó para entrenar el modelo de reconocimiento de emociones. Solo se utilizó para realizar pruebas del modelo previamente entrenado, el cual se había desarrollado utilizando el conjunto de datos FER -2013.

Para el entrenamiento se configuró la CNN con épocas, una tasa de aprendizaje de 0.0001, así como la estrategia de aprendizaje tipo Adam²⁵. De igual forma, para validar la eficiencia del entrenamiento y el número de instancias utilizadas, se hicieron cinco particiones diferentes, como se describe en la Tabla 2.

Tabla 2. Descripción de cinco particiones de datos con diferente número de instancias utilizadas para medir la eficiencia del entrenamiento de la CNN. Fuente: elaboración propia

Dataset	Número de instancias
1	4800
2	9600
3	14400
4	19200
5	24176

El número de particiones se estableció de forma empírica considerando el tiempo de respuesta del entrenamiento de la CNN, así como el resultado obtenido. De igual manera, la cantidad de instancias para cada emoción se mantuvo proporcional a la cantidad correspondiente en toda la base de datos. Todos los experimentos fueron programados en el lenguaje Python, utilizando la librería TensorFlow 2.14. Para su ejecución se utilizó una computadora con un procesador Intel Core i7 de 8va. generación y 8 GB en RAM.

Una vez realizados los experimentos descritos previamente, se obtuvieron resultados relevantes que demostraron que tanto la arquitectura utilizada en la CNN como el conjunto de datos de entrenamiento, fueron adecuados.

La Figura 5 ilustra el desempeño del entrenamiento de la CNN en términos de la métrica de exactitud utilizando las diferentes particiones de datos descritas previamente en la Tabla 2.

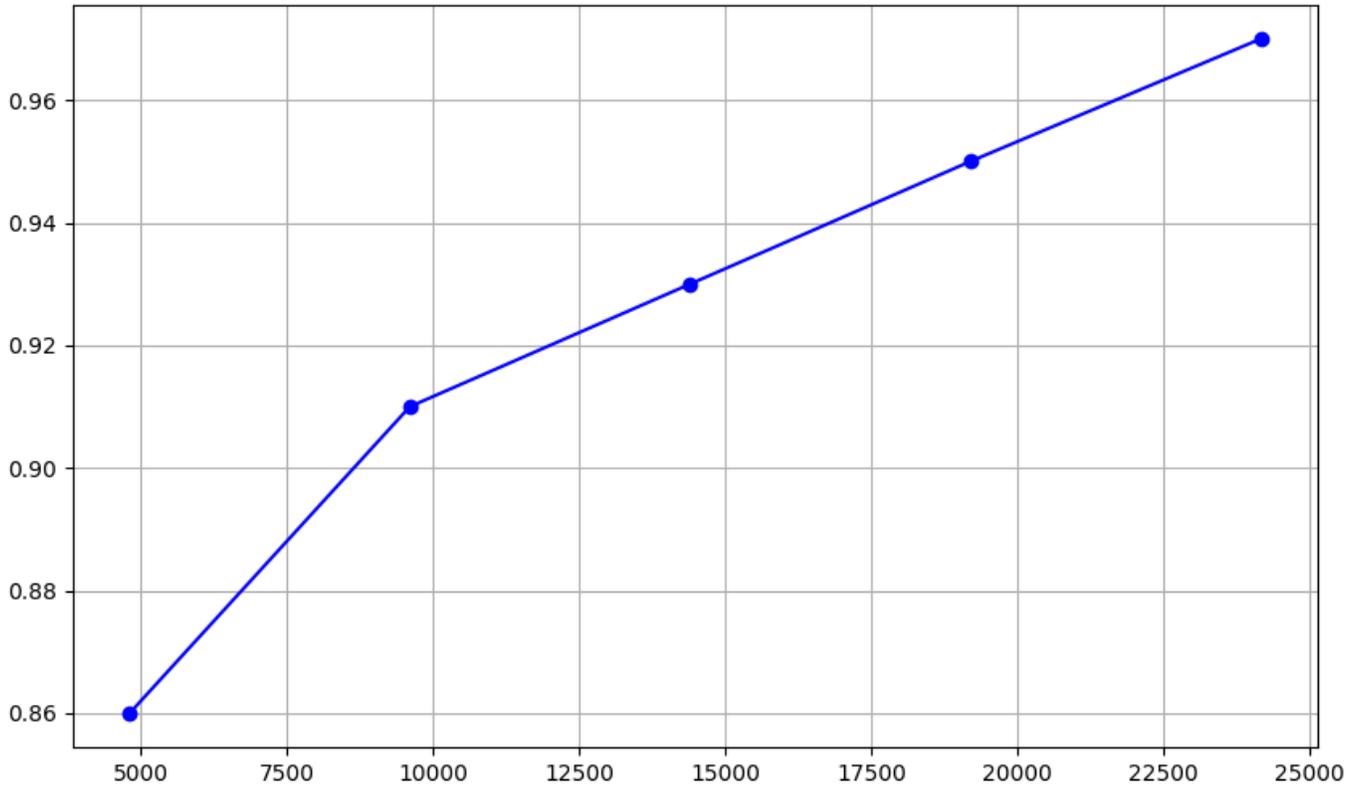


Figura 5. Comportamiento de la eficiencia del entrenamiento de la CNN utilizando diferentes particiones de datos. El eje x representa el número de instancias utilizadas para entrenar la CNN, el eje y representa la exactitud. Fuente: elaboración propia

Como se ilustra en la Figura 5, el desempeño de entrenamiento de la CNN, en términos de exactitud, aumentó conforme se incrementó el número de instancias utilizadas. En la Tabla 3 se describe la matriz de confusión correspondiente al conjunto de datos de prueba de la base de datos FER-2013 utilizando todo el conjunto de datos de entrenamiento.

Tabla 3. Matriz de confusión correspondiente a la clasificación de emociones utilizando la base de datos de prueba FER-2013, la cual contiene 6053 instancias. Fuente: elaboración propia

		Clase obtenida				
		Enojo	Felicidad	Neutro	Tristeza	Sorpresa
Clase esperada	Enojo	929	0	10	0	19
	Felicidad	0	1721	0	0	53
	Neutro	0	0	1196	367	0
	Tristeza	0	0	38	1219	0
	Sorpresa	8	8	0	9	806

Con base a los datos descritos en la Tabla 3, la mayor exactitud obtenida fue de 0.97. Este resultado se logró entrenando previamente la CNN utilizando el conjunto de datos de entrenamiento completo; el cual consta de 24,176 instancias.



De manera consecuente, en la Figura 6 se ilustra el desempeño de entrenamiento de la CNN a lo largo de 100 épocas, utilizando la base de datos de entrenamiento con 24,176 instancias, con la cual se logró el desempeño más alto (0.97).

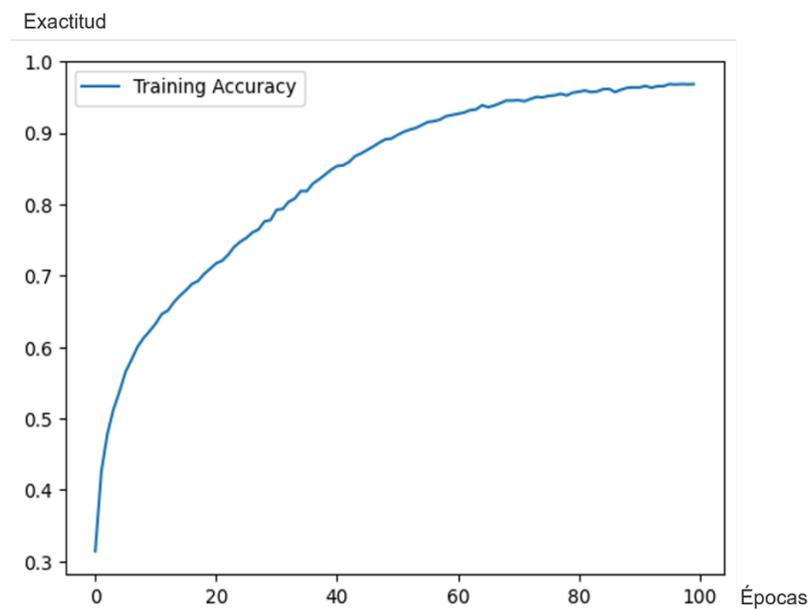


Figura 6. Gráfica del desempeño del entrenamiento de la CNN con base en la métrica de exactitud a lo largo de 100 épocas. El eje x representa el número de época, el eje y representa el desempeño de clasificación de la CNN en términos de exactitud (accuracy). Fuente: elaboración propia

Considerando la gráfica ilustrada en la Figura 6 y contrastada con la matriz de confusión descrita en la Tabla 3, se puede comprobar que el número de épocas establecidas fue adecuado, debido a que, a partir de la época 90, la eficiencia de la clasificación, con base en la métrica de exactitud (*accuracy*) se mantuvo estable.

En la siguiente etapa de la experimentación, se puso a prueba la CNN utilizando el conjunto de imágenes de prueba de la base de datos FER-2013. Al igual que en la etapa de entrenamiento, se realizó una prueba por cada base de datos de entrenamiento utilizada en la etapa previa. Este procedimiento permitió contrastar el efecto del entrenamiento de la

CNN con el banco de imágenes de prueba y de esta forma demostrar que, utilizando el conjunto de datos de entrenamiento con el mayor número de instancias, se logró una mayor eficiencia en términos de exactitud de clasificación. La Tabla 4, describe la matriz de confusión del desempeño en términos de exactitud al entrenar la CNN con el conjunto de entrenamiento de 4,800 instancias y probarla con la base de datos de la empresa Forte Innovation.



Tabla 4. Matriz de confusión correspondiente a la clasificación de emociones utilizando la base de datos de la empresa Forte Innovation, utilizando una base de datos con 4,800 instancias para el entrenamiento de la CNN. Fuente: elaboración propia

		Clase obtenida				
		Enojo	Felicidad	Neutro	Tristeza	Sorpresa
Clase esperada	Enojo	12	1	1	1	1
	Felicidad	2	11	3	1	4
	Neutro	4	3	11	1	4
	Tristeza	2	2	4	17	1
	Sorpresa	0	3	1	0	10

Con base en la matriz de confusión descrita en la Tabla 4, el desempeño de clasificación obtenido por la CNN, en términos de exactitud, fue de 0.61.

La Tabla 5 describe la matriz de confusión obtenida al entrenar la CNN con 9,600 instancias y probarla con la base de datos de la empresa Forte Innovation.

Tabla 5. Matriz de confusión correspondiente a la clasificación de emociones usando a base de datos de la empresa Forte Innovation, utilizando una base de datos con 9,600 instancias para el entrenamiento de la CNN. Fuente: elaboración propia

		Clase obtenida				
		Enojo	Felicidad	Neutro	Tristeza	Sorpresa
Clase esperada	Enojo	16	1	2	0	1
	Felicidad	1	13	1	1	1
	Neutro	2	4	13	1	1
	Tristeza	0	1	2	17	1
	Sorpresa	1	1	2	1	16

Con base en la matriz de confusión descrita en la Tabla 5, el desempeño de clasificación obtenido por la CNN, en términos de exactitud fue de 0.75 el cual, aumentó con respecto al obtenido con los datos de la Tabla 4.

La Tabla 6 describe la matriz de confusión obtenida al entrenar la CNN con 14,400 instancias y probarla con la base de datos de la empresa Forte Innovation.



Tabla 6. Matriz de confusión correspondiente a la clasificación de emociones utilizando la base de datos de la empresa Forte Innovation, utilizando una base de datos con 14,400 instancias para el entrenamiento de la CNN

		Clase obtenida				
		Enojo	Felicidad	Neutro	Tristeza	Sorpresa
Clase esperada	Enojo	16	1	1	0	1
	Felicidad	1	13	2	1	0
	Neutro	2	3	14	1	2
	Tristeza	1	1	2	18	1
	Sorpresa	0	2	1	0	16

Con base en la matriz de confusión descrita en la Tabla 6, el desempeño de clasificación obtenido por la CNN, en términos de exactitud fue de 0.77, el cual aumentó sensiblemente con respecto a los resultados obtenidos previamente.

La Tabla 7 describe la matriz de confusión obtenida al entrenar la CNN con 19,200 instancias y probarla con la base de datos de la empresa Forte Innovation.

Tabla 7. Matriz de confusión correspondiente a la clasificación de emociones utilizando la base de datos de la empresa Forte Innovation, utilizando una base de datos con 19,200 instancias para el entrenamiento de la CNN. Fuente: elaboración propia

		Clase obtenida				
		Enojo	Felicidad	Neutro	Tristeza	Sorpresa
Clase esperada	Enojo	16	1	2	0	1
	Felicidad	1	13	1	1	1
	Neutro	2	4	13	1	1
	Tristeza	0	1	2	17	1
	Sorpresa	1	1	2	1	16

Con base en la matriz de confusión descrita en la Tabla 7, el desempeño de clasificación obtenido por la CNN, en términos de exactitud fue de 0.89, el cual, comenzó a ser satisfactorio.

Finalmente, se realizó la clasificación utilizando la CNN con todo el conjunto de datos de entrenamiento, el cual, constó de 24,176 instancias. La Tabla 8, describe la matriz de confusión obtenida al entrenar la CNN con todo el conjunto de datos de entrenamiento y probarla con la base de datos de la empresa Forte Innovation.



Tabla 8. Matriz de confusión correspondiente a la clasificación de emociones utilizando la base de datos de la empresa Forte Innovation, utilizando una base de datos con 19,200 instancias para el entrenamiento de la CNN. Fuente: elaboración propia

Clase obtenida

		Clase obtenida				
		Enojo	Felicidad	Neutro	Tristeza	Sorpresa
Clase esperada	Enojo	18	0	0	0	0
	Felicidad	0	19	0	1	0
	Neutro	1	1	20	1	1
	Tristeza	0	0	0	18	1
	Sorpresa	1	0	0	0	18

Con base en los datos descritos en la Tabla 8, el mayor desempeño de clasificación obtenido por la CNN, en términos de la métrica de exactitud, fue 0.97.

En la Figura 7 se ilustra el desempeño de la CNN en términos de exactitud, al entrenarse con los diferentes conjuntos de datos y probarse con la base de datos de Forte.

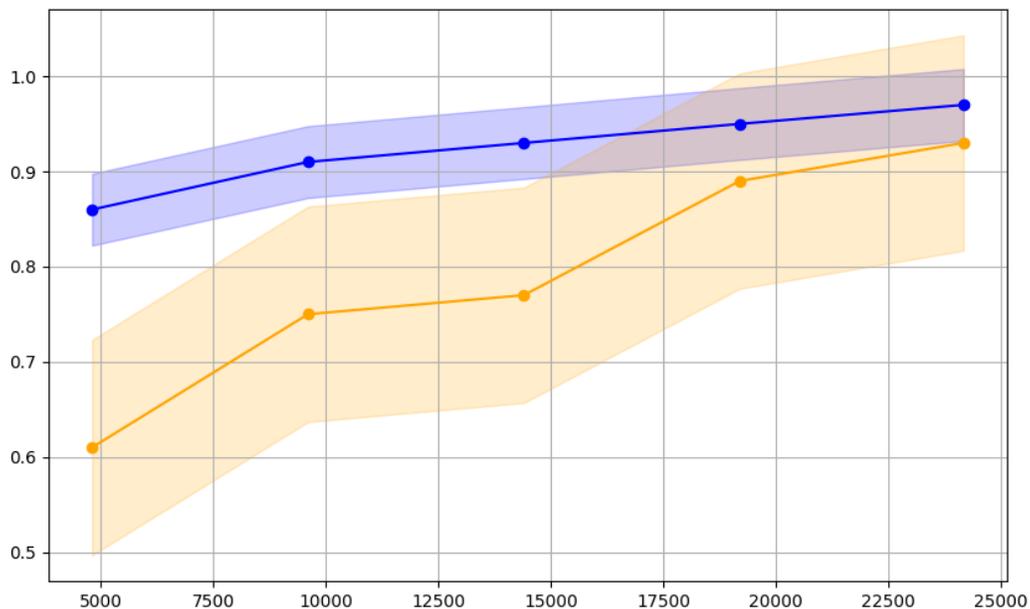


Figura 7. Comparación del desempeño de la exactitud en la clasificación entre el número de instancias utilizadas para entrenar la CNN y probarla con las instancias de prueba de la base de datos FER-2013 (línea azul) y el resultado de clasificación al probarla con la base de datos de Forte (línea naranja). El eje x representa el número de instancias utilizadas para entrenar la CNN. El eje y representa la exactitud. Las sombras en cada gráfica representan el error de variación en la clasificación. Fuente: elaboración propia



Con la finalidad de asegurar la confiabilidad de los resultados presentados previamente, se realizó el cálculo del índice de Jaccard, obteniéndose un valor de 0.96, el cual permitió corroborar la fiabilidad de la CNN para clasificar las emociones.

Es importante mencionar que los resultados obtenidos superaron sensiblemente a los reportados por Yahia Said y Mohammad Barr²⁶, donde el desempeño en términos de exactitud fue de 0.95.

De igual forma, la diferencia del 4 % en el rendimiento entre la base de datos FER-2013 y la base de datos de Forte Innovation, puede atribuirse a factores como la diferencia en el tamaño de los conjuntos de datos, la distribución de clases y posibles sesgos en la evaluación del modelo. Aunque estas diferencias tuvieron influencia en los resultados obtenidos, su impacto en el rendimiento general del clasificador no fue relevante. Ambos conjuntos de datos proporcionaron resultados similares, lo que sugiere que el modelo es robusto y efectivo en la clasificación de emociones independientemente de la base de datos utilizada.

Discusión

La clasificación automática de emociones a partir de imágenes faciales es desafiante debido a la necesidad de identificar un conjunto adecuado de características. Las redes neuronales convolucionales (CNN) son una opción eficaz en este escenario. Sin embargo, aún persiste el desafío de diseñar una arquitectura adecuada que garantice alta precisión. Se optó por utilizar una CNN previamente probada y reportada en el estado del arte para realizar la tarea de clasificación de emociones de empleados de la empresa Forte. Los resultados obtenidos

respaldaron la eficiencia de la arquitectura de la red neuronal utilizada para clasificar las emociones. De manera inicial, se utilizó una base de datos de imágenes de dominio público para el entrenamiento y prueba de la CNN. Posteriormente, se midió el desempeño de la CNN previamente entrenada, utilizando una segunda base de datos independiente para validar la arquitectura y el aprendizaje de la CNN en términos de las métricas *accuracy* e índice Jaccard. Como trabajo futuro, es posible explorar otras arquitecturas y técnicas de aprendizaje, como la transferencia de conocimiento y las redes neuronales adversariales.

Conclusiones

En este artículo se describió la arquitectura de una red neuronal convolucional utilizada para realizar la clasificación de emociones, a partir de imágenes de rostros de personas. Los resultados obtenidos demostraron la eficiencia de la red neuronal convolucional para realizar la clasificación, lográndose una eficiencia de clasificación, en términos de las métricas *accuracy* e índice Jaccard, de 0.97 y 0.96, respectivamente. Estos resultados se obtuvieron al utilizar un conjunto de datos de prueba de la base de datos FER-2013, de la cual se tomó de forma independiente el conjunto de datos de entrenamiento de la CNN. Posteriormente, con la finalidad de asegurar los resultados obtenidos, se midió el desempeño de clasificación de la CNN previamente entrenada, utilizando una base de datos de imágenes adicional. De manera similar, se obtuvo un desempeño en la clasificación de emociones en términos de las métricas *accuracy* e índice de Jaccard igual a 0.93. Con base en lo anterior, es posible utilizar la arquitectura elegida para la red neuronal convolucional, en un entorno productivo dentro de la empresa Forte Innovation.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica de León, así como a la empresa Forte Innovation, por la oportunidad que brindaron para la realización de este trabajo, incluida la estadía profesional de Técnico Superior Universitario del alumno Gabriel Ramos Zacarías.

Declaración sobre disponibilidad de datos

En esta investigación se utilizó un banco de imágenes de dominio público denominado *Facial Emotion Recognition (FER-2013)*, alojado en un repositorio llamado Kaggle, disponible en <https://www.kaggle.com/datasets/msambare/fer2013>.

Referencias

1. COE, James and Atay, Mustafa. Evaluating Impact of Race in Facial Recognition across Machine Learning and Deep Learning Algorithms. *Computers*. [En línea]. Vol. 10 (9), p. 113. Septiembre 2021. [Fecha de consulta: 17 de abril de 2024]. <https://doi.org/10.3390/computers10090113> ISSN: 2073-431X.
2. FUAD, Tahmid Hasan; Fime, Awal Ahmed; Sikder, Delowar; Iftee, Akil Raihan; Rabbi, Jakaria; Al-Rakhami, Mabrook S., et al. Recent Advances in Deep Learning Techniques for Face Recognition. *IEEE Access*. [En línea]. Vol. 9, pp. 99112-99142. 09 July 2021. [Fecha de consulta: 17 de abril de 2024]. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3096136> ISSN: 2169-3536.
3. SMYS, Smys; Chen, Joy long Zong and Shakya, Subarna. Survey on Neural Network Architectures with Deep Learning. *Journal of Soft Computing Paradigm*. Vol. 2, pp. 186-194. 30 de julio de 2020. ISSN: 2582-2640.
4. O'TOOLE, Alice and Castillo, Carlos. Face Recognition by Humans and Machines: Three Fundamental Advances from Deep Learning. *Annual Review of Vision Science*. [En línea]. Vol. 7, pp. 543-570. September 2021. [Fecha de consulta: 17 de abril de 2024]. <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-vision-093019-111701> ISSN: 2374-4650.
5. ZULFIQAR, Maheen; Syed, Fatima; Khan, Jaleed y Khurshid, Khurram. Deep Face Recognition for Biometric Authentication. *International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering*. 24-25 July 2019. Swat, Pakistan. ISBN: 978-1-7281-3825-1.
6. ZOU, Jie; Ji, Qiang and Nagy, George. A Comparative Study of Local Matching Approach for Face Recognition. *Transactions on Image Processing*. [En línea]. Vol. 16, núm. 10, pp. 2617 - 2628. October 2007. [Fecha de consulta: 17 de abril de 2024]. https://sites.ecse.rpi.edu/~qji/Papers/TIM_FR.pdf ISSN: 1057-7149.
7. PARMAR, Divyarajsinh N. and Mehta, Brijesh B. Face Recognition Methods & Applications. *International Journal of Computer Technology and Applications*. [En línea]. Vol. 4 (1), pp. 84-86. January 2014. [Fecha de consulta: 17 de abril de 2024]. https://www.researchgate.net/publication/260483303_Face_Recognition_Methods_Applications ISSN: 2229-6093.
8. SHNAIN, Noor Abdalrazak; Hussain, Zahir M. and Lu, Song Feng. A Feature-Based Structural Measure: An Image Similarity Measure for Face Recognition. *Applied Sciences*. [En línea]. Vol. 7 (8), p. 17. 03 August, 2017. [Fecha de consulta: 17 de abril de 2024]. <https://www.mdpi.com/2076-3417/7/8/786> ISSN: 2076-3417.
9. THAKKAR, Ankit; Jivani, Nimeshkumar; Padasumbiya, Jigneshkumar and Patel, Chirag I. A new hybrid method for face recognition. *2013 Nirma University International Conference on Engineering (NUI-CONE)*. India. 2013.
10. ZHAO, Deli; Lin, Zhouchen and Tang, Xiaou. Laplacian PCA and Its Applications. *IEEE International Conference on Computer Vision*. 26 December 2007. pp. 1-8. ISBN: 978-1-4244-1631-8.
11. HE, Xiaofei; Yan, Shuicheng; Hu, Yuxiao y Niyogi, Partha. Face Recognition Using Laplacian faces. *Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Vol. 27 (3), pp. 328-340. March 2005. ISSN: 0162-8828.



12. MOGHADDAM, Baback; Jebara, Tony and Pentland, Alex. Bayesian face recognition. *Pattern Recognition*. [En línea]. Vol. 33, pp. 1771-1782. 2000. [Fecha de consulta: 17 de abril de 2024]. Disponible en <https://www.cse.unr.edu/~bebis/CS479/PaperPresentations/BayesianFaceRecognition2.pdf> ISSN: 0031-3203.
13. GOODFELLOW, Ian J., Erhan, Dumitru; Carrier, Pierre Luc; Courville, Aaron; Mirza, Mehdi; Hamner, Ben; et al. Challenges in representation learning: A report on three machine learning contests. *International Conference on Neural Information Processing (ICONIP 2013)*, pp. 117-124. Daegu, Korea.
14. Forte Innovation. *Forte Innovation*. [En línea]. 2023. [Fecha de consulta: 30 de octubre de 2023]. <https://forteinnovation.mx/>
15. RAVANELLI, Mirco and Bengio, Yoshua. Interpretable Convolutional Filters with SincNet. *Electrical Engineering and Systems Science*. Agosto 2019. ISSN: 0885-8993.
16. KARNATI, Mohan; Seal, Ayan; Bhattacharjee, Debotosh; Yazidi, Anis y Krejcar Ondrej. Understanding Deep Learning Techniques for Recognition of Human Emotions Using Facial Expressions: A Comprehensive Survey. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. January 2023. ISSN: 1557-9962.
17. ALZUBAIDI, Laith; Zhang, Jinglan; Humaidi, Amjad J., Al-Dujaili, Ayad; Duan, Ye; Al-Shamma, Omran, et al. Review of deep learning: concepts, CNN architectures, challenges, applications, future directions. *Journal of Big Data*. [En línea]. 2021, Vol. 8 (53). 2021. [Fecha de consulta: 17 de abril de 2024]. Disponible en <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8010506/> ISSN: 2196-1115.
18. ZHANG, Jinghua; Li, Chen; Yin, Yimin; Zhang, Jiawei y Grzegorzec, Marcin. Applications of artificial neural networks in microorganism image analysis: a comprehensive review from conventional multilayer perceptron to popular convolutional neural network and potential visual transformer. *Artificial Intelligence Review*. Vol. 56 (6), pp. 1013–1070. May 2022. ISSN: 1573-7462.
19. LIU, Tianyi; Fang, Shuangshang; Zhao, Yuehui; Wang, Peng y Zhang, Jun. Implementation of Training Convolutional Neural Networks. *Computer Science*. Junio 2015, p. 10. ISSN: 1508-2806.
20. BHATT, Dulari; Patel, Chirag; Modi, Kirit; Pandya, Sharnil and Ghayvat, Hemant. CNN Variants for Computer Vision: History, Architecture, Application, Challenges and Future Scope. *Computer Science and Engineering*. Vol. 10. October 2021. ISSN: ISSN 2231-329X.
21. WU, Jianxin. *Introduction to Convolutional Neural Networks*. National Key Lab for Novel Software Technology, Nanjing University, China. 2017.
22. KHAIREDDIN, Yousif and Chen, Zhuofa. *Facial Emotion Recognition: State of the Art Performance on FER2013*. Dept. of Electrical and Computer Engineering, Boston University, Boston, MA, USA. May 2021.
23. KUSAWA, Sunny. *Machine Learning: Quick & easy guide for every beginner*. July 4, 2022. Kindle Edition.
24. BADRULHISHAM, Nur and Mangshor, Nur. Emotion Recognition Using Convolutional Neural Network (CNN). *Journal of Physics: Conference Series*. [En línea]. 1962 (2021). [Fecha de consulta: 17 de abril de 2024]. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/353469445_Emotion_Recognition_Using_Convolutional_Neural_Network_CNN ISSN: 1742-6596.
25. OGUNDOKUN, Roseline; Maskeliunas, Rytis; Misra, Sanjay and Damaševičius, Robertas. Improved CNN Based on Batch Normalization and Adam Optimizer. En: *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2022 Workshops* Malaga, Spain, July 4–7, 2022, pp. 593-604. Proceedings, Part V. LNCS: 13380.
26. YAHIA Said, and Mohammad Barr. Human emotion recognition based on facial expressions via deep learning on high-resolution images. *Multimedia Tools and Applications*. Vol. 80 (16), pp. 25241-25253. 2021. ISSN: 1573-7721.

Fecha de recepción

Fecha de aceptación

Fecha de publicación

7/11/2023

11/7/2024

31/01/2025

Efecto de la aplicación de cuatro tratamientos en el cultivo de cilantro (*Coriandrum sativum*) Pakistán

Effect of four treatments on coriander (Coriandrum sativum) crop Pakistan

Maribel Ramos Aguilar, Víctor Antonino Cortés Pérez, Miguel Ángel Flores Tapia y David Nava Calderón / Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Salvatierra

Resumen

Una de las prácticas comunes empleadas en la producción de hortalizas a lo largo del tiempo ha sido el uso intensivo de los agroquímicos, esto ha dado pauta a la búsqueda de alternativas que permitan la producción de alimentos libres de componentes nocivos para el ser humano. Por lo tanto, se realizó un estudio en el Instituto Tecnológico Superior de Salvatierra, con la finalidad de ver los efectos de la aplicación de cuatro fertilizantes (uno químico de origen comercial y tres orgánicos) en el cultivo de cilantro. Se estableció un diseño experimental completamente al azar, en un área de 320 m², y se analizó la respuesta en cuatro variables: altura, peso de raíz, tamaño de raíz, número de folíolos, biomasa fresca total y biomasa seca total.

Los resultados mostraron que existen algunas diferencias significativas en el efecto entre tratamientos sobre las variables evaluadas en el cilantro.

Palabras clave: fertilización, seguridad alimentaria, cilantro.

Abstract

One of the common practices used in vegetable production over time has been the intensive use of agrochemicals, this has given rise to the search for alternatives that allow the production of foods free of components harmful to humans. Therefore, a study was carried out at Instituto Tecnológico Superior de Salvatierra, with the aim of seeing the effects of the application of four fertilizers (one commercial chemical origin and three organic) on the cultivation of cilantro. A completely randomized experimental design was established in an area of 320 m², and the response was analyzed in four variables: height, root weight, root size, number of leaflets, total fresh biomass and total dry biomass. The results showed that there are some significant differences in the effect between treatments on the variables evaluated in cilantro.

Keywords: agriculture fertilization, food security, cilantro.



Introducción

El cilantro (*Coriandrum sativum*) es una es una hierba aromática de crecimiento anual. Pertenece a la clase Dicotiledónea, de la familia *Apiaceae*.

Se cultiva desde hace más de 5,000 años, y se ha trazado su uso en el antiguo Egipto, desde donde saltó a la antigua Grecia (donde se comía y se usaba para crear aceites y perfumes) y el Imperio Romano; también se destaca que su uso es muy común tanto en la mediterránea como en otras cocinas orientales; o en Sudamérica.

Puede ser cultivado bajo diferentes condiciones climáticas, tolerando incluso heladas ligeras; sin embargo, las temperaturas entre 10 y 30 °C proveen las condiciones óptimas de crecimiento; un clima muy cálido causa que florezca rápidamente y que el desarrollo de follaje se vea disminuido; para poder cosecharlo se requieren entre 40 y 45 días (Hernández, 2020)¹.

En México, el cultivo de cilantro se presenta durante todo el año. La siembra puede ser directa o por trasplante, y puede cultivarse en camas elevadas de 97 a 102 cm con dos líneas por cama. Las líneas de semillas pueden variar desde 5 a 13 cm de ancho. Dependiendo del ancho de la línea de semilla y de la población de siembra deseada, se usan dosis de semilla de 28 a 112 kg/ha. Las semillas son localizadas a profundidades de 0.64 a 1.27 cm, y se considera un buen establecimiento de línea de semilla entre dos a cuatro plantas por 0.31 cm² (SIAP, 2023)².

En cuanto a la fertilización del cultivo de cilantro, esta depende de los nutrientes del suelo, así como la variedad. Kehr, Tropa y

Martínez-Lagos (2014) señalan además que “Es un cultivo de ciclo corto, siendo una especie que responde bien a la fertilización, especialmente nitrogenada, dada la importancia de producir hojas”³.

Entre las enfermedades más comunes destacan las producidas por *Fusarium oxysporum*, *Rhizoctonia sp.* y *Phytophthora sp.* El *Phytophthora* se desarrolla en condiciones de alta densidad de siembra, humedad relativa alta y suelos con mal drenaje; otro factor importante es el monocultivo, ya que la falta de rotación cultural favorece la permanencia del problema.

En 2017 México exportó 64 mil 647 toneladas, con destino a cinco naciones, destaca Estados Unidos, quien adquirió 98.1 %; durante los últimos seis años, el volumen de exportación se incrementó 123.2 %, por lo que la venta del cultivo al extranjero generó divisas por 47.3 millones de dólares (SIAP, 2018)⁴.

La cosecha del cilantro puede realizarse de tres formas distintas, aunque el método más común es cortando el follaje de cuatro a cinco centímetros por encima de la corona, cuando se tienen varias plantas se colocan en manojos por medio de una banda de goma o atadura; otro método es cortar toda la planta justo por debajo del suelo, y varias plantas son puestas en manojos.

Objetivos

Objetivo general

Analizar el efecto de cuatro fertilizantes en la producción de cilantro (*Coriandrum sativum*) en condiciones de riego por goteo.

Objetivo específicos

- Aplicar un tratamiento comercial y tres orgánicos en el cultivo de cilantro.
- Identificar el efecto en las variables de respuesta: altura, número de folíolos, tamaño de raíz, biomasa fresca total y biomasa seca total.
- Establecer un sistema de riego por goteo para proporcionar la cantidad de agua necesaria para el cultivo.
- Fundamentar los resultados obtenidos por medio del análisis estadístico.

implementarse alternativas que permitan minimizar el uso descontrolado e incensario de fertilizantes de origen químico.

Por la importancia mencionada en este trabajo se decidió realizar la comparación de cuatro fertilizantes, uno de ellos químico y tres del tipo orgánico, sobre la producción del cilantro, con la finalidad de apreciar sus efectos tales como: altura, número de folíolos, tamaño de raíz y biomasa fresca total haciendo uso de un sistema de riego por goteo no automatizado.

Hipótesis

Ho: No existe una diferencia significativa entre los cuatro tratamientos sobre las diferentes variables de estudio en el cultivo de cilantro.

Ha: Sí existe una diferencia significativa entre los cuatro tratamientos sobre las variables de estudio en el cultivo de cilantro.

Planteamiento del problema

Los fertilizantes son productos que representan el mayor porcentaje de los costos de producción de un cultivo. Muchos de los agricultores aplican la fertilización química de manera desmedida, sin ser conscientes de la necesidad de nutrientes real del suelo y de los cultivos, lo cual genera un aumento de los costos de producción, pero sobre todo se ha tenido desde hace mucho tiempo una falta de consideración hacia los recursos naturales.

El uso de los abonos orgánicos contribuye al mejoramiento de las estructuras y fertilización del suelo a través de la incorporación de nutrimento y microorganismos (Yanque Humaní, 2014)⁵. Sin embargo, el hecho de fertilizar con abonos orgánicos también implica un cambio de conciencia: deben

Método de trabajo

El estudio se realizó en el campo experimental del Instituto Tecnológico Superior de Salvatierra, ubicado en la comunidad de Janicho, Salvatierra, Gto



Figura. 1 Localización del área donde se realizó el diseño experimental Fuente: elaboración propia



Se utilizó una extensión de terreno de 320 m², la cual se dividió en camas. Se estableció un diseño experimental completamente al azar (Figura 2), con cuatro tratamientos (uno comercial y tres orgánicos) como a continuación se describe: T1= Brinco (químico); T2= Fertiguano; T3= Biofermento.; T4= Biofermento de alfalfa. Con la finalidad de apreciar el efecto en las variables de respuesta: altura, número de folíolos, tamaño de raíz, peso de raíz, biomasa fresca total y biomasa seca total. Estos datos se sometieron a un análisis de varianza ($P \geq 0.05$).

T1	T2	T3	T4
T2	T3	T4	T1
T3	T4	T1	T2
T4	T1	T2	T3

Figura. 2. Arreglo experimental para la aplicación de los tratamientos

Asimismo, al existir una necesidad hídrica importante en el lugar, se estableció un sistema de riego por goteo no automatizado, con la finalidad de hacer un uso adecuado del agua. El sistema de riego por goteo consistió en dos líneas por cama con cintilla de calibre 8000 de 16 mm de diámetro, con goteros cada 20 cm con caudal de 1 L h⁻¹. Este tipo de riego se conoce como localizado porque humedece un sector de volumen de suelo, suficiente para un buen desarrollo del cultivo, y ofrece la posibilidad de efectuar riegos frecuentes que

permiten reducir notoriamente el peligro de estrés hídrico (Medrano Rodríguez y Reyes Mejía, 2021)⁶.

Se realizó un deshierbe mecánico, y para el control de plagas y enfermedades se usó Cipermetrina y Oxicob Mix (Oxicloruro de cobre: al 39 % + Mancozeb: al 30 %), utilizando las dosis señaladas por el fabricante.

Para la aplicación de los tratamientos se establecieron las dosis y frecuencias como se describe en la Tabla 1.

Tabla 1. Dosis y frecuencia de aplicación de los tratamientos.

Tratamiento	Producto	Dosis	Frecuencia
T1	Brinco®	8 ml/L de agua	2 veces/semana
T2	Fertiguano	15 ml/L de agua	2 veces/semana
T3	Biofermento	20 ml/L de agua	2 veces/semana
T4	Fermento de alfalfa	20 ml/L de agua	2 veces/semana

Resultados

Altura

El Análisis de Varianza (ANOVA) indica que no existe una diferencia significativa de los tratamientos en la altura, como se observa en la Tabla 2. Sin embargo, en la comparación de medias de tratamientos el T1 (Brinco) y T2 (Fertiguano) tuvieron la mejor respuesta dentro de esta variable (ver la Figura 3).

Tabla 2. ANOVA: Altura del cilantro (*Coriandrum sativum*).
Fuente: elaboración propia

FV	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F cal	Pr > F
Tratamiento	3	5.020	1.673	0.13	0.9420
Error	12	157.660	13.138		
Total	15	162.680			

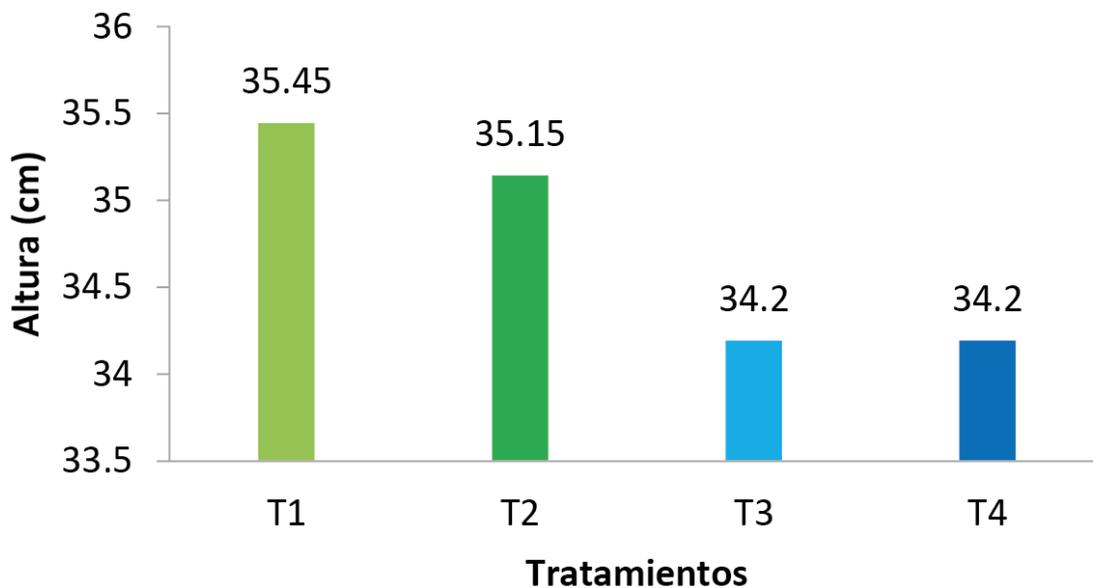


Figura 3. Diferencias de altura de los tratamientos. Fuente: elaboración propia



Número de foliolos

Para el caso del número de foliolos, el Análisis de Varianza (ANOVA) arroja que estadísticamente, de manera global no hay una diferencia significativa de los tratamientos sobre esta variable (ver la Tabla 3); pero en la comparación de medias de tratamientos se pudo apreciar que el T2 (Fertiguano) y el T3 (Biofermento) tuvieron la mejor respuesta en el desarrollo de los foliolos (ver Figura 4).

Tabla 3. ANOVA: Número de foliolos del cilantro (*Coriandrum sativum*). Fuente: elaboración propia

FV	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F cal	Pr > F
Tratamiento	3	13.250	4.4166	2.36	0.1233
Error	12	22.500	1.8750		
Total	15	35.750			

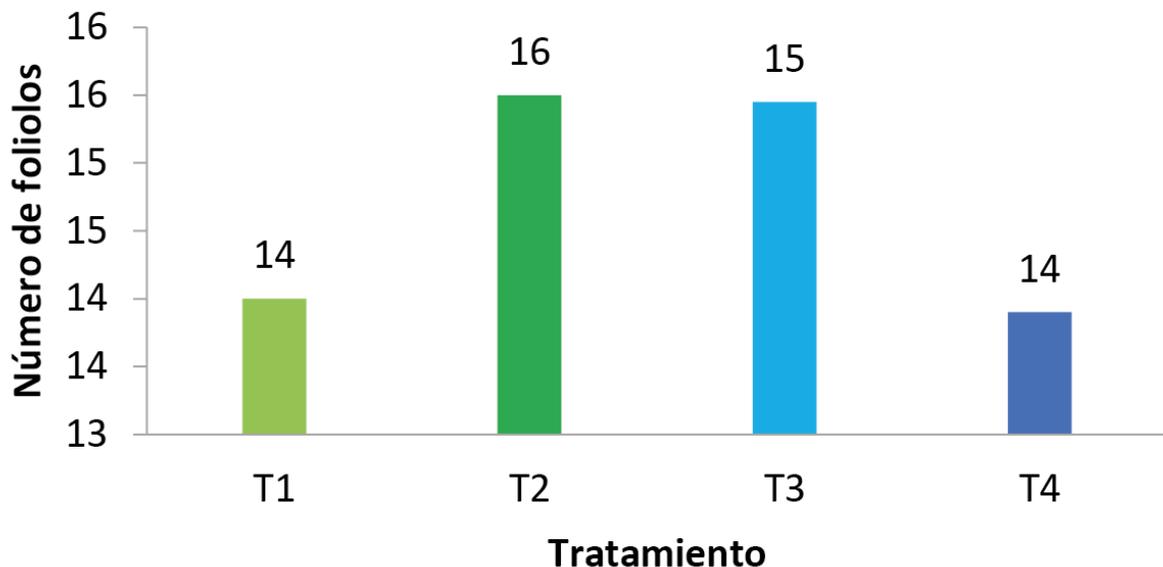


Figura 4. Número de foliolos desarrollados por tratamiento. Fuente: elaboración propia

Tamaño de raíz

Tabla 4. ANOVA: Tamaño de raíz. Fuente: elaboración propia

FV	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F cal	Pr > F		
Tratamiento			3	17.1500	5.7166	1.25	0.3336
Error			12	54.6800	4.5566		
Total			15	71.8300			

De acuerdo con el ANOVA, para el caso del tamaño de la raíz (Tabla 4), no existe una diferencia significativa entre los tratamientos, pero la comparación de medias de tratamientos por el método de Tukey arrojó que el Tratamiento 3 (Biofermento) y el Tratamiento 4 (Fermento de alfalfa) tuvieron la mejor respuesta en el desarrollo del sistema radicular de las plantas (ver la Figura 5).

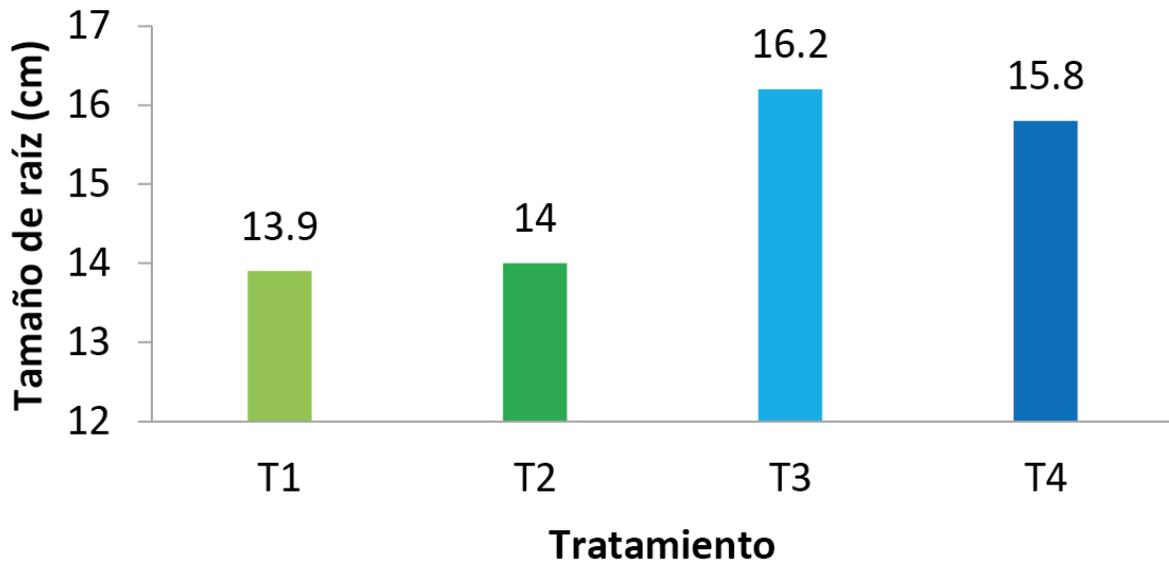


Figura 5. Tamaño de raíz por tratamiento. Fuente: elaboración propia



Peso de raíz

Tabla 5. ANOVA: Peso de raíz. Fuente: elaboración propia

FV	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F cal	Pr > F
Tratamiento	3	0.1400	0.0466	0.08	0.9680
Error	12	6.7400	0.5616		
Total	15	6.8800			

Para el caso del peso de raíz, el ANOVA (véase la Tabla 5) arrojó que no se tuvo una diferencia significativa entre los tratamientos aplicados, sin embargo, al comparar las medias de tratamientos se obtuvo que el T3 (Biofermento) obtuvo la mejor respuesta en el peso del sistema radicular de las plantas (ver Figura 6).

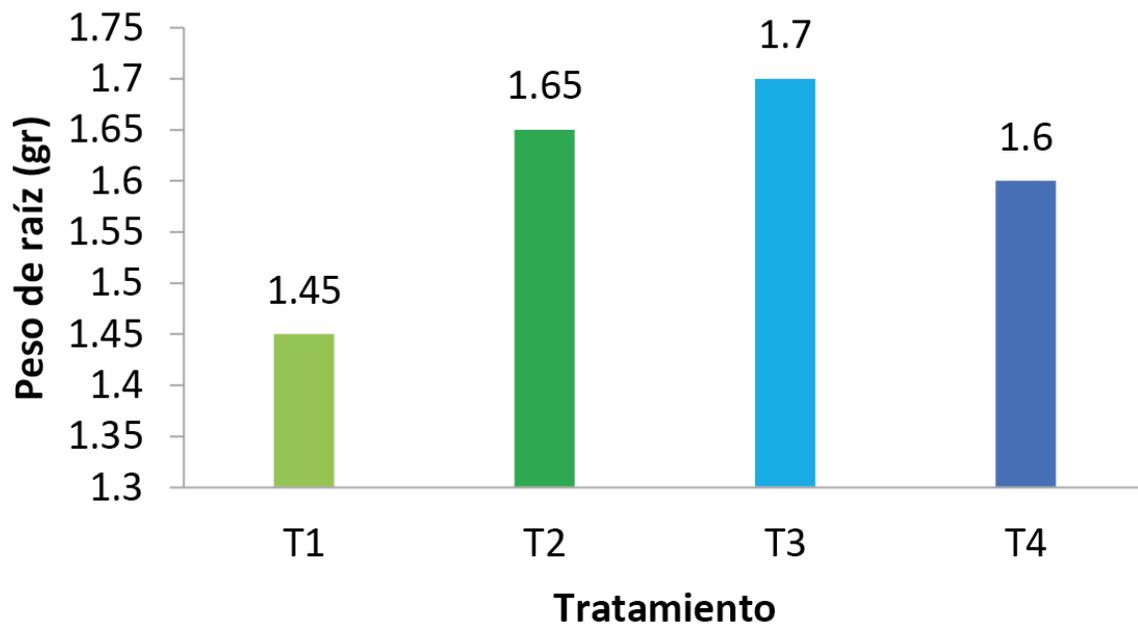


Figura 5. Tamaño de raíz por tratamiento.

Fuente: elaboración propia



Biomasa fresca

Tabla 6. ANOVA: Biomasa fresca total. Fuente: elaboración propia

FV	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F cal	Pr > F
Tratamiento	3	80.4275	26.8091	0.26	0.8525
Error	12	1235.1900	102.9325		
Total	15	1315.6175			

En el caso de la biomasa fresca, de acuerdo con los resultados del ANOVA (Tabla 6), se puede decir que no existe una diferencia significativa entre los tratamientos, sin embargo, en la diferencia de medias de tratamientos se observó que el T2 (Fertiguano) es el que obtuvo el mejor rendimiento en cuestión de biomasa en las plantas, teniendo 33.3 g/planta, seguido del T3 (Biofermento) con un 7.5 % menos de peso en comparación con el T2. Fueron estos los que mayor peso obtuvieron. Caso contrario a lo obtenido por el T1 (Brinco) y T4 (Fermento de alfalfa), los cuales obtuvieron un 14 % y 18 % menos de peso en relación con el Tratamiento 3 (ver la Figura 7).

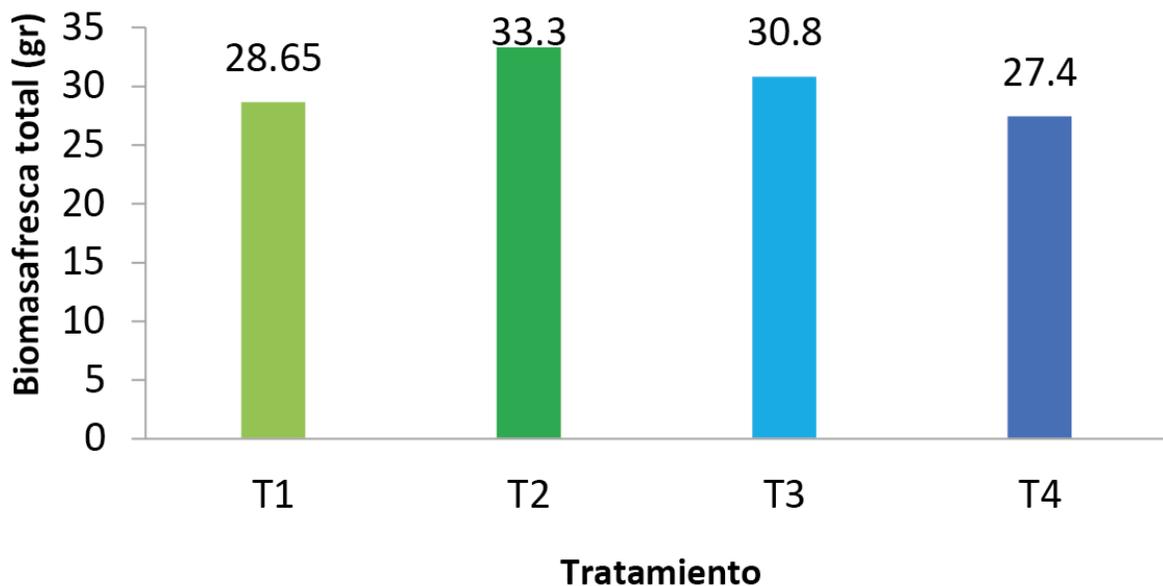


Figura 7. Biomasa fresca total. Fuente: elaboración propia



Discusión

De acuerdo con la investigación realizada con los cuatro fertilizantes sobre la altura del cilantro, se encontró que cumple con lo esperado por el consumidor en el mercado, pues, como afirman Cruz y colaboradores, en México, la altura aproximada del cilantro en los supermercados es de 20 cm, y en los mercados sobre ruedas se puede encontrar hasta de 30 a 35 cm en promedio⁷. Es así que los fertilizantes orgánicos tuvieron un efecto muy similar al del fertilizante químico, esto indica claramente que la fertilización orgánica puede ser competente a la hora de tener un cultivo con el estándar de altura establecido, en este caso.

En este estudio se obtuvo un peso promedio de masa fresca de 30.03 g/planta. Esto implica una cantidad de masa fresca de 6 kg/m², por lo que en los 320 m² se obtuvieron aproximadamente 1920 kg, lo cual indica que se tuvo un rendimiento dentro de los límites de producción. En este sentido, cabe considerar lo señalado por Guzmán y colaboradores (2018): “El rendimiento de biomasa fresca oscila entre 6 y 30 t ha⁻¹, y se asocia principalmente a la época de siembra, variedad, densidad de población, tipo de riego y la fertilización”⁸. En la misma fuente también se menciona que “los bajos rendimientos se asocian al manejo rustico de riego por gravedad, siembra manual, bajas dosis de fertilización y uso de semilla que se cosecha”⁸. Por lo tanto, se puede decir que el haber utilizado un manejo de agua por medio de riego por goteo contribuyó al mejor aprovechamiento del recurso y eso permitió que el rendimiento se haya visto favorecido.

Los resultados arrojan que estadísticamente, utilizando el Análisis de Varianza, no hubo una diferencia significativa en el efecto de los tratamientos; sin embargo, al utilizar la prueba de Tukey para comparar las medias entre dichos tratamientos, algunos de ellos presentaron diferencias.

Conclusión

El uso de fertilizantes orgánicos dentro de la producción de cilantro tiene un buen estímulo en distintos parámetros de la planta, siendo estos en altura, número de folíolos y la biomasa fresca total, lo cual conduce a determinar que el uso de fertiguano es una de las opciones viables para la nutrición de este cultivo, siendo el que obtuvo mayor productividad. De esta manera se puede aminorar el uso excesivo y descontrolado de los fertilizantes de origen sintético.

Lo apreciable en este estudio es que para todas las variables de respuesta se pudo observar que el producto comercial tiene un efecto muy similar al de los productos orgánicos. Esto conduce a la conclusión de que los productos orgánicos representan una fuente de nutrición sustentable para la producción de otros cultivos.



Referencias

1. HERNÁNDEZ, Héctor. El cilantro, mucho más que un condimento. En: *Bon Viveur/Gastroteca* [En línea]. 2020. [Fecha de consulta 17 de febrero de 2024]. Disponible en: <https://www.bonviveur.es/gastroteca/el-cilantro-mucho-mas-que-un-condimento>
2. SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). Cilantro. En: *Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural*. [En línea]. 2023. [Fecha de consulta 11 de marzo de 2024]. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/838418/Cilantro_monografi_a_2023.pdf
3. KEHR, Elizabeth; Tropa, Samanta y Martínez-Lagos, Josué. Aspectos generales para el cultivo del cilantro (*Coriandrum sativum* L.). *Informativo INIA Remehue*. [En línea]. No. 146. 2014. [Fecha de consulta: 15 de febrero de 2024]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14001/4781>
4. SIAP. México exportó 64 mil 647 toneladas de cilantro, en 2017. En: *Gobierno de México*. [En línea]. 2018. [Fecha de consulta 6 de marzo de 2024]. Disponible en: <https://www.gob.mx/siap/articulos/mexico-exporto-64-mil-647-toneladas-de-cilantro-en-2017?idiom=es>
5. YANQUE, Lourdes. Importancia de los abonos orgánicos en la agricultura. *Revista de Investigación Universitaria*. [En línea]. Vol. 3, núm. 1. Enero – junio 2014. [Fecha de consulta 12 de marzo de 2024]. Disponible en: <https://revistas.upeu.edu.pe/index.php/riu/article/view/700> ISSN: 2312-4253.
6. MEDRANO, María de los Ángeles y Reyes, Rosa Idalia. *Evaluación del manejo de riego por goteo en la unidad del cultivo del aguacate (Persea americana mil) en la finca experimental el plantel de la UNA, 2019*. [En línea]. 2021. Trabajo de Grado. Universidad Nacional Agraria. Facultad de Agronomía de Nicaragua. [Fecha de consulta: 2 de marzo de 2024]. Disponible en: <http://repositorio.una.edu.ni/4273/>
7. CRUZ, Elia; Can Chulim, Álvaro; Loera, Luis Javier; Aguilar, Gisela; Pineda, Joel y Bugarín, Rubén. Extracción de N-P-K en *Coriandrum sativum* 'Pakistan' en hidroponía. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. [En línea]. Vol. 8, núm. 2. 2017. [Fecha de consulta: 15 de marzo de 2024]. Disponible en: <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i2.56> ISSN: 2007-9230
8. GUZMAN, Salvador Horacio; Villalobos, Salvador; Escobedo, Diana y González, Enrique. Componentes agronómicos y diversidad en el patrón de ácidos grasos en líneas avanzadas de cilantro. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. [En línea]. Vol. 9, núm. 7. 2018. [Fecha de consulta: 15 de marzo de 2024]. Disponible en: <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i7.1674> ISSN: 2007-0934.

Fecha de recepción**Fecha de aceptación****Fecha de publicación**

10/4/2024

26/08/2024

31/01/2025



Propuesta de reducción en los defectos de la línea C08 Moldeo mediante herramientas de control

Proposal to reduce defects in the C08 molding line using control tools

Norma Elizabeth Rodríguez Bustos, Adrián Agustín Ríos Barreto y Mónica Mendoza Kohrs / Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Irapuato

Resumen

En diversos casos de estudio centrados en empresas de inyección de plástico con énfasis en el proceso de moldeo se han documentado fallas de calidad. El presente trabajo propone una alternativa para mejorar una línea de moldeo con el objetivo de reducir los defectos en la elaboración de piezas termoplásticas. Para cumplir el objetivo se emplearon las siguientes herramientas: Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF), Plan de Control (CP) y la matriz de acciones correctivas. Se utilizó la metodología DMAIC para realizar el proyecto de mejora. Los resultados obtenidos demostraron que la implementación de un plan adecuado, una matriz de acciones correctivas y un plan detallado de control, puede ayudar a la empresa a mejorar su rendimiento y cumplir las expectativas de sus clientes.

Palabras clave: defectos, DMAIC, gestión integral de calidad, moldeo por inyección de plástico.

Abstract

Quality failures have been documented in several case studies focusing on plastic injection companies with an emphasis on the molding process. The present work proposes an alternative to improve a molding line with the aim of reducing defects in the production of thermoplastic parts. To meet the objective, the following tools were used: Failure Mode and Effect Analysis (AMEF), Control Plan (CP) and the corrective action matrix. The DMAIC methodology was used to carry out the improvement project. The results obtained showed that the implementation of an adequate plan, a matrix of corrective actions and a detailed control plan, can help the company to improve its performance and meet the expectations of its customers.

Keywords: defects, DMAIC, integrated quality management, plastic injection molding.



Introducción

Actualmente, dentro del ámbito automotriz es fundamental que las piezas fabricadas cumplan con los requisitos de calidad exigidos y diseñados, evitando errores que impliquen repetir procesos e incurrir en costos de no calidad si el producto no cumple con lo establecido.

En el presente artículo se analizan las herramientas de mejora que ayudarán a disminuir los defectos y por ende reducir gastos para la empresa. La calidad es un requisito fundamental en cualquier aspecto, ya que con esta se crean percepciones de cumplimiento. Como afirma Gutiérrez Pulido (2010): “Calidad es que un producto sea adecuado para su uso, así, la calidad consiste en ausencia de deficiencias en aquellas características que satisfacen al cliente”¹. En este sentido, es pertinente señalar que la gestión de la calidad enfocada en producción puede ser utilizada como un arma estratégica en las organizaciones para alcanzar nuevos niveles de competitividad, dado que permitiría estar en sintonía con las necesidades del mercado².

El proceso de gestión de producción implica cuatro áreas clave: planificación, control, mejora de procesos y mantenimiento de los equipos. De acuerdo con la Norma Internacional ISO 9000, la acción correctiva es la “Acción para eliminar la causa de una no conformidad y evitar que vuelva a ocurrir”³ y su importancia se basa en el cumplimiento de los estándares establecidos, tomando en cuenta la prioridad de los procesos para eliminar, controlar y/o reducir los riesgos identificados con una evaluación previa, con el fin de minimizar la probabilidad de que se produzca un accidente.

En cuanto a la metodología DMAIC (metodología de mejora continua que indica definir, medir, analizar, mejorar y controlar un proceso) Ocampo y Pavón (2017) indican que consta de “La mejora de procesos, mediante herramientas de calidad con ayuda de la estadística la cual mide el desempeño, para así lograr disminuir o eliminar los defectos, reprocesos, desperdicios o lo que se presenta en determinado periodo de tiempo”⁴. Gracias a la aplicación de la metodología DMAIC se lograron obtener las causas potenciales que provocaban las inconformidades, encontrándose como principales defectos los siguientes: *pelo de ángel*, *flash* y *tiro corto*, como consecuencia de la deficiente programación del mantenimiento en máquina inyectora y moldes, falta de una matriz de acciones correctivas y falta de un plan de capacitación.

Con fundamento en los resultados obtenidos se estableció una matriz de acciones correctivas con el objetivo de que sirva como guía en caso de presentarse alguno de los defectos mencionados anteriormente. Estos hallazgos no solo respaldan la investigación inicial, sino que también permiten generar la propuesta de un sistema de evaluación y control mediante la herramienta AMEF (Análisis del Modo y Efecto de Falla) y Control Plan.

Objetivo

Diseñar una propuesta de mejora para reducir los defectos en la línea de moldeo C08 en la creación de piezas termoplásticas.



Planteamiento del problema

La empresa objeto de estudio no cuenta con una estrategia para disminuir el número de sus piezas con defectos, por tanto, este problema puede tener impacto negativo severo sobre la imagen y reputación de la compañía, lo que puede llevar en el futuro a una caída en las ventas, por lo cual es de mayor interés para el fabricante prestar la máxima atención a la cantidad de productos defectuosos que se fabrican.

En la Figura 1 se muestra el diagrama de Ishikawa con la identificación de las causas que originan el problema de los defectos.

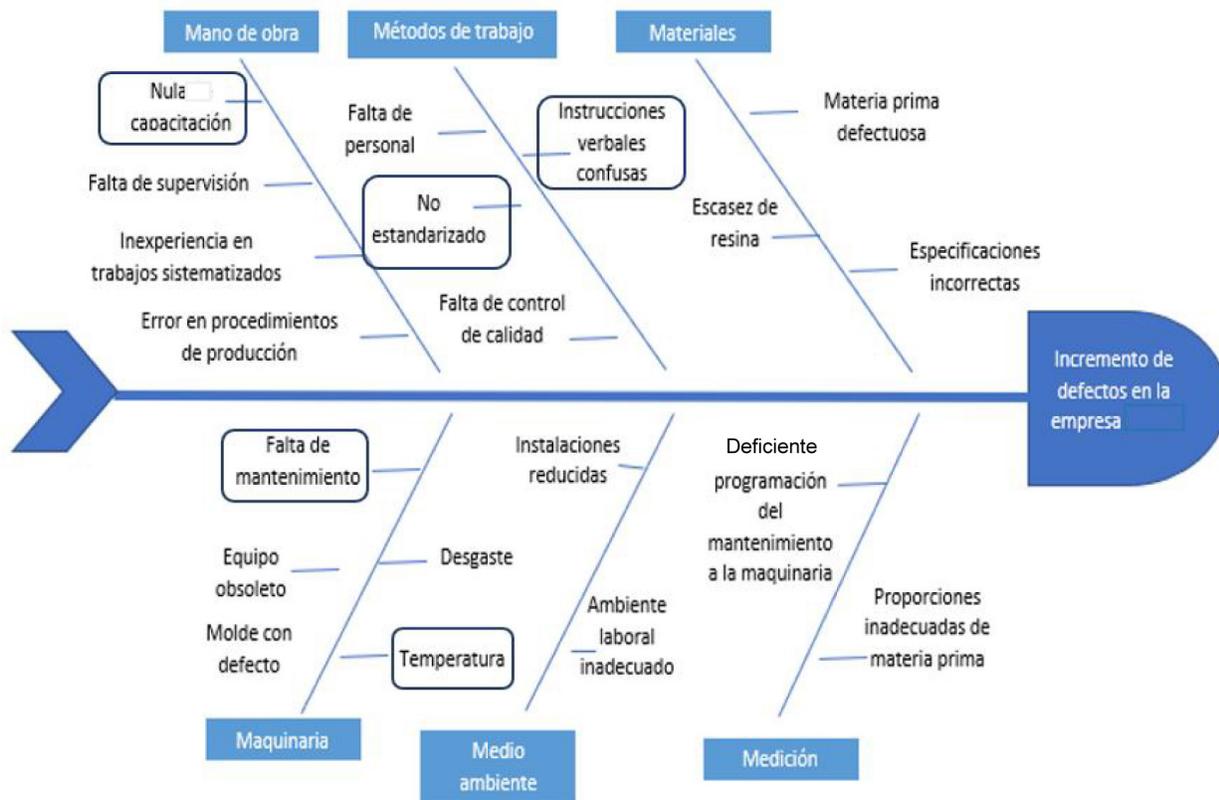


Figura 1. Diagrama de Ishikawa del incremento de defectos (elaboración propia)

Las causas potenciales del incremento de defectos en las piezas termoplásticas de la empresa son: instrucciones verbales confusas, método no estandarizado, nula capacitación, falta de mantenimiento y parámetros de temperatura incorrectamente definidos.

Método de trabajo

La presente investigación es de corte mixto, la cual busca probar el argumento del estudio mediante un análisis de fuentes externas, considerando integrar datos cualitativos y cuantitativos; especialmente del campo bibliográfico, enfocándose en la metodología DMAIC.

En la Figura 2 se muestra el procedimiento desarrollado en este proyecto, el cual inicia con la identificación de los defectos potenciales que provocan las no conformidades en la empresa automotriz donde se realizó la investigación.



Figura 2. Metodología (elaboración propia)

Resultados y análisis de datos

Mediante las herramientas de calidad utilizadas en la elaboración de este proyecto (metodología DMAIC), la primer etapa es la definición de las actividades, por tanto, se han identificado los defectos comunes en la línea de Moldeo C08, los cuales fueron *pelo de ángel*, *flash* y *tiro corto*. En la Figura 3 se muestran las gráficas de la línea de Moldeo C08 en los meses de febrero y marzo del 2024 donde se identifican los defectos con mayor recurrencia.

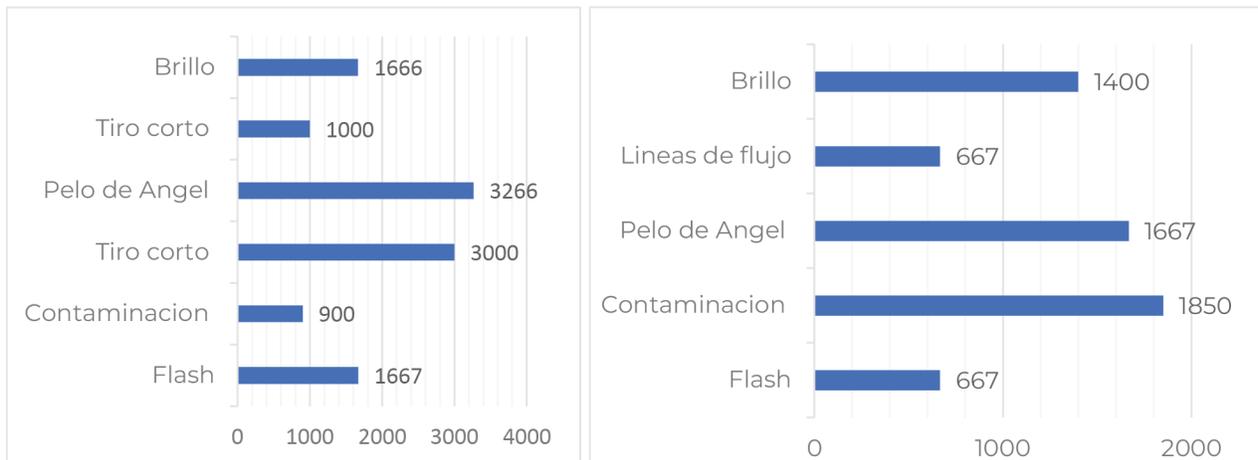


Figura 3. Defectos detectados de la línea de moldeo en el mes de febrero 2024 (a) y marzo 2024 (b). Fuente: elaboración propia



Con el propósito de lograr una comprensión y visión integral de la dinámica del proceso, se desarrolló la etapa número dos de la metodología DMAIC (medir). Las actividades realizadas fueron un macromapa de procesos y un diagrama SIPOC (de sus siglas en inglés: “Supplier, input, process, output, client”).

En la Figura 4 se presenta un macromapa de proceso, en el cual se identifican objetivos y puntos clave en tres niveles dentro de la línea de producción, con el fin de evaluar y comprender la comunicación y aumentar la eficiencia.

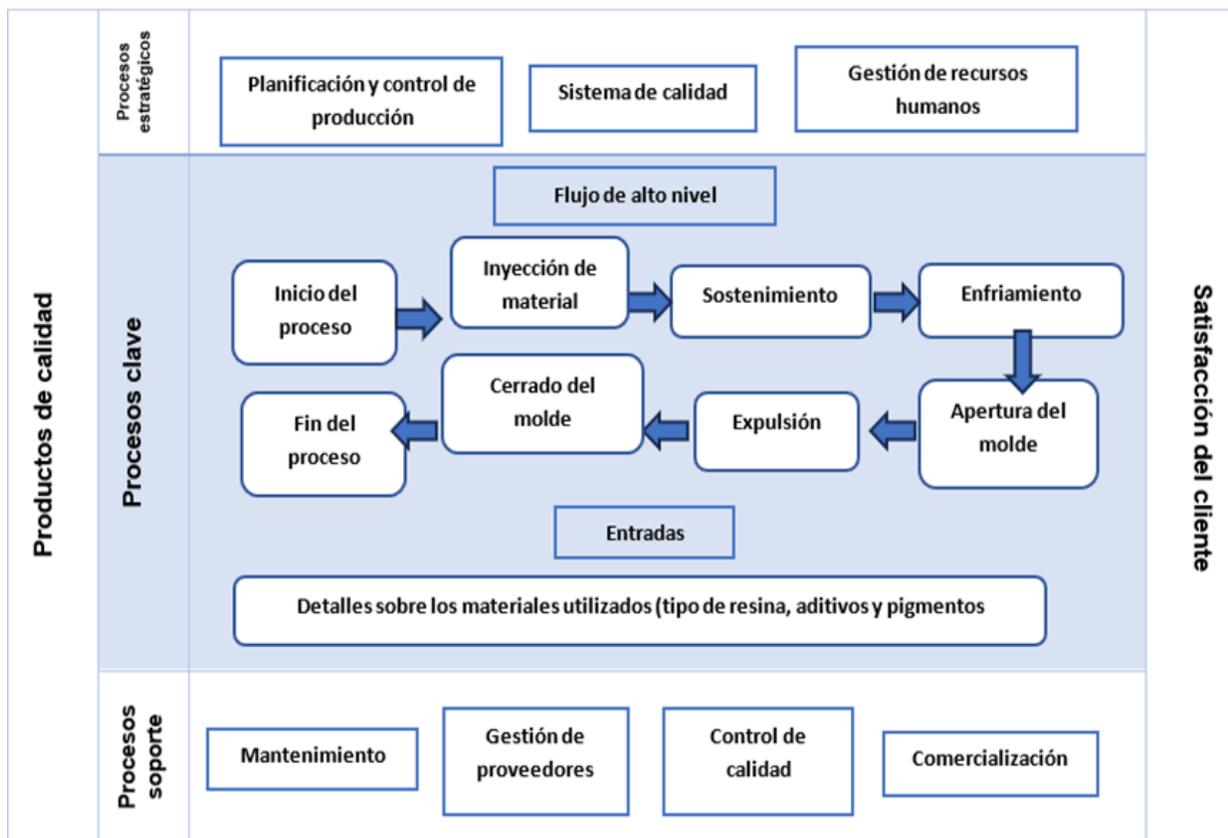


Figura 4. Macromapa del proceso (elaboración propia)

En la Tabla 1 se muestra un diagrama SIPOC con la representación de la cadena cliente-proveedor de la empresa. Estas herramientas permitieron visualizar de manera detallada e interconectada el funcionamiento de las diversas partes del proceso y las interacciones entre sí.

Tabla 1 Diagrama SIPOC (elaboración propia)

SIPOC				
Proveedores	Entradas	Proceso	Salidas	Clientes
<ul style="list-style-type: none"> Departamento de compras. Proveedores de materias primas: <ul style="list-style-type: none"> -Avizor Química, S.A de C.V. -Danamart Chemicals de México, S.A de C.V. -Epoemex, S.A de C.V. -Corporación Mexicana de Polímeros, S.A de C.V. 	<ul style="list-style-type: none"> Materias primas <ul style="list-style-type: none"> -Termoplásticos -Aditivos -Fibras y cargas Componentes del proceso: <ul style="list-style-type: none"> -Máquinas de inyección. -Moldes. • Especificaciones de diseño y requisitos de calidad. • Parámetros de configuración de la máquina de moldeo. 	<ul style="list-style-type: none"> Operaciones realizadas en la línea C08 de moldeo. <ul style="list-style-type: none"> -Inyección del material -Sostenimiento. -Enfriamiento. -Apertura del molde. -Expulsión. Cerrado del molde. Configuración de la máquina de moldeo. Inspecciones y pruebas de calidad realizadas durante el proceso. 	<ul style="list-style-type: none"> Productos moldeados en la línea C08. Productos con o sin defectos según los resultados de inspección. <ul style="list-style-type: none"> -Pelo de ángel. -Flash. -Tiro corto. Datos de rendimiento y calidad. -Velocidad de inyección. 	<ul style="list-style-type: none"> Departamento de control de calidad. Clientes externos que utilizan los productos moldeados en sus ensamblajes y reciben el producto final: <ul style="list-style-type: none"> -ADIENT. -Toyota Boshoku. -Aki Seat. -Jatco.

Para la fase número tres de la metodología DMAIC (analizar) se presenta un análisis de serie de tiempos en la línea de inyección con el fin de observar el comportamiento de las piezas producidas y las piezas que tuvieron defecto en los meses de mayo, junio, julio y agosto del 2023, como se muestra en la Tabla 2. Este análisis funciona para anticiparse en el programa de producción y lograr entregar los pedidos completos al cliente.

Tabla 2. Comportamiento de piezas por producción (elaboración propia)

	<i>x</i>	<i>y</i>		
Mes	Periodo	Piezas producidas	<i>xy</i>	<i>x²</i>
Mayo	1	16919	16919	1
Junio	2	42810	85620	4
Julio	3	68402	205206	9
Agosto	4	83534	334136	16
	\bar{x} 2.5	\bar{y} 52916.25	Σ 641881	Σ 30



En las ecuaciones 1, 2, 3 y 4 se encuentran las fórmulas para determinar la ecuación de regresión que permite encontrar el pronóstico de piezas producidas⁵ (Chapman, 2006).

$$\hat{y} = a + bx \quad (1)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (2)$$

$$b = \frac{\sum xy - n\bar{x}\bar{y}}{\sum x^2 - n\bar{x}^2} \quad (3)$$

$$\hat{y} = a + bx \quad (4)$$

Con la aplicación de las fórmulas anteriores y los datos de la Tabla 2, se encontró la ecuación de regresión 5 que se observa a continuación:

$$\hat{y} = -3441.75 + 22543.2x \quad (5)$$

Con los resultados de la ecuación de regresión 5 para determinar el pronóstico de las piezas con defecto producidas se realiza la gráfica que se muestra en la Figura 5 donde se observa la tendencia del comportamiento de las piezas defectuosas.

El pronóstico de venta con respecto a la estimación para el periodo 5 fue de 109,274 piezas. La finalidad de este análisis es pronosticar un periodo proyectado como se muestra en la Figura 5, en donde la recta de tendencia se ajusta a los datos graficados con un pronóstico acertado de acuerdo con los datos históricos de producción, manteniendo una tendencia creciente o decreciente.

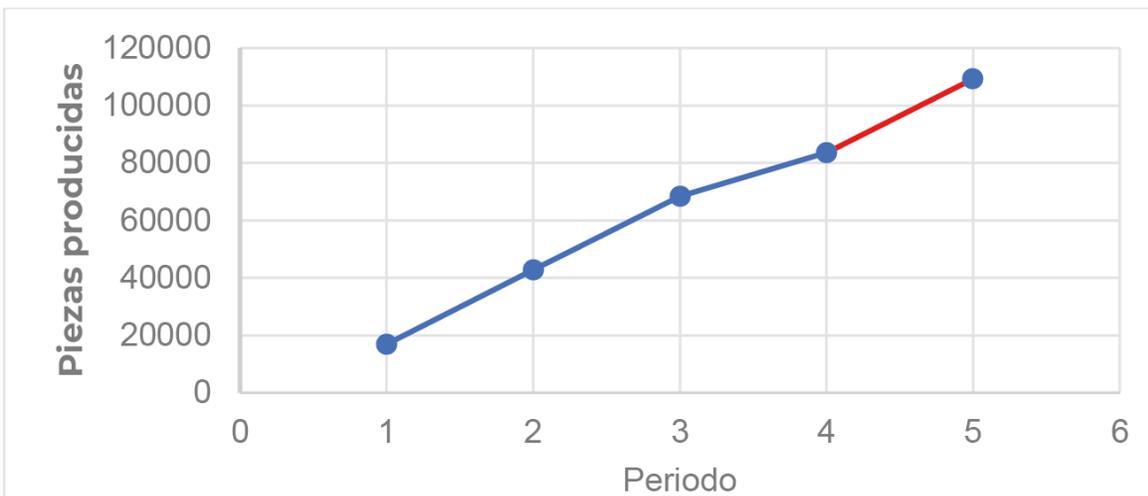


Figura 5. Serie de tiempo de piezas producidas (elaboración propia)

Como última parte del proyecto se elaboró una propuesta de sistema de evaluación y control mediante la herramienta AMEF y Control Plan.

Para la realización del plan de control y AMEF se creó y se tomó como base el diagrama de flujo del proceso que se puede observar en la Figura 6.

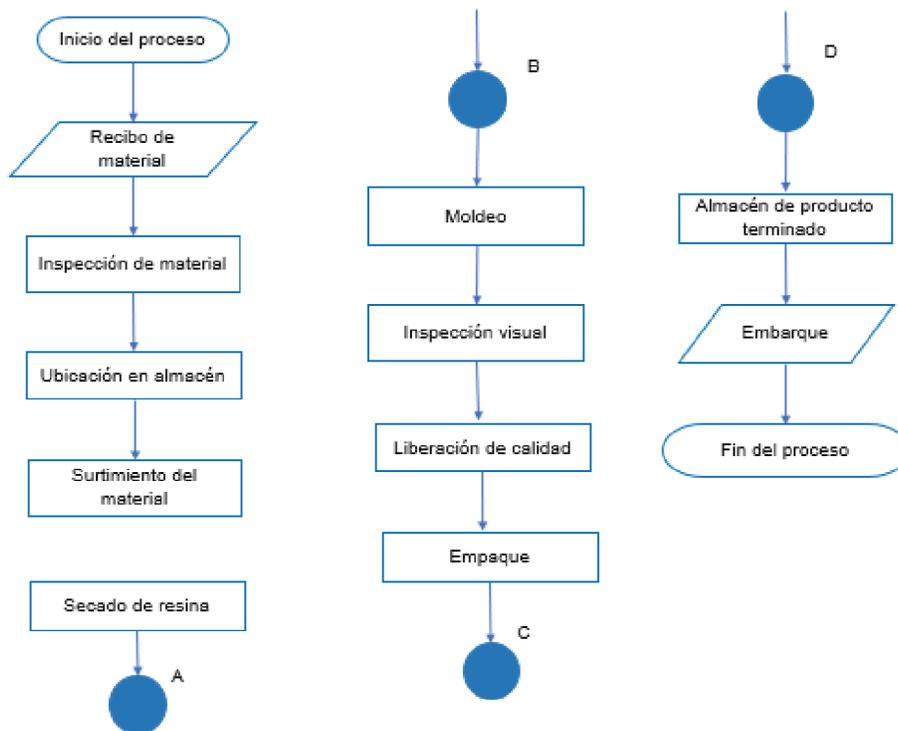


Figura 6. Diagrama de flujo de proceso del área de moldeo para identificar las actividades secuenciales (elaboración propia)

Posteriormente se tomó cada una de las fases del proceso de inyección para detallar los aspectos importantes que se deben controlar para que el proceso se ejecute de manera adecuada y cumpla con los requerimientos de calidad especificados, ya que el análisis ayudó a identificar puntos críticos en el proceso de fabricación donde podrían ocurrir defectos, por lo que se establecieron medidas preventivas y de control para minimizar la posibilidad de defectos.

Se utilizó la herramienta AMEF (como se muestra en la Tabla 3) con el objetivo de identificar y evaluar los modos potenciales de la falla en el proceso, a fin de crear acciones preventivas para que en el futuro la organización evite que se materialicen en defectos.



Tabla 3. AMEF de proceso para detectar la ocurrencia, severidad y detección para calcular el nivel de prioridad del riesgo NPR (elaboración propia)

Proceso	Modos de Falla Potenciales		Causas potenciales	OCU	Controles de ocurrencia	SEV	DET	NPR
	Modo de fallo	Efecto	Causas	¿Qué tan seguido ocurre el Modo de fallo?	¿Cuáles son los controles existentes y procedimientos preventivos de Modo de Falla?	¿Qué tan severo es el efecto para el cliente?	¿Qué tan bien pueden detectar el Modo de falla?	
1 Recibo de material	Material incompleto	Surtidos incompletos a las líneas de producción.	Requerimiento de material incorrecto.	5	Ingreso de material al sistema (Oracle).	8	3	120
2 Inspección de material	Falta de certificado de flamabilidad.	No se puede realizar la liberación.	No se notifica al proveedor de este requerimiento.	6	Formato de inspección de recibo.	8	3	144
3 Ubicación en almacén	No seguir el orden del sistema PEPS.	Mezcla de material en el almacén.	Mal almacenaje del material.	6	Administración de almacén (Oracle).	6	3	108
4 Surtimiento de material	Resina incorrecta	El producto no cumple con las propiedades adecuadas.	El plan de producción no indica el tipo de resina.	5	Liberación de surtimiento de material.	7	3	105
5 Secado de resina	Secado de resina incorrecto	Material con defecto.	Mala programación de parámetros establecidos.	7	Registro de secado	7	4	196
6 Moldeo	Mal seteo de parámetros de moldeo.	Piezas con defectos	Parámetros mal definidos	6	Hoja de parámetros	8	4	192
7 Inspección visual	Inspección visual deficiente	Piezas con defectos.	Información desactualizada.	8	Registros de defectos de piezas moldeadas	9	3	216
8 Liberación de calidad	Mediciones incorrectas	Material inconforme	Mala calibración del equipo.	6	Reportes dimensionales de metrología / gráficos de control x	8	3	144
9 Empaque	Embarque incorrecto	Afecta las características cosméticas del producto.	Mal almacenaje del material.	5	Registro de surtimiento de empaque	7	3	105
10 Almacén de producto terminado	No seguir el orden del sistema PEPS	Mezcla de material en el almacén.	Mal almacenaje del material.	5	Administración de almacén (Oracle)	7	3	105



En la última etapa se diseñó el plan de control que se observa en la Figura 7, donde se muestra cada fase del proceso y el plan de acción que se debe seguir en caso de que en alguna fase del proceso se presente alguna falla.

LOGO		PLAN DE CONTROL							Edición:	MXI-QA-CP-01
		<input type="checkbox"/> PROTOTIPO <input type="checkbox"/> PRE-SERIE <input checked="" type="checkbox"/> CONTINUO / SERIE							Edición:	
Cliente:		Cliente de HFCO		Denominación producto:			Planta Termoplástico moldeador			
Referencia cliente:		XXXX		Referencia:		Preparado por:				
Flujo de proceso		Métodos								
N°	Fase/operación	Herramienta	característica especial	Especificación	Técnica de evaluación	tamaño	frecuencia	Método de control	plan de acción	
1	Recibo de material	Escáner		Embarque completo	PO contra factura	Cada recibo de material	Cada recibo de material	Ingreso de material al sistema (oracle)	Plan de reacción almacén-recibo	
2	Inspección de material	Escáner	▽	Flamabilidad	Certificado de calidad	Lote	Cada recibo de material	Formato de inspección de recibo	Plan de reacción de producto no conforme	
3	Ubicación en almacén	Escáner	▽	Sistema PEPS	Etiquetado de color: Ene-verde Feb-amarillo Mar-morado Abr-rojo May-negro Jun-azul claro Jul-gris Agos-anaranjado Sep-blanco Oct-café Nov-fucsia Dic-azul marino	Lote	Cada recibo de material	Administración de almacén (oracle)	Plan de acción de almacén	
4	Surtimiento de material	Escáner		Tipo de resina de acuerdo a dibujo de cliente	Ficha técnica contra Plan de producción	Cada surtimiento de resina	Cada surtimiento de resina	Liberación de surtimiento de material	Plan de reacción de producto no conforme	
5	Secado de resina	Secadora	▽	Eliminación de humedad	Medición de humedad	Cada surtimiento de resina	Cada surtimiento de resina	Registro de secado	Plan de acción de producto no conforme	
6	Moldeo	Maquina Toshiba		inyección	Programa de parámetros cargada en moldeadora	Cada cambio de modelo	Cada cambio de modelo	Hoja de parámetros	Plan de acción moldeo	
7	Inspección visual	Ayudas visuales de criterios de calidad	▽	Tiro corto, Pelo de angel, Flash, Contaminación. Etc.	inspección visual contra piezas master	Lote	Inicio, mitad y final de turno	Registros de defectos	Plan de acción de producto no conforme	

Figura 7. Plan de control (elaboración propia)

Mediante la herramienta DMAIC se realizó una propuesta de mejora para disminuir el porcentaje de defectos dentro de la línea, por lo que se estableció la documentación de matriz de acciones correctivas y se estableció un plan de capacitación.

La finalidad de realizar la matriz de acciones correctivas es organizar y documentar las medidas que se tomarán para abordar las causas que ocasionan el defecto y prevenir su recurrencia. En la Tabla 4 se muestra la matriz de acciones correctivas por tipo de defecto, este documento sirve como una guía de referencia para lograr la comunicación interna entre las medidas tomadas por el encargado o encargada, y externa para demostrar el compromiso con la mejora de la calidad.



Tabla 4. Matriz de acciones correctivas (elaboración propia)

			Área			Moldeo		
			Línea			C08		
Defecto	Imagen de referencia	Acciones correctivas	Defecto	Imagen de referencia	Acciones correctivas	Defecto	Imagen de referencia	Acciones correctivas
Pelo de ángel		Ajustar la temperatura durante el proceso.	Tiro corto		Inyectar cantidad de material adecuado.	Flash		Incrementar la presión de la unidad de cierre.
		Retrabajar si el defecto no está adherido la pieza.			Modificar el tamaño de los canales del molde.			Dosificar menos material.
		Enviar a scrap si el defecto no está adherido la pieza.			Setear las temperaturas adecuadamente.			Disminuir el tiempo de inyección.
					Incrementar la velocidad de inyección.			Eliminar obstrucción de cavidades.
					Eliminar fuga de material.			Retrabajar si es mayor a 0.3 mm.

Discusión

Los resultados obtenidos en el presente estudio demuestran que la falta de herramientas de control genera un impacto negativo en el rendimiento de una línea de moldeo.

La falta de una matriz de acciones correctivas puede dificultar la identificación y resolución de los problemas que surgen en la línea de producción. Esto puede provocar una acumulación de defectos y desgaste prematuro de los equipos, lo que puede aumentar los costos de producción. Por otro lado, la implementación de las soluciones propuestas por el estudio puede ayudar a la empresa a reducir los costos de producción y mejorar la satisfacción del cliente.

Por último, con la implementación de la metodología DMAIC, por virtud del enfoque sistemático que la caracteriza, se logró definir el problema y la oportunidad de mejora en la línea, recopilar datos sobre el proceso actual, analizar los datos para identificar las causas raíz de los problemas, y brindar propuestas de soluciones.



Conclusiones

La metodología propuesta para este proyecto establece de manera visual y estructurada el ámbito de mejora continua con la utilización de herramientas de control como lo son el AMEF, el CP y la matriz de acciones correctivas para abordar las causas de falla potenciales, así como ayudar a encontrar actividades para mejorar o agregar en la organización.

La implementación exitosa de esta metodología implica trabajo en equipo, por lo que, con ayuda de las áreas de recursos humanos, calidad y mantenimiento, se pudo realizar la propuesta de mejora para el año 2024.

En síntesis, los resultados obtenidos en el presente estudio demuestran que la implementación de un plan adecuado, una matriz de acciones correctivas y un plan detallado de control, puede ayudar a la empresa a mejorar su rendimiento y cumplir las expectativas de sus clientes.

Referencias

1. GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto. *Calidad total y productividad*. Tercera edición. México. McGraw-Hill. 2010. Pág. 370. ISBN: 6071503159.
2. BARBA, Antonio. *Calidad total en las organizaciones: poder, ambigüedad y aspectos simbólicos. Los estudios organizacionales en México*. Google Scholar. 2004. Págs. 453-474.
3. ISO - International Organization for Standardization. *ISO 9000:2015*. Edición 5. Ginebra, Suiza. Septiembre 2015.
4. OCAMPO, Jared R. y Pavón, Aldo E. Integrando la Metodología DMAIC de Seis Sigma con la Simulación de Eventos Discretos en Flexsim. En: *Tenth LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2012) "Megaprojects: Building Infrastructure by Fostering Engineering Collaboration, Efficient and Effective Integration and Innovative Planning"*. Ciudad de Panamá. 23-27 de julio de 2012.
5. CHAPMAN, Stephen N. *Planificación y control de la producción*. Primera edición. México. Pearson. 2006. ISBN: 970-26-0771-X.

Fecha de recepción

27/06/2024

Fecha de aceptación

22/08/2024

Fecha de publicación

31/01/2025



Gestión de recursos hídricos: un análisis sobre la situación del agua en Guanajuato

Water resources management: an analysis of the water situation in Guanajuato

Valentín Calzada Ledesma, José Alejandro Cornejo Acosta y Blanca Veronica Zuñiga Nuñez /
Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Purísima del Rincón

Resumen

Guanajuato es un estado diverso, en donde se realizan actividades agrícolas, industriales y turísticas, y es de vital importancia conocer la situación de los recursos hídricos para tomar decisiones que permitan dar continuidad y sostenibilidad a las actividades económicas. En este artículo se reportan los resultados de un análisis estadístico descriptivo sobre la situación del agua en el estado Guanajuato, utilizando datos de acceso público del año 2022, para obtener indicadores y gráficas sobre la situación de los recursos hídricos, de tal manera que se permita informar, concientizar y facilitar la toma de decisiones sobre aspectos relacionados con la gestión del agua en dicha entidad federativa. Con el presente estudio se pretende impactar positivamente al desarrollo sustentable y sostenible de los diferentes sectores económicos del país.

Palabras clave: recursos hídricos, análisis estadístico descriptivo, desarrollo sustentable, inteligencia computacional, ciencia de datos.

Abstract

Guanajuato is a diverse state within the nation, where agricultural, industrial and tourist activities are carried out, and it is vitally important to know the situation of water resources in order to make decisions that allow continuity and sustainability of economic activities. This article reports the results of a descriptive statistical analysis on the water situation in the state of Guanajuato, using publicly available data from 2022, to obtain indicators and graphs on the situation of water resources, in such a way that it allows to inform, raise awareness and facilitate decision-making on aspects related to water management in said federal entity. The present study aims to positively impact the sustainable and sustainable development of the different economic sectors of the country.

Keywords: water resources, descriptive statistical analysis, sustainable development, computational intelligence, data science.



Introducción

La gestión de los recursos hídricos en Guanajuato no es trivial, ya que se debe abastecer a una población superior a los seis millones de habitantes y al mismo tiempo satisfacer las necesidades de los diferentes sectores económicos del estado. Además, hay aspectos fundamentales que se deben de considerar, por ejemplo, Guanajuato se encuentra en el centro de la república y pertenece a dos redes hidrológicas: la región hidrológica del Pánuco y la región Lerma-Santiago, cuyas aguas fluyen hacia el Océano Pacífico. El estado cuenta con diversos tipos de ecosistemas y una extensión territorial muy amplia (alrededor de 30 mil km²), por lo que el ciclo hidrológico depende de una amplia gama de microclimas.

Recientemente, la inteligencia computacional se ha utilizado para realizar la previsión de la demanda de agua¹, para proponer estrategias de control en los sistemas de abastecimiento de agua, para la eficiencia energética y de costos² y para una cadena de suministro agroalimentaria sostenible, teniendo en cuenta las prácticas de comercialización en condiciones de incertidumbre³. Esto resalta la importancia de la computación en el ámbito de la gestión de los recursos hídricos.

En México, existen plataformas públicas en donde se puede acceder a información sobre el agua, como Datos Abiertos de México (<https://datos.gob.mx/>) y el Sistema Nacional de Información del Agua (SINA)⁴. Asimismo, el estado cuenta con el portal de la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (<https://agua.guanajuato.gob.mx>), sin embargo, estas plataformas están en constante mantenimiento y en ocasiones los datos no se encuentran disponibles. Además, para realizar un análisis específico de datos, es necesario descargar toda la información, aplicar procesos de ingeniería de datos para limpiar, consolidar

la información y finalmente utilizar técnicas de análisis para obtener la información deseada, procesos que en ocasiones no pueden ser realizados por el grueso de la población, ya que se requieren conocimientos en el dominio de las ciencias computacionales.

Por estos motivos, en este artículo se propone realizar un análisis sobre la situación del agua en Guanajuato sobre datos públicos confiables extraídos del SINA, para ello la información se preprocesa, se organiza y finalmente es analizada. El propósito del análisis es obtener información y conocimiento interpretable por el grueso de la población, con el fin de informar, concientizar y facilitar la acertada toma de decisiones basadas en datos.

Objetivo

Efectuar un análisis de estadística descriptiva de la situación de los recursos hídricos en el estado de Guanajuato, utilizando datos correspondientes al año 2022, con el propósito de generar indicadores que contribuyan a la divulgación de información, sensibilización y facilitación de la toma de decisiones relacionadas con la administración de los recursos hídricos, ya sea por dependencias gubernamentales estatales, municipales y/o la población en general.

Planteamiento del problema

La gestión adecuada de los recursos hídricos es un pilar fundamental para el desarrollo sostenible de sectores vitales como la agricultura y la industria. El adecuado manejo de los recursos hídricos en el estado no solo es esencial para sus habitantes, sino que también impacta directamente en la viabilidad y el desarrollo sostenible de los diversos sectores económicos del estado. Es evidente la necesidad de conocer



la situación de este vital recurso, por ello la necesidad de realizar un análisis estadístico en el estado de Guanajuato, con el fin de generar indicadores que contribuyan a la divulgación de información y a la toma de decisiones más informadas sobre la gestión del agua. Este análisis busca abordar la falta de información precisa y actualizada de esta situación en la entidad y contribuir significativamente a un futuro más sustentable y próspero para el estado y el país.

Marco teórico

Recursos hídricos

Los recursos hídricos incluyen todas las formas de agua, incluyendo agua subterránea fósil y agua salada^{5, 6}. Los recursos hídricos se clasifican en dos categorías principales: aguas superficiales y aguas subterráneas. En México, de acuerdo con la Ley de Aguas Nacionales (LAN, por sus siglas), los recursos hídricos se clasifican en los siguientes: aguas claras o de primer uso, aguas marinas, acuífero, aguas del subsuelo, y aguas residuales⁷.

Para fines de gestión y administración, existen dos clasificaciones importantes para estos recursos hídricos en México:

- 1) **Aguas subterráneas:** constituidas por agua de lluvia que cae sobre tierra permeable, que luego encuentra un terreno impermeable y se almacena. Este recurso es de gran importancia porque puede ser aprovechado de manera versátil, ya que funciona como almacenamiento y red de distribución natural de agua en el país. En el año 2001 la CONAGUA⁴ organizó los acuíferos del país en un total de 653.
- 2) **Aguas superficiales (cuencas):** constituyen los ríos, presas y lagos del país. Destacan los ríos Bravo, Balsas y Grijalva-Usumacinta, por su superficie. La Comisión Nacional

del Agua (CONAGUA)⁴ define un total de 757 cuencas hidrológicas en el país, organizadas en 37 regiones hidrológicas.

Ciencia de datos

La ciencia de datos es una disciplina que se enfoca en la extracción de conocimiento a partir de datos. Utiliza una combinación de estadística, ciencias computacionales y conocimiento de dominio, para analizar y modelar los datos con el objetivo de obtener información valiosa y que pudiera encontrarse implícita. En ella se emplean técnicas de recopilación de datos, preprocesamiento, análisis y modelado. En general se aplican métodos cualitativos y cuantitativos para resolver problemas relevantes y poder predecir resultados⁸.

Según Blei (2017) la ciencia de datos puede ser vista desde diferentes perspectivas: estadística, computacional y humana. No es solo una combinación de estadística y ciencias computacionales, debe tomarse en cuenta el contexto y la responsabilidad de utilizar los datos⁹.

Fuentes y usos del agua

En el estado de Guanajuato, el agua proviene de diferentes fuentes⁴, las cuales son:

- **Agua residual:** es aquella que, después de ser tratada, es reutilizada en procesos domésticos, industriales y agrícolas.
- **Agua subterránea:** es una fuente crucial que proviene de acuíferos y es extraída mediante pozos.
- **Agua superficial:** incluye ríos, lagos y presas. Es una fuente importante para el riego agrícola, suministro de agua potable y generación de energía.
- **Agua de zonas federales:** se refiere a los cuerpos de agua bajo jurisdicción federal, como ciertas lagunas y cauces de ríos.



Asimismo, el agua se utiliza en diferentes sectores⁴, los cuales son:

- **Agropecuario:** para la producción agrícola y pecuaria, representando uno de los mayores usos de agua en el estado.
- **Agua potable:** para consumo humano, abasteciendo a hogares y comunidades.
- **Ecológico:** para mantener los ecosistemas acuáticos y terrestres, preservando la biodiversidad y los servicios ambientales.
- **Hidroeléctricas:** aunque no son comunes en Guanajuato, las hidroeléctricas utilizan el flujo de agua para generar energía eléctrica.
- **Industrial integrado:** industrias que requieren grandes cantidades de agua para sus procesos de manufactura y enfriamiento.
- **Termoeléctricas:** para la generación de vapor y el enfriamiento en plantas de energía, contribuyendo significativamente al consumo total de agua.

Método de trabajo

El análisis presentado se realizó sobre datos públicos provenientes del Sistema Nacional del Agua (SINA) para el año 2022, ya que los datos de 2023 aún no se encuentran disponibles. Estos datos públicos son recopilados por el gobierno federal, el cual se encarga de adquirir y curar toda la información antes de cargarla a su sistema, por lo que son fuentes confiables. El motor de analítica de datos se desarrolló en el Lenguaje de programación Python3 y se utilizaron populares librerías como Numpy, Pandas y Matplotlib.

Es importante mencionar que previo al análisis se realizó un proceso de ingeniería de datos, para consolidar la información, a la cual se le aplicaron diferentes técnicas. El archivo de entrada está en formato .csv, consta de 46

registros (filas) y 38 atributos (columnas). A continuación, se describen cada una de las variables consideradas, es importante notar que éstas son las mismas que se reportan en las tablas de resultados, con el fin de facilitar la comprensión de la información.

Uso de agua residual, con la nomenclatura “*uso_res_[sector]*”:
uso_res_agropecuario, uso_res_agua_potable, uso_res_ecologico, uso_res_hidroelectricas, uso_res_industrial_integrado, uso_res_termoelectricas, uso_res_total

Uso de agua subterránea, con la nomenclatura “*uso_sub_[sector]*”:
uso_sub_agropecuario, uso_sub_agua_potable, uso_sub_ecologico, uso_sub_hidroelectricas, uso_sub_industrial_integrado, uso_sub_termoelectricas, uso_sub_total

Uso de agua superficial, con la nomenclatura “*uso_sup_[sector]*”:
uso_sup_agropecuario, uso_sup_agua_potable, uso_sup_ecologico, uso_sup_hidroelectricas, uso_sup_industrial_integrado, uso_sup_termoelectricas, uso_sup_total

Uso de agua de zonas federales, con la nomenclatura “*uso_zf*”, seguido del nombre del sector:
uso_zf_agropecuario, uso_zf_agua_potable, uso_zf_ecologico, uso_zf_hidroelectricas, uso_zf_industrial_integrado, uso_zf_termoelectricas, uso_zf_total

Concesiones totales, con la nomenclatura “*con_[fuente de agua]_total*”:
con_res_total, con_sub_total, con_sup_total, con_zf_total.

Volumen total del agua (en hectómetros cúbicos: *hm³*) utilizado por concesión y por tipo de fuente de agua, con la nomenclatura “*con_[tipo de fuente]_vol_total*”:
con_res_vol_total, con_sub_vol_total, con_sup_vol_total, con_zf_vol_total.



Resultados y análisis de datos

En esta sección, se presentan los hallazgos derivados del análisis propuesto sobre el uso del agua en el estado de Guanajuato. A través de técnicas como el análisis de estadística descriptiva, la construcción de histogramas (para visualizar las distribuciones de uso de agua), así como el análisis de correlaciones entre las variables de uso del recurso y los concesionarios, es posible tener una comprensión profunda y matizada de los patrones y comportamientos asociados al uso del agua.

Asimismo, se llevó a cabo una comparación de los volúmenes de agua utilizados por municipio, proporcionando una visión panorámica de las disparidades y similitudes entre las distintas localidades. Adicionalmente, se analizaron las proporciones de uso de agua por municipio, arrojando luz sobre las particularidades de distribución y consumo en cada área geográfica.

Finalmente, se presenta una gráfica detallada que desglosa las concesiones de agua según su tipo de uso. Esta visualización proporciona una perspectiva esencial sobre las asignaciones de agua y su destino final, permitiendo una evaluación más precisa de la gestión de este recurso crítico.

Los resultados obtenidos en esta sección constituyen una base sólida para la formulación de conclusiones y recomendaciones que pueden contribuir a la gestión eficaz y sostenible del agua en Guanajuato.

Análisis de estadística descriptiva

Esta sección proporciona una visión desde la estadística descriptiva sobre el uso y distribución del agua. Las categorías documentadas por el SINA sobre el uso del agua son las siguientes: uso agrícola, abastecimiento de agua potable, agua para fines ecológicos, generación hidroeléctrica, integración industrial, y generación termoeléctrica. Asimismo, se examina el consumo de agua en tres contextos: subterráneo, superficial y en áreas designadas como zonas federales.

A través de medidas estadísticas fundamentales, como la media, desviación estándar y los valores mínimo y máximo, se busca proporcionar una comprensión cuantitativa de los patrones y variaciones presentes en los datos. El análisis detallado de estas métricas es esencial para identificar tendencias, discrepancias y áreas de interés para guiar investigaciones posteriores y decisiones estratégicas relacionadas con el manejo del recurso hídrico. Se analizan volúmenes de agua en hectómetros cúbicos (hm^3).

Tabla 1. Resultados de estadística descriptiva: cantidad de datos (cantidad), media, desviación estándar (std), mínimo (min) y máximo (máx), información no disponible (NaN). Fuente: elaboración propia

	uso_res_ agropecuario	uso_res_ agua_potable	uso_res_ ecológico	uso_res_ hidroeléctricas	uso_res_ industrial_integrado	uso_res_ termoelectricas	uso_res_ total
cantidad	28	35	0	0	30	0	38
media	0.11	2.57	NaN	NaN	0.74	NaN	3.03
std	0.17	7.80	NaN	NaN	1.68	NaN	8.34
min	0.00	0.00	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00
máx.	0.56	45.89	NaN	NaN	8.60	NaN	49.43
	uso_sub_ agropecuario	uso_sub_ agua_potable	uso_sub_ ecológico	uso_sub_ hidroeléctricas	uso_sub_ industrial_integrado	uso_sub_ termoelectricas	uso_sub_ total
cantidad	44	45	0	0	27	0	45
media	37.83	9.17	NaN	NaN	3.15	NaN	48.05
std	33.45	14.47	NaN	NaN	5.89	NaN	43.86
min	0.01	0.08	NaN	NaN	0.00	NaN	0.08
máx.	132.72	56.52	NaN	NaN	22.20	NaN	156.93
	uso_sup_ agropecuario	uso_sup_ agua_potable	uso_sup_ ecológico	uso_sup_ hidroeléctricas	uso_sup_ industrial_integrado	uso_sup_ termoelectricas	uso_sup_ total
cantidad	41	36	0	0	4	0	44
mean	8.69	2.56	NaN	NaN	0.09	NaN	10.20
std	14.92	12.57	NaN	NaN	0.06	NaN	17.99
min	0.00	0.00	NaN	NaN	0.03	NaN	0.02
max	60.31	75.69	NaN	NaN	0.16	NaN	77.11
	uso_zf_ agropecuario	uso_zf_ agua_potable	uso_zf_ ecológico	uso_zf_ hidroeléctricas	uso_zf_ industrial_integrado	uso_zf_ termoelectricas	uso_zf_ total
cantidad	36	8	0	0	28	0	41
media	815040.30	3854.60	NaN	NaN	34515.63	NaN	739968.90
std	1861172.00	5132.92	NaN	NaN	81760.95	NaN	1782907.00
min	20.00	120.00	NaN	NaN	27.00	NaN	0.00
max	8063254.00	12297.00	NaN	NaN	382709.97	NaN	8295743.00



A continuación, se realiza una discusión con base en los resultados reportados en la Tabla 1.

Con una media de 2.57 hm^3 y un máximo de 45.89 hm^3 , el uso del agua residual sobresale como agua potable, en cambio, su utilización en los sectores agropecuario e industrial es mínimo. Por otro lado, con una media de 37.83 hm^3 y un máximo de 132.72 hm^3 , el agua subterránea se utiliza en su mayoría en el sector agropecuario, su uso como agua potable es cuatro veces menor y su utilización en el sector industrial es mínima. El agua superficial exhibe el mismo comportamiento que la subterránea, sin embargo, es importante notar que, con una media de 0.09 hm^3 y un máximo de 0.16 hm^3 , el uso de este tipo de agua en el sector industrial es considerablemente menor. El agua proveniente de zonas federales es la que exhibe un uso descomunal en los sectores agropecuario e industrial, con una media de 815040.30 hm^3 y 34515.63 hm^3 respectivamente y su uso como agua potable es considerablemente menor.

Analizando el uso total por sector, identificado con la nomenclatura “*uso_[sector]_total*”, es evidente notar que el agua proveniente de zonas federales es de la que mayormente depende el estado de Guanajuato, con una media de 739968.90 hm^3 y un máximo de 8295743 hm^3 .

Con base en los valores mínimos y máximos de todos los tipos de uso de agua, se observa que las desviaciones estándar exhiben una dispersión adecuada. Sin embargo, es importante notar que, con una desviación estándar de 1782907 del uso total del agua proveniente de zonas federales, su dispersión es bastante amplia en contraste con los otros tipos de agua, esto sugiere que hay zonas localizadas en donde se utiliza en su mayoría este tipo de agua. Por los datos reportados, podrían ser granjas, cultivos o parques industriales.

Finalmente, se observa que no hay datos disponibles (NaN) para los sectores ecológico, hidroeléctricas y termoeléctricas. Esto puede ser debido a tres razones: 1) la inexistencia de ese sector en el estado, 2) no se utiliza cierto tipo de agua en dicho sector, y 3) porque no se reportaron los datos en el sistema.

Análisis de distribuciones de uso de agua mediante histogramas

A continuación, se presentan los histogramas para visualizar la distribución del uso de agua. El eje x corresponde a los valores mínimo y máximo, y el eje y al número de ocurrencias con respecto a la cantidad de datos disponibles.

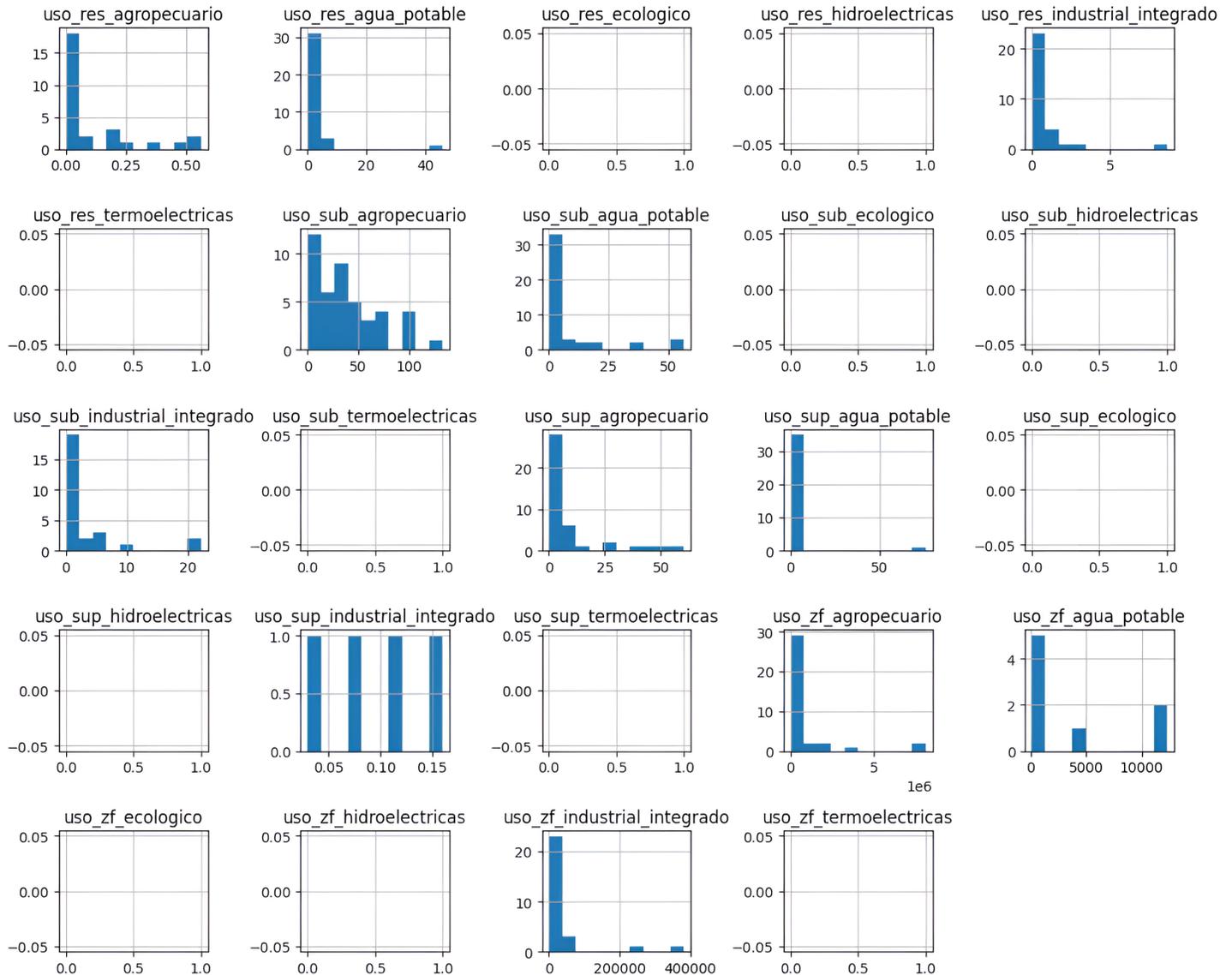


Figura 1. Histogramas de distribuciones de uso de agua.

Fuente: elaboración propia



A partir de la información presentada en la Figura 1, se puede complementar la discusión realizada de los datos reportados en la Tabla 1. Por ejemplo, se observó que el agua residual se utiliza en su mayoría como agua potable, sin embargo, en el histograma se visualiza que, a diferencia de los otros sectores, el empleo del agua residual como potable presenta ocurrencias con un valor superior a los 40 hm^3 , esto podría considerarse algo atípico, ya que ocurrió pocas veces. El mismo comportamiento se exhibe en el uso de agua subterránea y superficial como

potable, en la utilización de agua superficial en el sector agropecuario, en la utilización de agua de zonas federales como potable, y en el uso de agua de zonas federales en el sector industrial. Por otro lado, el empleo de agua subterránea en el sector agropecuario y el uso del agua superficial en el sector industrial, tienden hacia una distribución más uniforme.

Es importante señalar que los histogramas son positivos (mayores que cero) debido a que no se puede utilizar una cantidad negativa de agua.

Análisis de correlación entre uso de agua y concesionarios

A continuación, se muestra una matriz de correlación entre el uso total del agua y el volumen total manejado por los concesionarios. Este análisis se realiza con el fin de identificar si las variables están relacionadas y si una influye a la otra.

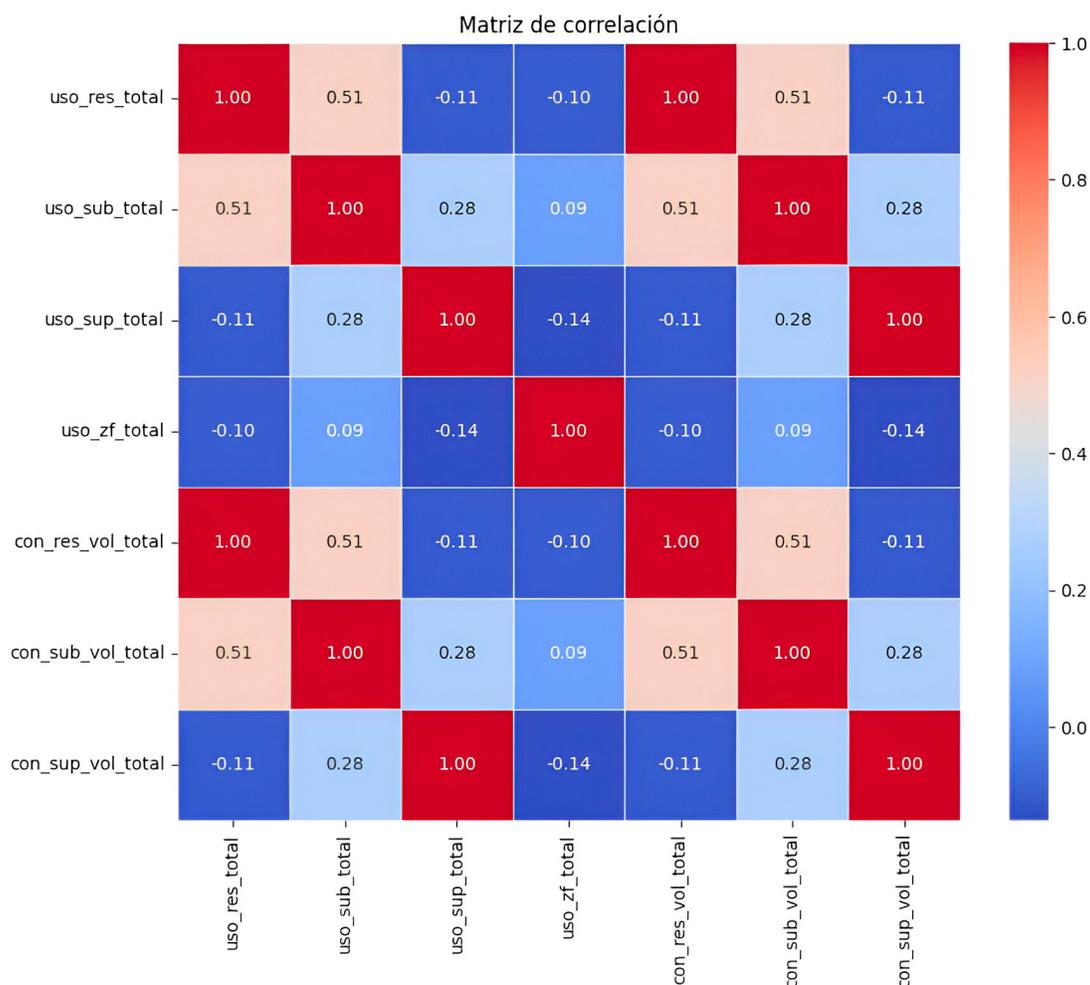


Figura 2. Matriz de correlación y mapa de calor entre uso de agua y concesionarios. Fuente: elaboración propia

Como se puede observar en la Figura 2, existen correlaciones débiles (con valores como -0.11, -0.10, 0.09, etc.), cuando el volumen manejado por los concesionarios no corresponde al tipo de agua, esto sugiere que no hay influencia entre ambas variables. Por otro lado, existe una correlación perfecta cuando el tipo de agua manejado por los concesionarios corresponde con el tipo de uso de agua, esto se puede observar en las diagonales marcadas con un cuadro rojo y su valor de correlación igual que 1. Asimismo, esto confirma que el uso total de agua por sector y el volumen total consumido por concesionario es el mismo, lo que sugiere que los datos registrados en el SINA son coherentes.

Comparación de volúmenes de agua por municipio

La siguiente figura muestra, por municipio, los volúmenes usados de agua residual, subterránea, superficial y de zonas federales.

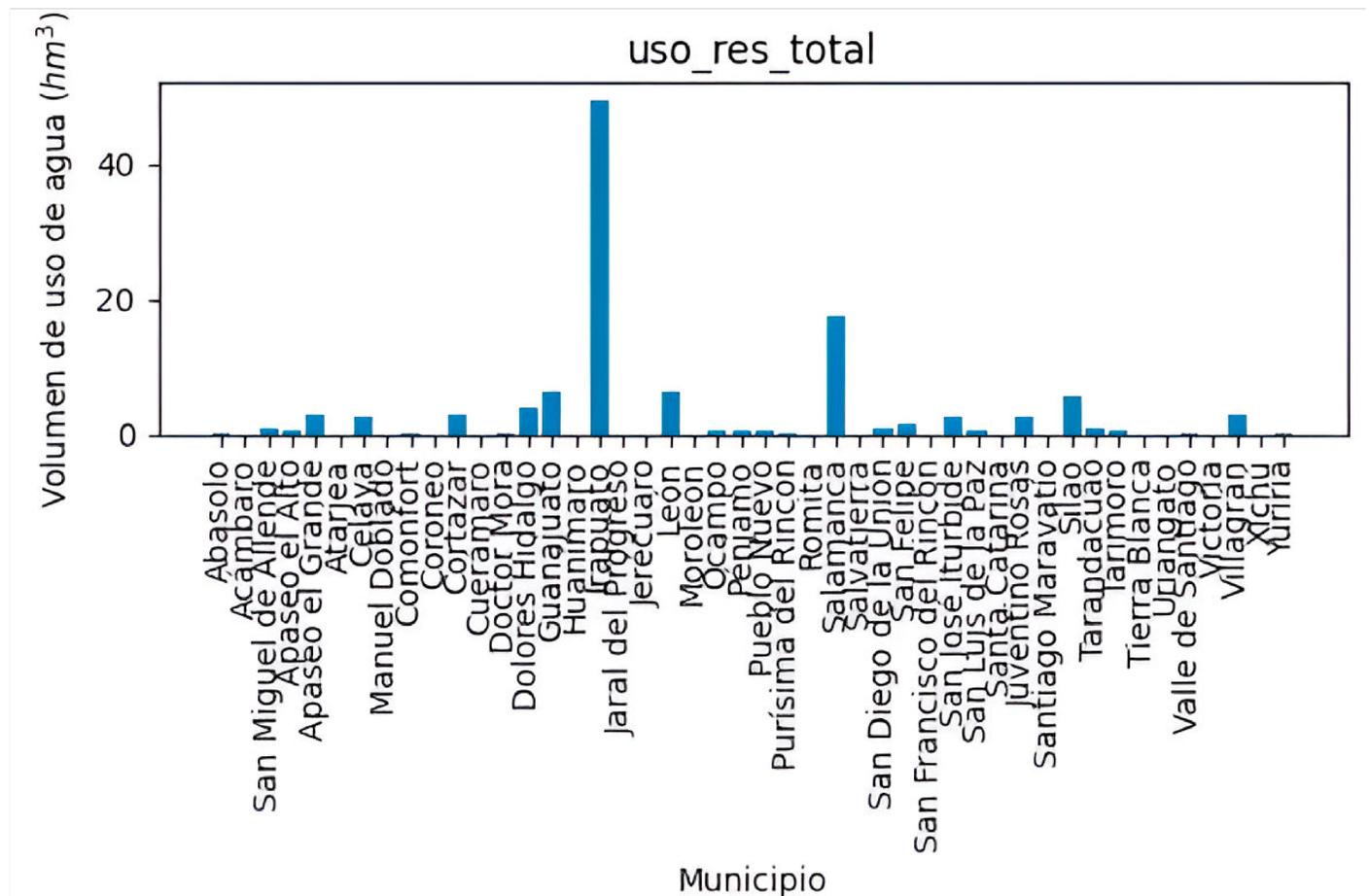


Figura 3a. Gráficas de volúmenes de agua residual utilizada por municipio.

Fuente: elaboración propia

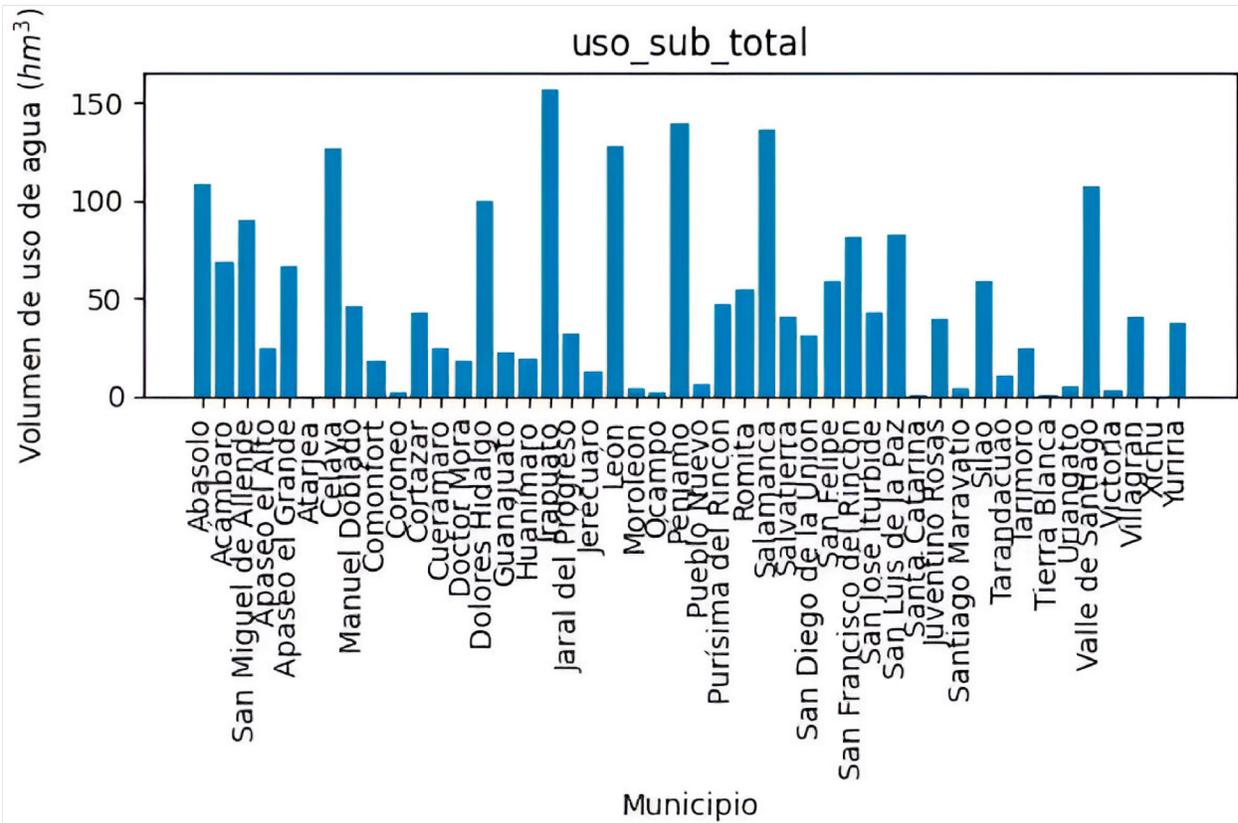


Figura 3b. Gráfica de volúmenes de agua subterránea utilizada por municipio.

Fuente: elaboración propia

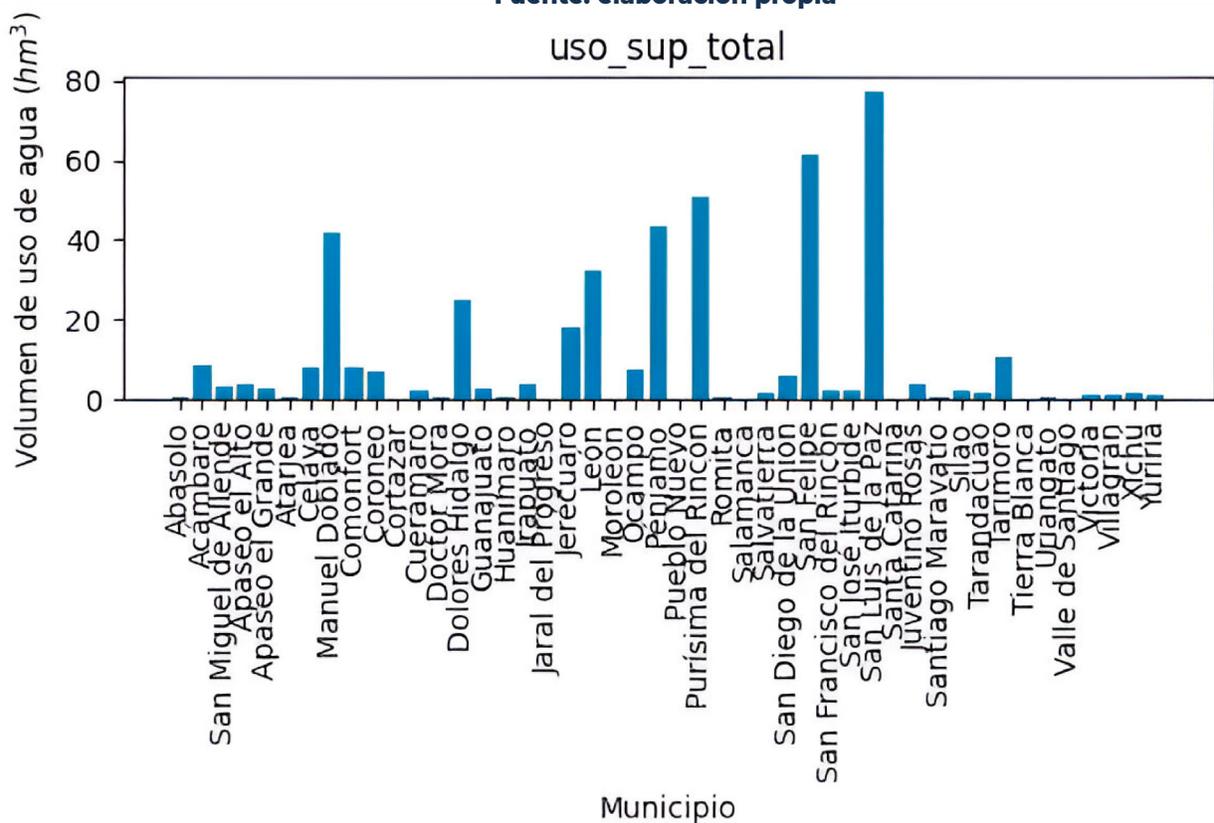


Figura 3c. Gráfica de volúmenes de agua superficial utilizada por municipio.

Fuente: elaboración propia

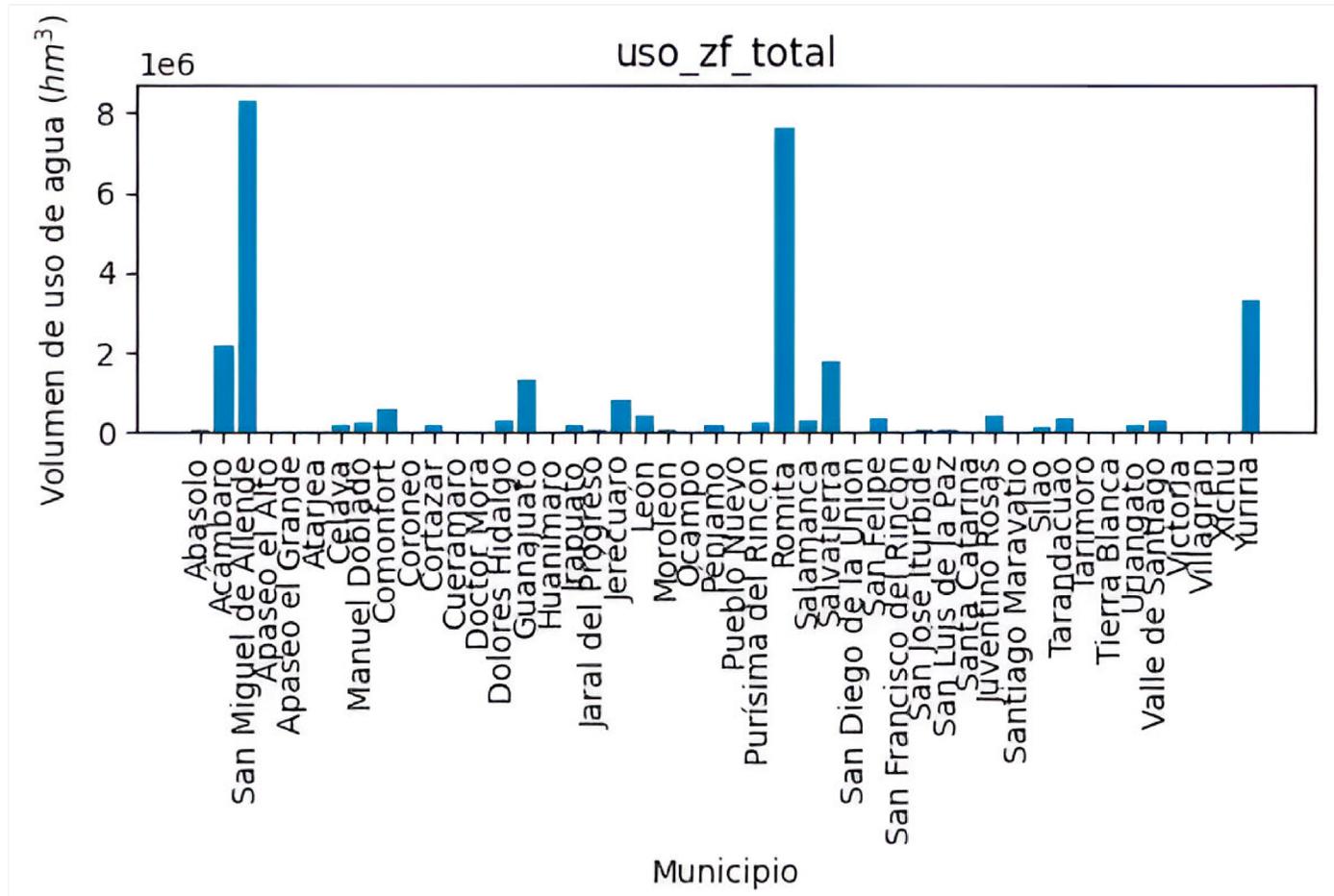


Figura 3d. Gráfica de volúmenes de agua de zonas federales utilizada por municipio.
 Fuente: elaboración propia

En las gráficas en la Figura 3, se aprecia que el agua de zonas federales es la que más se utiliza en todos los municipios, seguida del agua subterránea, el agua superficial y finalmente el agua residual. Es importante señalar que el volumen de agua de zonas federales está en el orden de $1 \times 10^6 \text{ hm}^3$.

Según estos datos, los tres municipios que más utilizan agua residual son: Irapuato, Salamanca y León; posiblemente un factor determinante sea la cantidad de la población, sin embargo, esto es algo que se analizará en otro trabajo.

Por otra parte, los tres municipios que utilizan más agua subterránea son: Irapuato, Pénjamo y Salamanca.

En tanto que los tres municipios que utilizan más agua superficial son: San Luis de la Paz, San Felipe y Purísima del Rincón.

Finalmente, los tres municipios que utilizan más aguas de zonas federales son: San Miguel de Allende, Romita y Yuriria. Cabe señalarse que estos municipios tienen una alta actividad agrícola e industrial y, en el caso de León, una gran cantidad de población.



Proporciones de uso de agua por sector

A continuación, se muestran las gráficas de las proporciones de uso de agua por sector en cada uno de los municipios. Esto con el fin de determinar cuál sector es el que impera en cada uno de los municipios en cuanto al empleo del agua.

Proporciones de uso de agua residual por sector

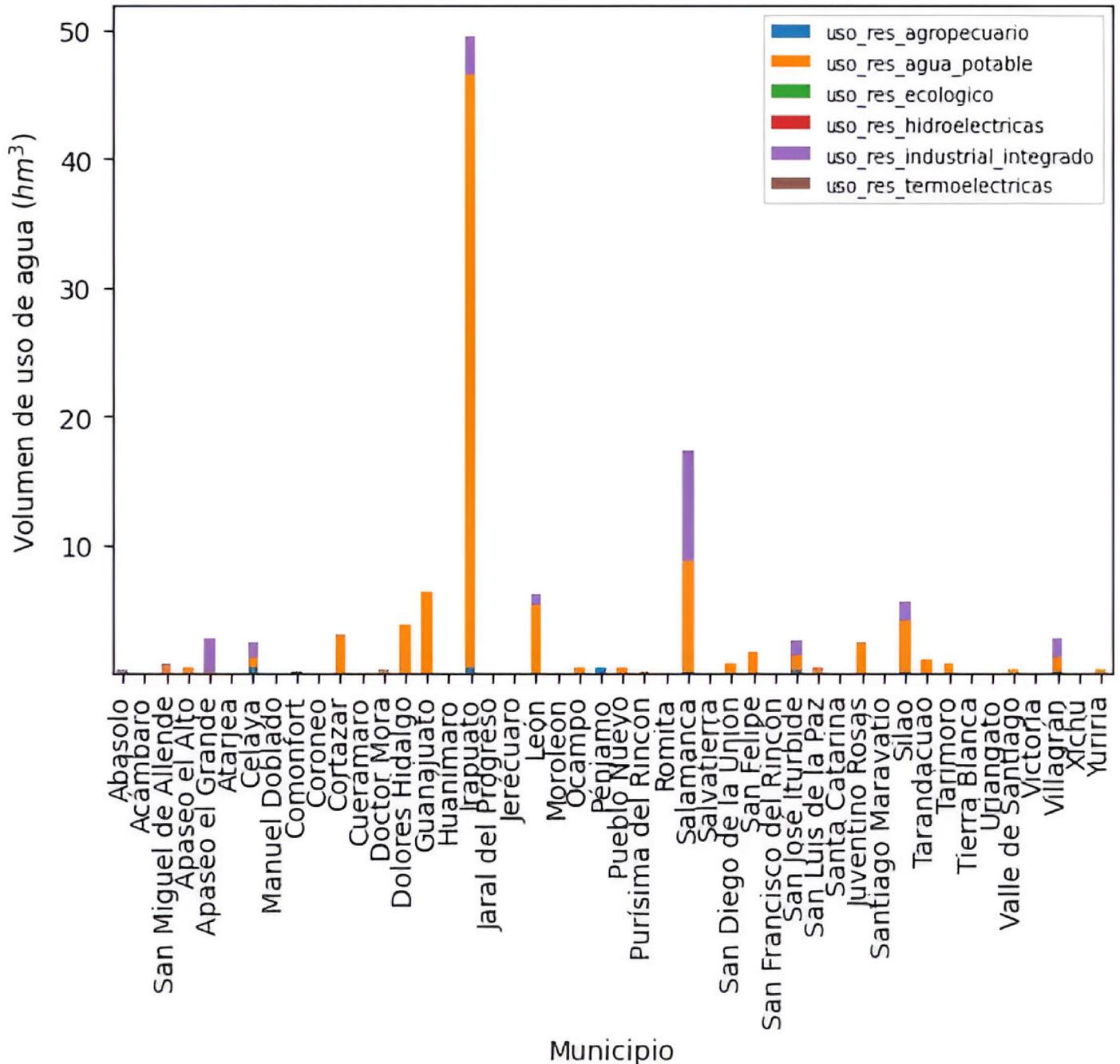


Figura 4a. Gráfica de proporciones de agua residual utilizada por sector en los municipios de Guanajuato.

Fuente: elaboración propia

Proporciones de uso de agua subterránea por sector

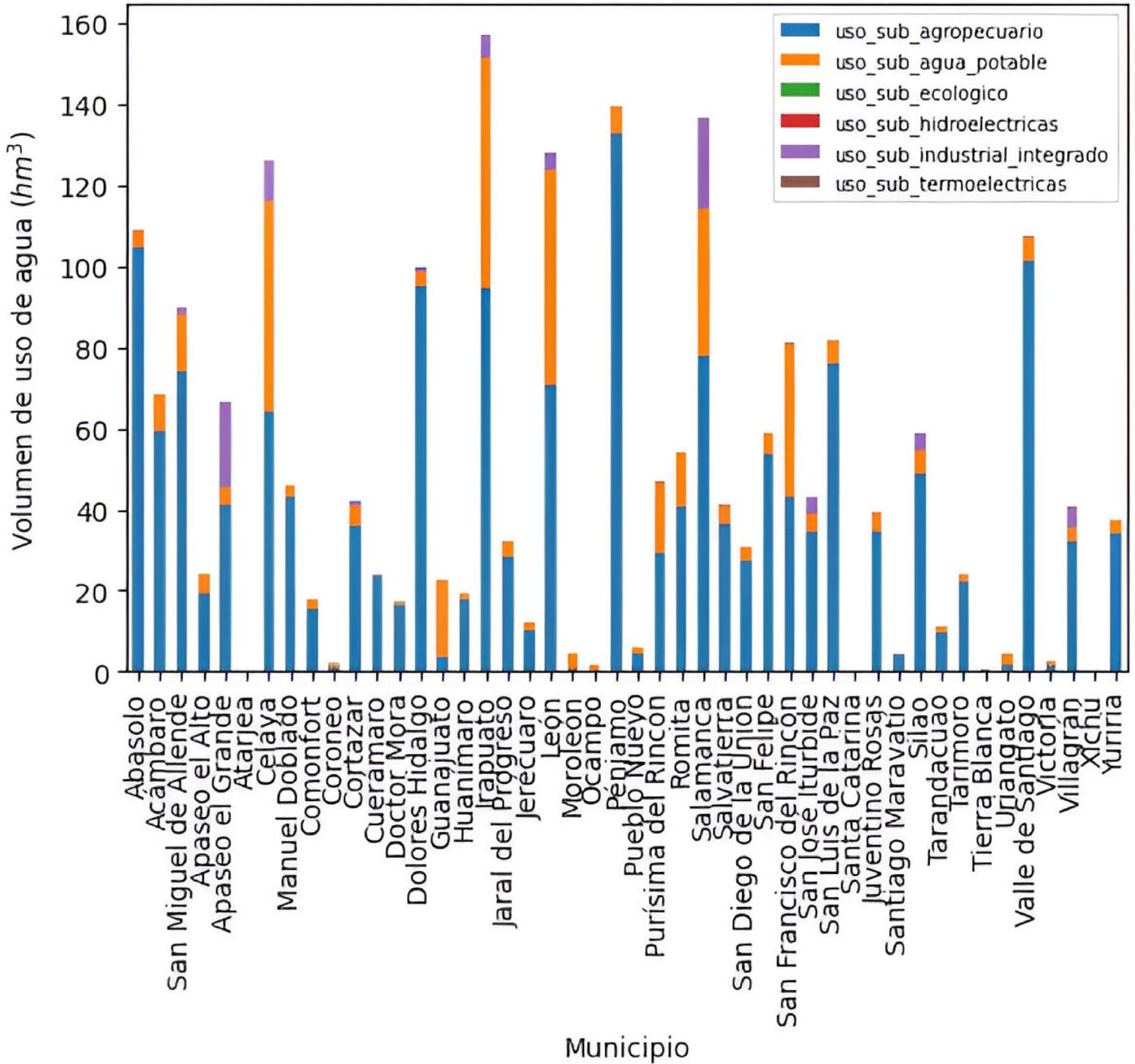


Figura 4b. Gráfica de proporciones de agua subterránea utilizada por sector en los municipios de Guanajuato.

Fuente: elaboración propia

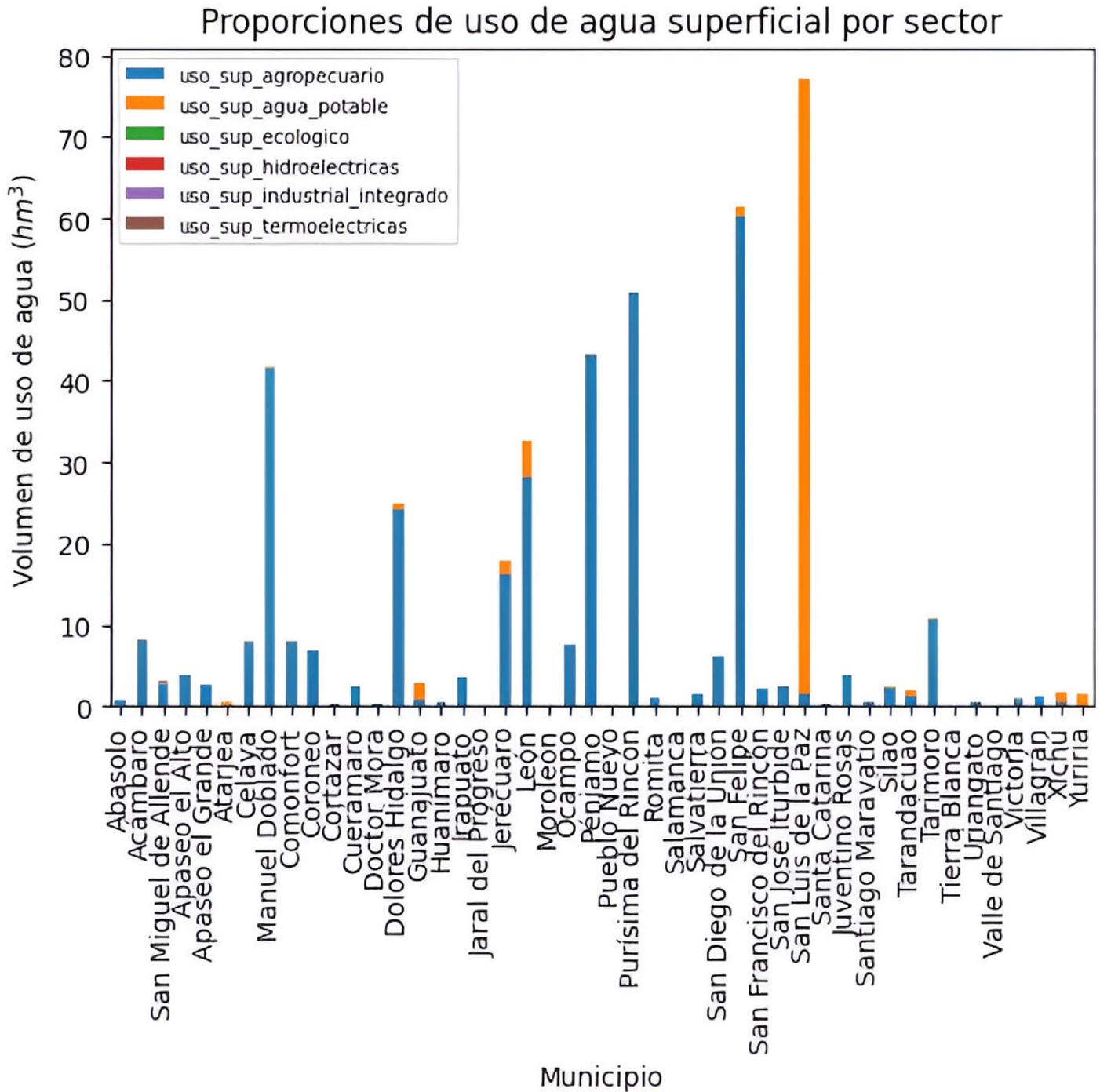


Figura 4c. Gráfica de proporciones de agua superficial utilizada por sector en los municipios de Guanajuato.
 Fuente: elaboración propia

Proporciones de uso de agua de zonas federales por sector

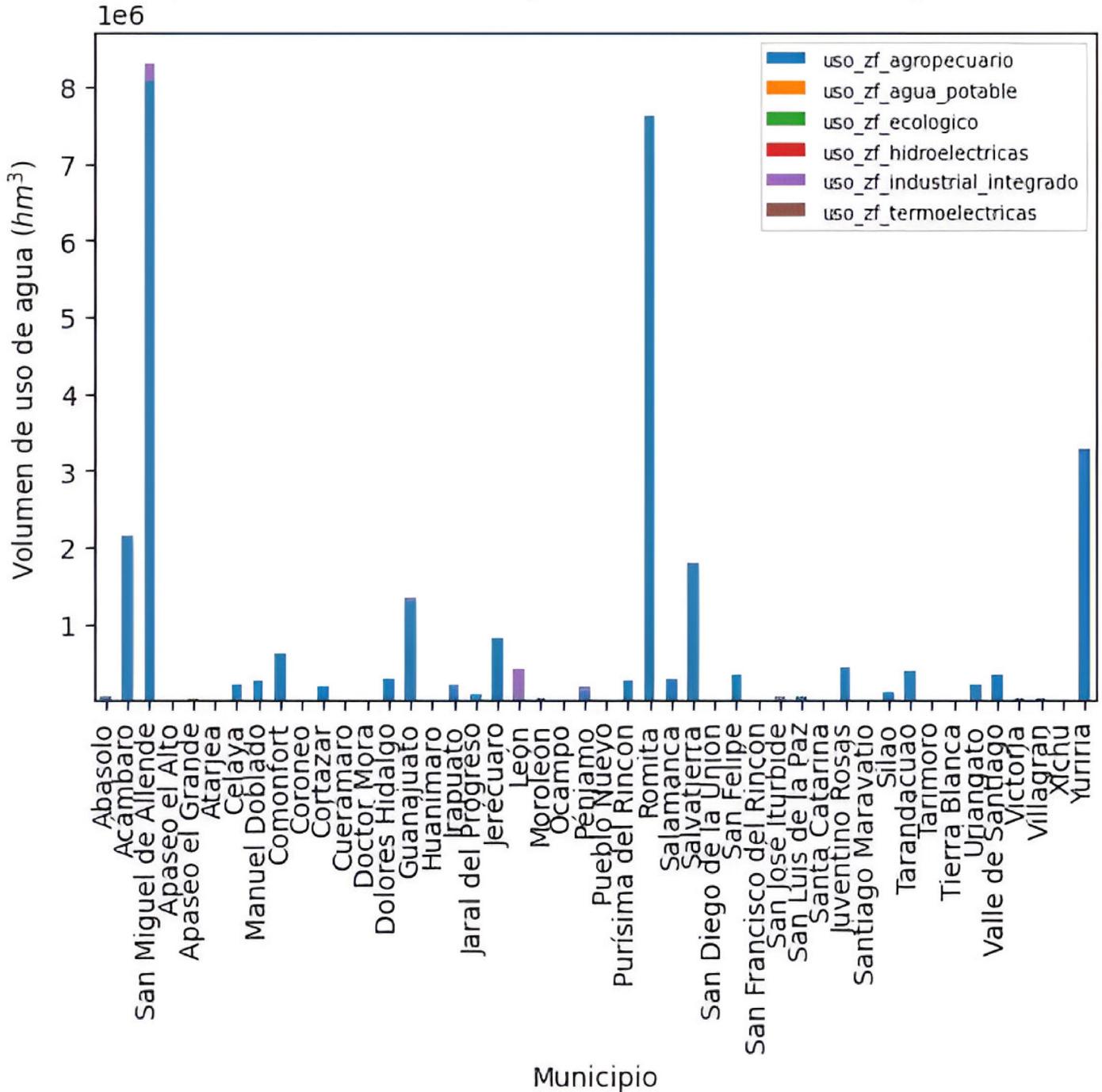


Figura 4d. Gráfica de proporciones de agua de zonas federales utilizada por sector en los municipios de Guanajuato. Fuente: elaboración propia.



Con respecto al agua residual, en la Figura 4 se puede observar que su uso es mayor como agua potable, seguida del sector industrial. El municipio que consume mayor agua residual es Irapuato. Por otro lado, el agua subterránea y el agua superficial se utilizan mayormente en el sector agropecuario; Irapuato es el municipio que utiliza más agua subterránea, en tanto que, en el caso del agua superficial, San Felipe es la municipalidad que más la utiliza. También se observa que, en el caso de agua superficial, San Luis de la Paz es el municipio que utiliza este tipo como agua potable. Finalmente, el agua de zonas federales se utiliza principalmente para los sectores agrícola e industrial.

Análisis de concesiones

En la Figura 5, se muestra la cantidad de concesiones por tipo de uso de agua.

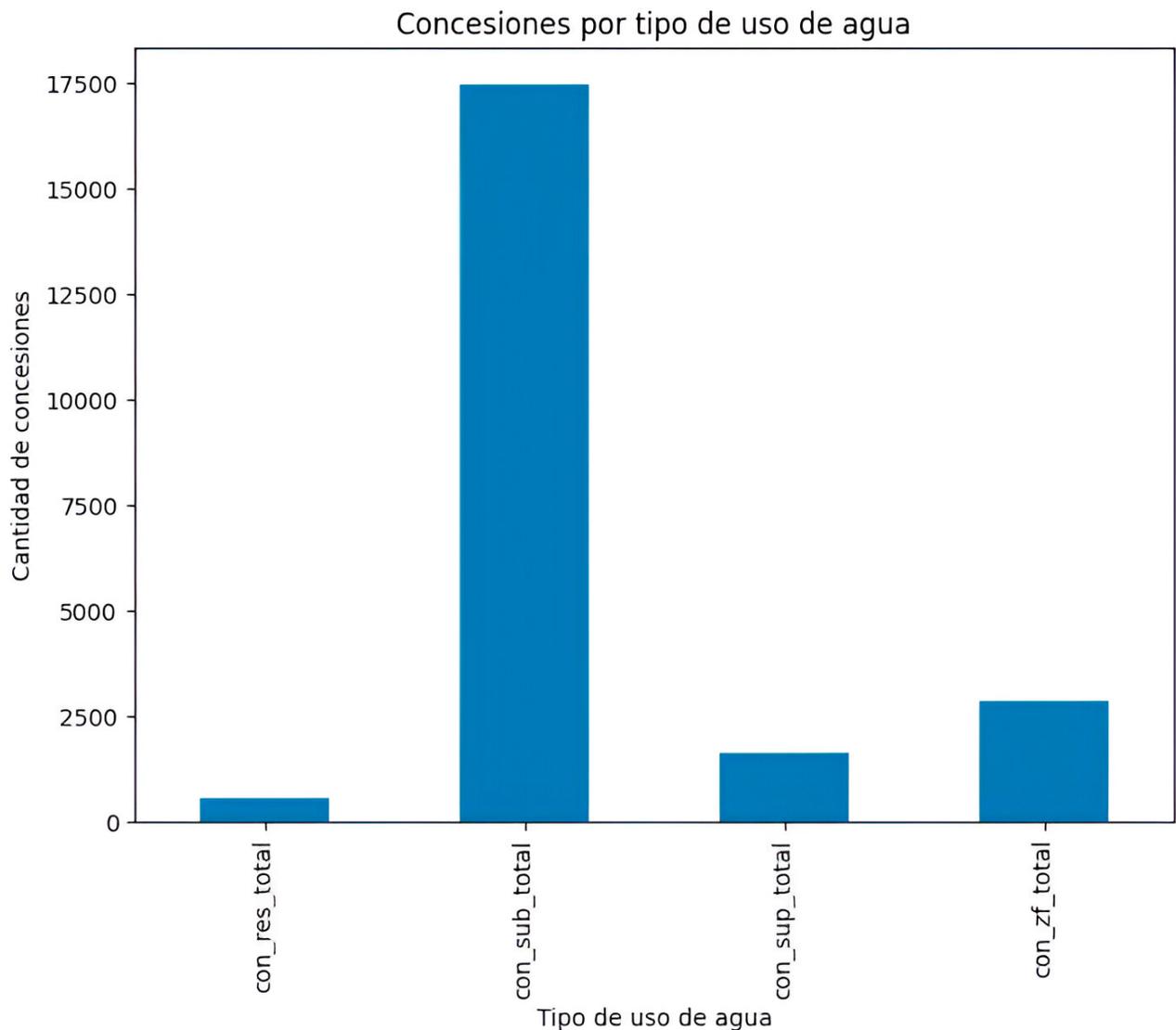


Figura 5. Gráficas de concesiones por tipo de uso de agua.

Fuente: elaboración propia



Como se puede observar, las aguas subterráneas, siendo accesibles y abundantes, son las más concesionadas, seguidas de aguas de zonas federales, luego las superficiales y finalmente aguas residuales, que, aunque en menor proporción, representan una importante fuente de agua reutilizable, especialmente en sectores industriales y agrícolas.

Discusión de resultados

A continuación, se enlistan algunas aseveraciones obtenidas a partir del análisis realizado.

- Los resultados del análisis descriptivo y los histogramas revelan una distribución desigual del uso del agua en los diferentes sectores estudiados, particularmente el sector agropecuario y el uso excesivo de agua de zonas federales. Estas prácticas podrían conducir a la necesidad de una gestión más específica y eficiente del agua, de manera que se garantice su sostenibilidad. Como estrategias, se podrían implementar la **monitorización** de los niveles de agua subterránea en tiempo real, para evitar su sobreexplotación, así como la **implementación de técnicas para la optimización del uso del agua desde una perspectiva computacional**.
- El uso de agua para fines ecológicos, hidroeléctricas y termoeléctricas no figura en el estado de Guanajuato.
- Las variaciones en el uso del agua entre sectores pueden estar influenciadas por una serie de factores, incluyendo la disponibilidad de recursos hídricos, las necesidades específicas de cada sector, la infraestructura de gestión del agua, las políticas gubernamentales y las prácticas de uso del agua. Por ejemplo, la alta dependencia del agua subterránea en el sector agropecuario en la mayoría de los municipios podría estar influenciada por la disponibilidad de pozos y sistemas de riego.
- Un patrón común es el uso del agua subterránea, superficial y agua de zonas federales en el sector agropecuario, mientras que el agua residual se utiliza principalmente para abastecimiento de agua potable e industria.
- El agua subterránea es la que presenta una mayor cantidad de concesiones.
- Factores externos como el cambio climático, la disponibilidad de recursos hídricos, las políticas gubernamentales y los cambios en la demanda de agua podrían influir en el uso del agua en Guanajuato. Asimismo, estos factores podrían afectar los resultados de este análisis al cambiar las condiciones de disponibilidad y demanda de agua en la región.
- **Es necesario realizar ajustes en las estrategias de gestión del agua para garantizar su sostenibilidad a largo plazo.**



Conclusiones

En el estado de Guanajuato, la gestión y distribución del agua son fundamentales para satisfacer las necesidades de diversos sectores, con una clara predominancia de las aguas subterráneas en las concesiones, seguidas de las aguas de zonas federales y superficiales. Las aguas residuales, aunque en menor proporción, se utilizan mayoritariamente como agua potable, mientras que las aguas subterráneas y superficiales son esenciales para el sector agropecuario. El uso del agua de zonas federales destaca en los sectores agropecuario e industrial, evidenciando una dependencia significativa de estas fuentes.

El análisis estadístico y los histogramas revelan una distribución desigual del uso del agua en los diferentes sectores, con una dispersión considerable en el uso del agua de zonas federales, sugiriendo una concentración en áreas específicas como granjas, cultivos o parques industriales. Además, la ausencia de datos para los sectores ecológico, hidroeléctrico y termoeléctrico indica posibles lagunas en el reporte o la inexistencia de estos usos en el estado. La variabilidad en el uso del agua entre municipios y sectores está influenciada por la disponibilidad de recursos hídricos, infraestructura y políticas gubernamentales.

Es crucial implementar estrategias de gestión del agua más específicas y eficientes para garantizar su sostenibilidad a largo plazo. Esto incluye la monitorización de los niveles de agua subterránea en tiempo real y la optimización del uso del agua mediante técnicas avanzadas. Factores como el cambio climático y las políticas gubernamentales seguirán afectando la disponibilidad y demanda de agua, por lo que es esencial adaptar las estrategias de gestión para enfrentar estos desafíos y asegurar un suministro de agua resiliente y equitativo en Guanajuato.

Referencias

- PANDEY, Prerna; Dongre, Shilpa y Gupta, Rajesh. Soft Computing Techniques for Forecasting of Water Demand. En: Modeling and Simulation of Environmental Systems. vol. 1. CRC Press, 2022. ISBN 978-1-00-320344-5.
- REIS, Ana L., Lopes, Marta, A. R., Andrade-Campos, A. y Henggeler, Carlos. A review of operational control strategies in water supply systems for energy and cost efficiency. Renewable and Sustainable Energy Reviews. [En línea]. Vol. 175, April 2023. [Fecha de consulta: 03 de noviembre de 2023]. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113140> ISSN: 1364-0321.
- FAN, Yu; Chen, Haroui; Gao, Zhany y Chang, Xiaomin. Canal water distribution optimization model based on water supply conditions. Computers and Electronics in Agriculture. [En línea]. Vol. 205, February 2023. [Fecha de consulta: 03 de noviembre de 2023]. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107565> ISSN: 1872-7107.
- COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (CONAGUA). Estadísticas del Agua en México 2021. Sistema Nacional de Información del Agua. [En línea]. [Fecha de consulta: 03 de noviembre de 2023]. Disponible en: <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/>
- SAVENIJE, H. H. G. y Van der Zaag, P. Integrated water resources management: Concepts and issues. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. [En línea]. Vol. 33, no. 5, p. 290–297. 2008. [Fecha de consulta: 03 de noviembre de 2023]. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2008.02.003> ISSN: 1474-7065.
- CASTELLAZZI, Pascal; Martel, Richard; Rivera, Alfonso; Huang, Jianliang; Pavlic, Goran; Calderhead, Angus I., et al. Groundwater depletion in Central Mexico: Use of GRACE and InSAR to support water resources management. Water Resources Research [En línea]. Vol. 52, no. 8, p. 5985–6003. July, 2016. [Fecha de consulta: 28 de octubre de 2023]. <https://doi.org/10.1002/2015WR018211> ISSN: 1944-7973.
- PROCURADURÍA FEDERAL DE PROTECCIÓN AL AMBIENTE (PROFEPA). Ley de Aguas Nacionales. Gobierno de México. [En línea]. 05 de septiembre de 2016. [Fecha de consulta: 11 de enero de 2023]. Disponible en: <https://www.gob.mx/profepa/documentos/ley-de-aguas-nacionales-62956>
- WALLER, Matthew A. y Fawcett, Stanley E. Data Science, Predictive Analytics, and Big Data: A Revolution That Will Transform Supply Chain Design and Management. Journal of Business Logistics. [En línea]. Vol. 34, no. 2, p. 77–84. 11 June 2013. [Fecha de consulta: 28 de octubre de 2023]. <https://doi.org/10.1111/jbl.12010> ISSN: 2158-1592.
- BLEI, David M. y Smyth, Padhraic. Science and data science. Proceedings of the National Academy of Sciences. PNAS. [En línea]. Vol. 114, no. 33, p. 8689–8692. August 7, 2017. [Fecha de consulta: 28 de octubre de 2023]. <https://doi.org/10.1073/pnas.1702076114> ISSN: 1091-6490.

Fecha de recepción

Fecha de aceptación

Fecha de publicación

6/11/2023

6/8/2024

31/01/2025

77

La Revista Reacción actúa como mero difusor, por lo que el contenido y opiniones del artículo son responsabilidad exclusiva de los autores y autoras, y no representan la opinión oficial de la Revista Reacción, ni de la Universidad Tecnológica de León.

La revista adquiere los derechos patrimoniales de los artículos solo para difusión sin ningún fin de lucro. Las personas que utilicen la información contenida en la revista para su difusión están obligadas a referenciar la revista como fuente de información.

REA>XION

Ciencia y tecnología universitaria

latindex

Google Académico

 **Actuality Iberoamericana**
Indice Internacional de Revistas


PERIÓDICA
Indice de Revistas Latinoamericanas en Ciencias


UTL