

Desarrollo de un índice de calidad ambiental mediante el uso de tecnología satelital para zonas cañeras: el caso de San Luis Potosí, México

Development of an environmental quality index using satellite technology for sugarcane areas: the case of San Luis Potosí, México

Pedro Pérez Medina^{1*}, María Guadalupe Galindo Mendoza² y Ángel de Jesús Quiroz Gaspar²

^{1*} Programa Multidisciplinario de Posgrado en Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. CP 78397, San Luis Potosí, San Luis Potosí, México. Tel. (444) 88261450. A35047@alumnos.uaslp.mx.

² Laboratorio Nacional de Geoprocamiento de Información Fitosanitaria, Coordinación para la Innovación y Aplicación de la Ciencia y la Tecnología, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

*Autor de correspondencia

Resumen

El monitoreo satelital para la creación de índices de calidad ambiental es una técnica asequible y pertinente que se utiliza para conocer el impacto de las actividades antropogénicas sobre el ambiente. Recientemente, sus beneficios se han potencializado con el desarrollo de herramientas como Google Earth Engine. El objetivo de esta investigación es proponer un índice de calidad ambiental en zonas donde los servicios ecosistémicos se ven afectados por la actividad cañero-azucarera. Para construirlo se incluyeron cuatro variables: carbono negro, índice normalizado de área quemada, índice de vegetación mejorado y temperatura del suelo. La propuesta resultó en una escala ordinal de cinco niveles de calidad ambiental, que van de "calidad muy mala" a "calidad muy buena". Se tomó como estudio de caso la zona cañera de San Luis Potosí, durante la zafra 2021-2022. Con el análisis se observó que, en general, la calidad del aire mejora durante los meses que no hay cosecha hasta llegar a ser buena. Se recomienda continuar experimentando con más variables y ampliar el periodo de análisis para robustecer los resultados.

Palabras clave: Caña de azúcar; zafra; monitoreo; calidad ambiental.

Abstract

Satellite monitoring to generate environmental quality indices is an affordable and relevant technique to understand the impact of anthropogenic activities on the environment. Recently, its usefulness has been increased by the development of tools such as Google Earth Engine. The objective of this study is to propose an environmental quality index in areas where ecosystem services are affected by sugarcane production. Four variables were included in the design: black carbon, normalized burned area index, improved vegetation index, and soil temperature. The proposal resulted in an ordinal scale of five levels of environmental quality ranging from "very poor quality" to "very good quality". The sugarcane area of San Luis Potosí was used as a case study for the 2021-2022 harvest. The analysis showed that air quality generally improves to "good" during the non-harvest months. It is recommended to continue experimenting with more variables and to extend the analysis period to consolidate the results.

Keywords: Sugar cane; harvest; monitoring; environmental quality.

Recibido: 25 de enero de 2023

Aceptado: 18 de octubre de 2023

Publicado: 15 de noviembre de 2023

Cómo citar: Pérez Medina, P., Galindo Mendoza, M. G., & Quiroz Gaspar, A. J. (2023). Desarrollo de un índice de calidad ambiental mediante el uso de tecnología satelital para zonas cañeras: el caso de San Luis Potosí, México. *Acta Universitaria* 33, e3780. doi: <http://doi.org/10.15174/au.2023.3780>

Introducción

El monitoreo ambiental es la acción de tomar lecturas, medidas y evaluaciones de variables físicas, químicas y biológicas, en un periodo de tiempo determinado, a fin de conocer tanto los cambios como el seguimiento del estado ambiental y el grado de conservación que tienen los recursos naturales en una zona geográfica. Es la clave para la gestión ambiental, ya que genera información que permite planear la implementación de medidas que limiten, atenúen o eviten el deterioro ambiental, así como apoyar en el establecimiento y seguimiento de programas, normas, planes y proyectos para los procesos productivos (Yáñez-Narváez, 2022).

El monitoreo ambiental se realiza comúnmente con estaciones en tierra, presentando el inconveniente de tener altos costos y validez espacial limitada (Oliveira & Rodrigues, 2011). Su objetivo principal es identificar las fuentes de las alteraciones ambientales para supervisarlas, fiscalizarlas y sancionarlas de acuerdo con el nivel de afectación que se les atribuya (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental [OEFA], 2017). Se realiza principalmente en las grandes ciudades donde se considera que se genera más contaminación y se concentra la mayor importancia social y económica (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat], 2018), por lo que se dejan de lado las zonas rurales, ya que comúnmente se cree que sus actividades son de bajo impacto ambiental.

La Norma Oficial Mexicana NOM-156-SEMARNAT-2012, publicada el 16 de julio de 2012, establece la obligatoriedad de realizar el establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de calidad del aire para asentamientos humanos con más de 500 000 habitantes o con emisiones superiores a 20 000 toneladas anuales de contaminantes criterio primarios; zonas metropolitanas y conurbaciones; así como lugares donde se desarrollen actividades industriales que, por sus características, requieran del establecimiento de estaciones de monitoreo de calidad del aire o de muestreo de contaminantes atmosféricos (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2012). Esta norma está enfocada a ciudades, asumiendo que son los lugares donde más contaminación se genera. No obstante, varias actividades relacionadas con el sector agropecuario utilizan de forma intensiva los recursos naturales y los contaminan, afectando al ambiente y la salud humana (Ruiz-Villavicencio *et al.*, 2020).

El monitoreo tradicional de zonas extensas, como las rurales, implica altos costos y una logística complicada; sin embargo, el desarrollo de tecnología satelital ha permitido monitorear la contaminación en estas zonas a bajo costo y en tiempo cuasi real. Además, con la observación de otras características de la superficie terrestre se han comenzado a proponer índices que estiman la calidad ambiental y sus variaciones espaciotemporales (Dobbie & Dail, 2014; SkyWatch, 2022). La mayoría de estos índices se han enfocado en la salud humana y han dejado de lado las múltiples afectaciones de las actividades antropogénicas.

El objetivo del presente artículo es desarrollar un índice de calidad ambiental (ICA) que incluya variables afectadas por la actividad cañero-azucarera, como la concentración de carbono negro (BC), la temperatura del suelo (TS) y los índices: normalizado de área quemada (NBR) y de vegetación mejorado (EVI). El efecto de estas variables no se reduce a su afectación en la salud humana, sino que también se relaciona con la calidad de los suelos, con la productividad agrícola y, en general, con el ambiente local y global.

La zafra es el periodo de cosecha e industrialización de la caña de azúcar, que abarca aproximadamente seis meses de cada año (Agricultura Puebla, 2018). En este tiempo se suscitan actividades de alto impacto ambiental, desde la quema de los cañaverales durante la cosecha hasta la combustión de biomasa y de combustibles fósiles en los ingenios azucareros (Cardoso *et al.*, 2017). Además, se genera un importante afluente de vehículos de carga pesada; por ejemplo, tan solo en México se movilizan más de 7000 unidades durante este periodo (Comisión Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar [Conadesuca], 2022).

El análisis de la presente investigación comprendió los meses de diciembre de 2021 a octubre de 2022, para abarcar los meses que se prolongó la zafra 2021-2022 más 90 días posteriores a la culminación de la misma a fin de analizar la variación entre ambos periodos.

El BC es uno de los principales contaminantes del aire que son emitidos durante la zafra. Se origina por la combustión ineficiente e incompleta de biomasa y de combustibles fósiles y es capaz de absorber la luz solar, retenerla y transformarla en calor. Se considera el segundo mayor precursor de cambio climático, con un potencial de calentamiento equivalente al 55% del atribuido al dióxido de carbono (CO₂) (Liu *et al.*, 2022). Además, está asociado a daños en la salud humana por paros e insuficiencia cardíacos (Burroughs-Peña & Rollins, 2017); derrames sanguíneos (Mordukhovich *et al.*, 2009); cáncer de pulmón (Yong *et al.*, 2019); bronquitis crónica, asma y enfisema (Paunescu *et al.*, 2019); bajo peso al nacer (Bové *et al.*, 2019); así como deshidratación grave, disfunción renal aguda y genotoxicidad (Chaudhuri *et al.*, 2017). Dada la asociación de sus emisiones con otros contaminantes altamente nocivos, como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), el BC también es considerado el principal indicador de la calidad del aire en la salud humana (Casares-Long *et al.*, 2020).

Otro efecto relacionado con la quema de caña de azúcar es la pérdida o descomposición de materia orgánica, tanto aérea como subterránea. Cuanto más severa es la quema, más afecta los procesos de la superficie quemada: muerte de la vegetación, invasión de plantas tóxicas, supervivencia de semillas, función hidrológica del suelo, cambios subterráneos de flora y fauna, disminución de rebrotes y variaciones estructurales del suelo, que pueden afectar a los procesos erosivos (Keeley, 2009). La severidad de la quema se puede determinar a través de índices de vegetación como el NBR.

Con las quemas, además, se incrementa la TS, un parámetro fundamental en la agricultura, ya que determina el éxito de la germinación y el desarrollo de las plantas. De forma natural, los valores de la TS se encuentran en función de la estación y la radiación solar; sin embargo, actividades como las quemas de residuos agrícolas alteran dichos valores y modifican las características biológicas, químicas y físicas de los suelos (Moitinho *et al.*, 2021).

Además, temperaturas demasiado bajas o altas matan los organismos del suelo y las plantas. Se ha observado que los cultivos ralentizan su desarrollo a partir de los 32 °C, y a los 60 °C las bacterias del suelo mueren por el calor. Asimismo, a partir de los 38 °C la vegetación no puede absorber suficiente humedad y pierde hasta un 85% de ésta debido a la evapotranspiración (EOS Data Analytics, 2023). Aunado a ello, cuando se superan estas temperaturas, el riego es poco recomendable, ya que la mayoría de los aportes de agua se convertirán en residuos debido a la rápida evaporación, sin contar que las gotas de agua refractadas podrían actuar como lupa y quemar la vegetación. Dado lo anterior, y de forma general, el intervalo de temperaturas para el desarrollo de los cultivos se encuentra entre los 20 °C y los 35 °C (Onwuka & Mang, 2018).

Por otra parte, indicadores como la vigorosidad de la vegetación se ven afectados tras la realización de una quema, lo cual se ve reflejado en las funciones propias de la vegetación. Con el EVI se puede medir el nivel de salud de la vegetación en un área determinada, dicho índice es similar al índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), pero en este se corrigen algunas condiciones atmosféricas y el ruido de fondo del dosel, además de ser más sensible en áreas con vegetación densa (EOS Data Analytics, 2023). Su valor fluctúa entre -1 y 1, y es muy útil para analizar pronósticos de rendimiento, patrones de crecimiento y mapeo de la fenología de cultivos, así como para detectar las características de la cobertura del suelo (Sharma, 2020).

En los últimos años se han creado varios índices de calidad ambiental (ICA) en diferentes partes del mundo. Aunque la mayoría de estos han sido diseñados para grandes ciudades y se han enfocado en la salud humana, algunos otros han considerado múltiples afectaciones a través de diversos métodos y con variables de diferente naturaleza (Tabla 1).

Tabla 1. Algunos índices de calidad ambiental diseñados en diferentes partes del mundo.

Índice	Variables utilizadas	Afectaciones	Autores
City Noise-Air	Contaminación atmosférica y contaminación por ruido	Salud humana	Silva & Mendes (2012)
Environmental quality index for public health research	5 dominios: variables de aire, agua, suelo, sociodemográficas y del entorno construido	Salud humana	Messer et al. (2014)
Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire	Contaminación atmosférica: 3 contaminantes criterio y ozono	Salud humana y calentamiento global	Observatorio Ambiental de Cartagena de Indias (2015)
Association between Heatwaves and Mortality	5 dominios: variables de aire, agua, suelo, sociodemográficas y del entorno construido. Olas de calor	Salud humana	Jian et al. (2017)
Environmental Quality Index to Assess Physical Agents Pollution	Agentes físicos ambientales: Ruido, campos electromagnéticos, radiación natural, microclima	Salud humana	Mancini et al. (2020)
The Canadian Environmental Quality Index (Can-EQI)	5 dominios: variables de aire, agua, suelo, sociodemográficas y del entorno construido. Olas de calor	Salud humana	Davis et al. (2022)
Environmental Quality Index (EQI)	5 dominios: variables de aire, agua, suelo, sociodemográficas y del entorno construido. Olas de calor	Salud humana	EPA (2022)
Environmental Performance Index (EPI)	40 indicadores de desempeño en 11 categorías temáticas	Cambio climático, salud ambiental y vitalidad del ecosistema	Wolf et al. (2022)
ICA Buenos Aires	PM _{2.5}	Salud humana	IQAir (2022)

Fuente: Elaboración propia.

De igual forma, los ICA implementados para México se monitorean sólo en las ciudades más grandes del país, como: el IMECA para la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) (Comisión Ambiental de la Megalópolis, 2018); los índices aire y salud y calidad del aire CDMX (Gobierno de la Ciudad de México, 2022); el índice aire y salud del sistema nacional de información de calidad del aire (Sinaica) (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC], 2022); los índices aire y salud y calidad del aire AMG (Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial [Semadet], 2022); y el índice aire y salud Nuevo León (Secretaría de Medio Ambiente, 2022), por mencionar algunos.

En este ICA se otorgó un mayor peso a la variable BC (40%) por la multiplicidad de sus afectaciones; sin embargo, es necesario considerar el énfasis que se le quiera dar al ICA, ya que si, por ejemplo, estuviera enfocado a las afectaciones específicas a los ecosistemas locales o a la agricultura, se podría asignar un mayor peso al EVI, al NBR o a la TS. En cualquiera de los casos, se conmina al mayor énfasis en la propuesta metodológica.

Materiales y métodos

Área de estudio

La zona cañera de San Luis Potosí se extiende a más de 90 000 ha en la región huasteca del estado y produce casi 5 000 000 de toneladas de caña de azúcar anualmente (Conadesuca, 2022). El total de la producción se procesa en los cuatro ingenios establecidos en la entidad: Plan de Ayala, ubicado en la cabecera municipal de Ciudad Valles; Plan de San Luis, situado en la comunidad La Hincada del municipio de Ciudad Valles; Alianza Popular, establecido en la comunidad Tambaca, municipio de Tamasopo; y San Miguel del Naranjo, que se encuentra en la cabecera del municipio de El Naranjo (Figura 1).

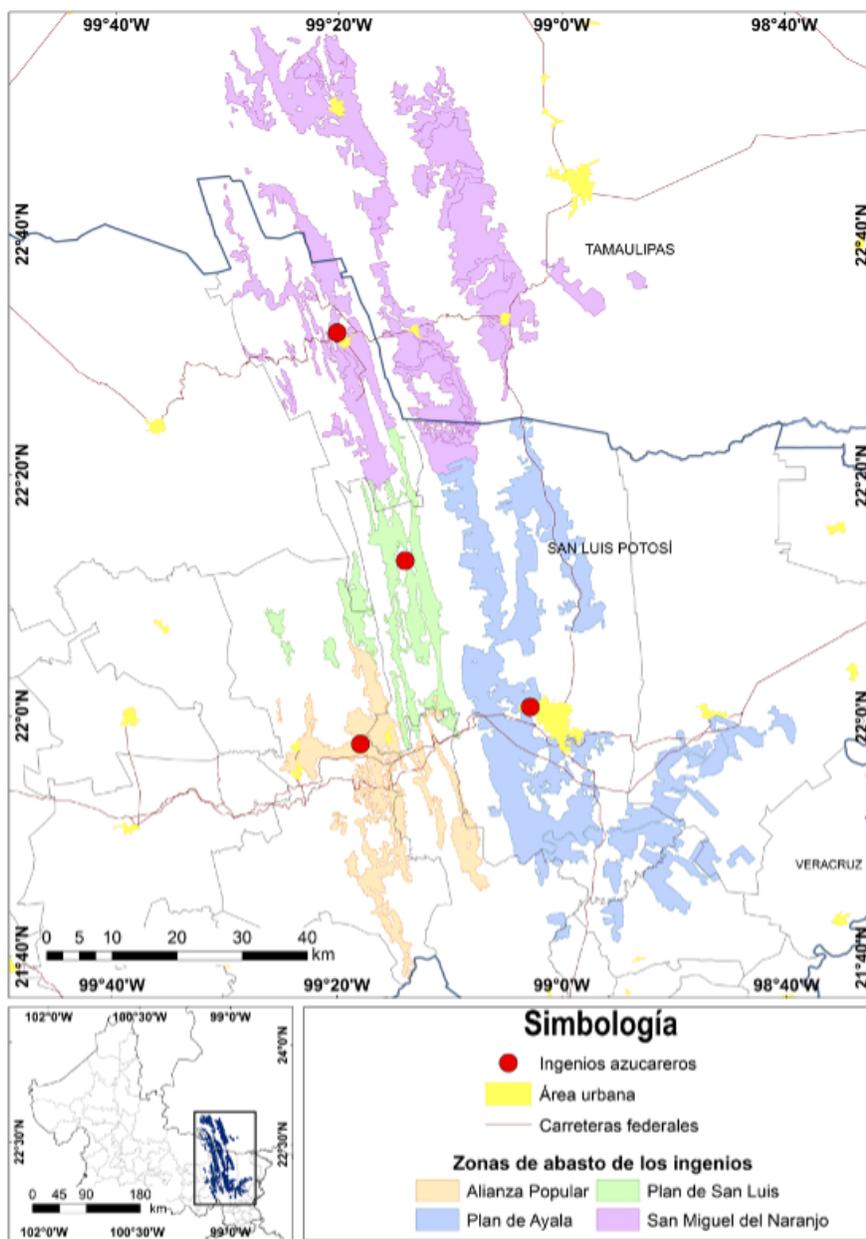


Figura 1. Ingenios azucareros de San Luis Potosí y sus zonas de abasto
Fuente: Elaboración propia.

Metodología

Para obtener las concentraciones de BC, se descargaron y procesaron las imágenes contenidas en las colecciones de datos de los productos MERRA-2 en los portales web: GIOVANNI (National Aeronautics and Space Administration [NASA], 2022a) y MDISC (NASA, 2022b), este último gestionado por Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC).

Se utilizó la variable *Black Carbon Surface Mass Concentration* del producto M2T1NXAER versión 5.12.4, la cual se refiere a una recopilación de datos bidimensionales promediados, obtenidos cada hora a partir de las 00:30 UTC de cada día. Las imágenes están disponibles a partir de 1980 y hasta tres semanas antes de la fecha de acceso. Este producto utiliza observaciones satelitales basadas en RETRO-2 (Reanalysis of the Tropospheric Chemical Composition, versión 2) y contiene un diagnóstico de aerosoles asimilados (extendidos) a 550 nm. La resolución espacial es de 0.5°X0.625° (aproximadamente 55.5 km x 69.4 km), las concentraciones están dadas en kg/m³, y las imágenes se descargan en formato NetCDF (Earth Data, 2015).

El procesamiento de la información se realizó con el software ArcMap versión 10.5, y consistió en la extracción e importación de datos, así como en su conversión a formato ráster. Asimismo, se escalaron las unidades de las imágenes para elevarlas a µg/m³, y se aplicó un remuestreo utilizando la interpolación del vecino más cercano propuesto en el Climate Data Operator (CDO) User's Guide, versión 1.9.6©, cuyo enfoque de muestreo es factible y adoptado en estudios de validación (Ma *et al.*, 2021).

Finalmente, se extrajo la información con el padrón actualizado de la zona cañera del estado de San Luis Potosí y se clasificó en intervalos de 0.2 µg/m³, estableciendo como límite superior las concentraciones >1.0 µg/m³, el cual es un referente de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para efectos negativos en la salud humana por exposición directa a BC (Janssen *et al.*, 2012).

En el mismo sentido, para identificar áreas quemadas en la zona cañera de San Luis Potosí, se utilizó el NBR, que es un índice de vegetación que identifica áreas quemadas en superficies extensas y constituye una forma de análisis del impacto de los incendios sobre la superficie terrestre a través de su severidad (United Nations [UN], 2018).

La ecuación utilizada para el cálculo es parecida a la del NDVI; sin embargo, combina longitudes de onda diferentes: el infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo de onda corta (SWIR) (ecuación 1).

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (1)$$

Una vegetación saludable muestra una reflectancia alta en NIR y baja en SWIR; lo contrario ocurre cuando se tiene una vegetación enferma. Por ello, un valor alto de NBR indica vegetación saludable y uno bajo indica suelo desnudo y áreas recientemente quemadas. Las áreas no quemadas normalmente se atribuyen a valores cercanos a 0. El valor del NBR estima la severidad del fuego de un área en un momento, por lo que, para estimar su cambio a través del tiempo, es necesario utilizar un diferencial de NBR (dNBR), con el cual se calcula la diferencia entre el NBR previo a un incendio (prefuego) y el NBR posterior al mismo (postfuego). Un mayor valor de NBR indica un daño más severo, mientras que los valores negativos de NBR pueden indicar el rebrote de la vegetación después del incendio. Para su cálculo se utiliza la ecuación 2 (Keeley, 2009).

$$dNBR \text{ o } \Delta NBR = NBR_{Prefuego} - NBR_{Postfuego} \quad (2)$$

Aunque los valores del NBR pueden variar en cada caso, el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) ha propuesto una tabla para clasificar la severidad de los incendios (Tabla 2).

Tabla 2. Clasificación de los niveles de severidad de áreas quemadas, propuesto por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés).

Rango de dNBR		Rango de dNBR (escalado a 10 ³)		Nivel de severidad
Límite inferior	Límite superior	Límite inferior	Límite superior	
-0.500	-0.251	-500	-251	Alto crecimiento de la vegetación posterior al fuego
-0.250	-0.101	-250	-101	Bajo crecimiento de la vegetación posterior al fuego
-0.100	0.099	-100	99	Zonas estables o sin quemar
0.100	0.269	100	269	Zonas quemadas con severidad baja
0.270	0.439	270	439	Zonas quemadas con severidad moderada-baja
0.440	0.659	440	659	Zonas quemadas con severidad moderada-alta
0.660	1.300	660	1300	Zonas quemadas con severidad alta

Fuente: UN (2018).

Habitualmente el cálculo del NBR se realiza con *softwares* de sistemas de información geográfica como ArcMap, pero actualmente existen plataformas en donde se pueden crear algoritmos especializados para automatizar el proceso. Para la presente investigación se utilizó Google Earth Engine (GEE), una plataforma gratuita en la nube, diseñada para procesar grandes volúmenes de datos de imágenes de satélite (petabytes) y bases de datos geoespaciales en gran diversidad de aplicaciones, a escala global. GEE permite al usuario ejecutar diversos procesos y análisis con la infraestructura de Google de distintas maneras, una de ellas es a través del IDE basado en la web denominado Code Editor.

Code Editor permite el acceso a las colecciones de los conjuntos de datos satelitales y geoespaciales a través del desarrollo de algoritmos complejos para el mapeo de la severidad de quema propuesto por Keeley (2009). Los algoritmos se desarrollaron sobre la interfaz de programación de aplicaciones (API) de JavaScript para realizar el flujo de trabajo de preprocesamiento, procesamiento, generación y exportación de información de manera automatizada.

En el mismo sentido, el monitoreo de la TS se realizó con imágenes del Level-1 and Atmosphere Archive & Distribution System Distributed Active Archive Center (LAADS DAAC), de la plataforma EARTHDATA de la National Aeronautics and Space Administration (NASA), la cual archiva y distribuye datos sobre nubes, vapor de agua y aerosoles en la atmósfera terrestre (LAADS DAAC, 2022).

Los datos provienen del sensor MODIS-Terra, de la colección MODIS 6 – Nivel I, Atmósfera, Tierra (conjunto de archivos 6). Dado que el análisis es local, se eligió el producto con la mayor resolución espacial del conjunto de datos Land Surface Temperature & Emissivity. En este caso, se seleccionó el producto MOD11A2 (MODIS/Terra LandSurface Temperature/3-Band Emissivity 8-Day L3 Global 1km SIN Grid), el cual ha sido mejorado con varios cambios de calibración que proporcionan un promedio de ocho días por píxel de Land Surface Temperature and Emissivity (LST&E), con una resolución espacial de 1 km. Cada valor de píxel es un promedio simple de todos los píxeles perdidos (LST) de MOD11A1 correspondientes, recopilados dentro de un periodo de ocho días (LAADS DAAC, 2022).

Los archivos descargados se encuentran en formato de datos jerárquicos (HDF, por sus siglas en inglés), por lo que se utilizó el *software* ArcMap versión 10.5 para importar y procesar la información contenida en éstos. Las temperaturas están dadas en grados Fahrenheit (°F), por tanto, se transformaron a grados Celsius (°C), que es una unidad termométrica más utilizada en países como México. El proceso también incluyó la reproyección, extracción y clasificación de las imágenes en intervalos de 10 °C y se estableció como límite superior 50 °C, ya que a esta temperatura la vegetación difícilmente puede desarrollarse.

En el caso del EVI, el conjunto de datos se obtuvo de la misma plataforma que contiene los datos de TS, por lo que sus características y procesamiento son similares. El producto utilizado fue el MOD09A1G_EVI (MODIS/Terra Gap-Filled, Smoothed EVI 8-Day L4 500 m SIN Grid), que se calcula a partir de los productos de reflectancia de superficie MODIS (MOD09) y tiene una resolución espacial de 500 m. Fue creado para hacer que los productos MODIS para el Programa de Carbono de América del Norte (NACP) sean más accesibles y utilizables, simplificando el acceso a algunos de los productos de datos terrestres. El procedimiento contiene dos etapas de algoritmo, una para suavizar y otra para llenar espacios, las cuales intentan maximizar el uso de datos de alta calidad para reemplazar las observaciones faltantes o de mala calidad (LAADS DAAC, 2022). La clasificación del EVI para su representación se realizó en el rango establecido para el índice, con intervalos de 0.2 unidades.

Para la creación del ICA propuesto se utilizaron las variables descritas anteriormente, mismas que se relacionan con los procesos de combustión realizados en diferentes etapas de la zafra y que tienen efectos negativos en el ambiente, la agricultura o la salud humana (Boori *et al.*, 2021).

Se utilizó la técnica de superposición ponderada, que permite realizar evaluaciones multicriterio para resolver problemas de decisión en donde intervienen varios factores que, además, tendrán distintas valoraciones (GEASIG, 2021). Este análisis define el problema, divide el modelo en submodelos e identifica las capas de entrada. Cuando las capas de criterios de entrada están en sistemas de numeración distintos con rangos diferentes, la celda de cada criterio se reclasifica con una escala de preferencia común para combinarlas en un único análisis (Riad *et al.*, 2011).

Posteriormente, se construyó un operador booleano para cada uno de los niveles de calidad ambiental y se sobrepuso al padrón de superficie cañera obtenido a partir de la digitalización de la cartografía proporcionada por el 8° Informe Estadístico del Sector Agroindustrial de la Caña de Azúcar en México (Conadesuca, 2021), con el objetivo de evidenciar la correspondencia.

El uso de escalas ordinales es ampliamente utilizado para identificar la magnitud de las variables, pero no explica la distancia entre las mismas; es decir, no puede responder cuán diferentes son dos categorías. Se utilizan para medir frecuencia, importancia, satisfacción, probabilidad, calidad y experiencia, entre otros (Voxco, 2021).

Para esta investigación se creó una escala ordinal de cinco valores (lo cual es común en este tipo de escalas), donde el primer nivel es el mejor y el último es el peor. La representación de las áreas resultantes se hizo con una paleta de colores de fríos a cálidos en congruencia con las anteriores (Tabla 3).

Tabla 3. Ponderación para el índice de calidad (ICA) propuesto.

	Valor	ICA
	1	Muy Buena
	2	Buena
	3	Regular
	4	Mala
	5	Muy mala

Fuente: Elaboración propia.

Resultados

Con el análisis realizado se evidenció el incremento en las concentraciones de BC durante la temporada de zafra, con respecto a la de no zafra. Las concentraciones más elevadas se suscitaron durante el mes de enero de 2022, con niveles que superaron los $1.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en tanto que la más baja fue de $0.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$, durante la segunda quincena del mes de junio, al terminar la temporada de zafra. De forma general, las concentraciones fueron considerablemente más bajas (hasta a una tercera parte) en la temporada de no zafra, con respecto a la de zafra. A inicios del mes de julio se observa un ligero repunte que puede estar propiciado por la salida del producto procesado a los puntos de distribución, para posteriormente descender a niveles que no sobrepasan los $0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo los más bajos de todo el periodo (Figura 2).

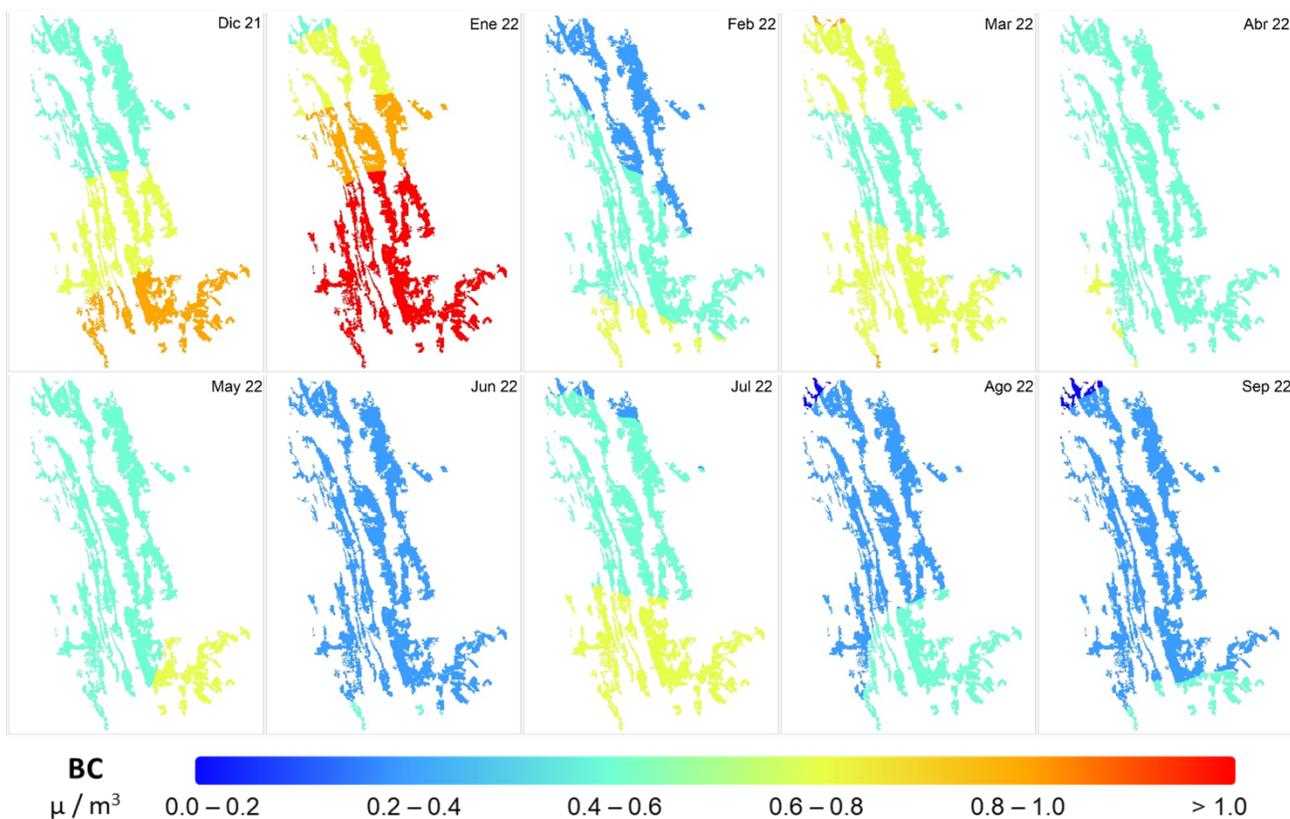


Figura 2. Carbono negro (BC) en la zona cañera de San Luis Potosí.
Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con Suárez *et al.* (2017), el albedo reduce cuando el BC se deposita en la nieve, ocasionando calentamiento y mayor fusión. La deposición de entre 100 ng y 300 ng de carbono negro por gramo de agua (ng-BC/g1-H₂O) puede reducir el albedo entre 2.7% y 6%, mientras que una reducción continua del albedo de entre 2% y 5.2% podría dar lugar a un incremento en la escorrentía de entre 70 mm y 204 mm, provocando el derretimiento de los polos e incrementando el nivel del océano.

En lo referente a los efectos en la salud humana, la OMS indica que la exposición de la población a 10 µg/m³ de BC, en el corto plazo, puede incrementar la mortalidad en 0.9% por enfermedades cardiovasculares, o en 0.7% por otro tipo de enfermedad, mientras que una exposición prolongada a 1 µg/m³ incrementaría en 6% el riesgo de muerte (Janssen *et al.*, 2012). Adicionalmente, Tobias *et al.* (2014) concluyeron que cada incremento de 1.4 µg/m³ de BC aumenta el riesgo de mortalidad respiratoria en 10%.

Por otra parte, el NBR mostró que la superficie cañera del estado se quema de forma escalada, a medida que avanza la zafra. Desde el mes de diciembre se pueden apreciar áreas con quemaduras de severidad baja, aunque con manchones que llegan a la severidad moderada-alta. El máximo de las quemaduras se realizó durante el mes de enero, cuando en la mayor parte de la superficie se aprecian quemaduras con severidad baja y en menor escala las de severidad mayor. Para los meses de mayo y junio, hacia el final de la zafra, se puede ver que las áreas quemadas durante los meses anteriores ya cuentan con rebrotes, y en septiembre se comienzan a suscitar quemaduras esporádicas, probablemente para preparar los terrenos para el próximo ciclo de cosecha (Figura 3).

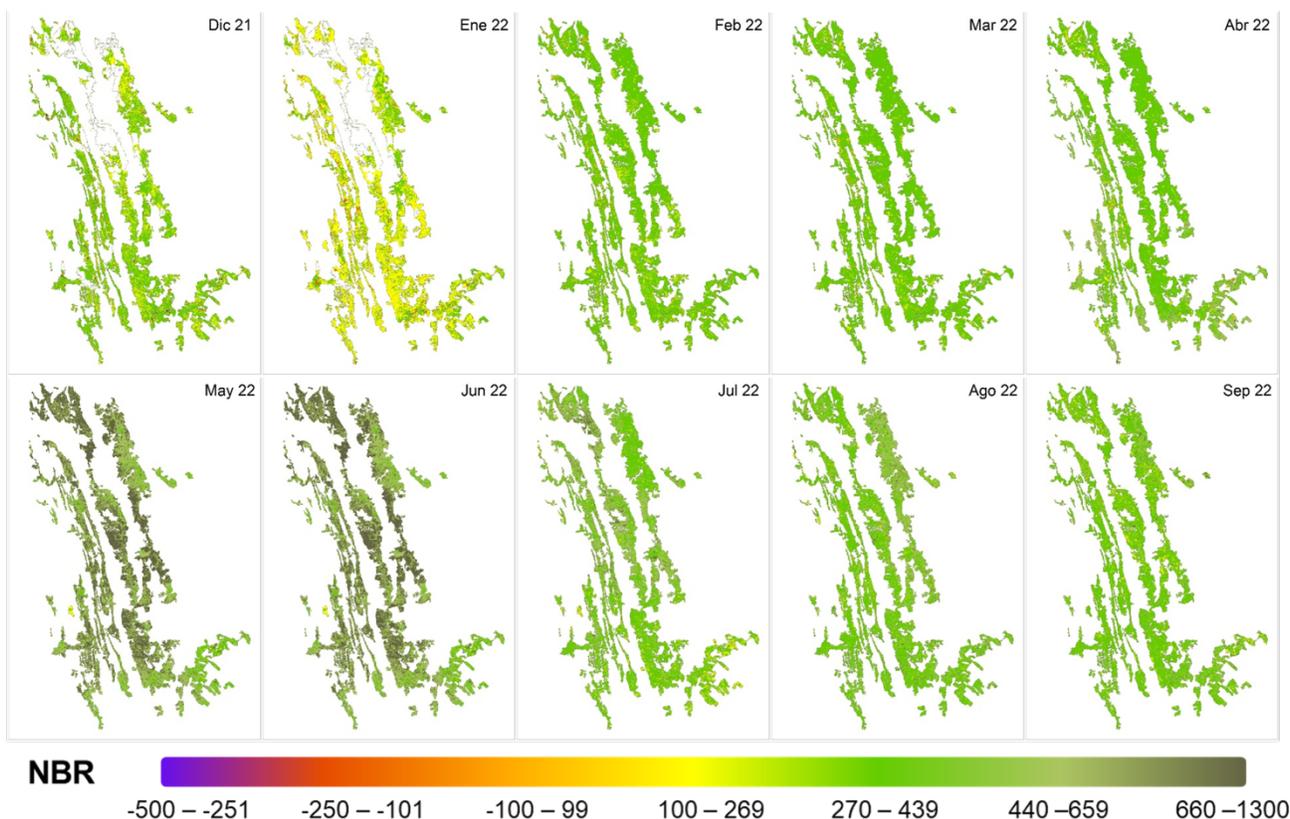


Figura 3. Índice normalizado de severidad de áreas quemadas (dnBR) en la zona cañera de San Luis Potosí.
Fuente: Elaboración propia.

Cuando se realizan quemas de baja severidad, algunas hojas de las plantas permanecen verdes aunque los tallos se quemen. La basura superficial, musgos y hierbas son carbonizadas o consumidas. La capa orgánica del suelo permanece intacta en su mayoría, con carbonización limitada a pocos milímetros de profundidad. En cambio, cuando la severidad de la quema va de lo moderado a lo severo, todas las plantas del sotobosque, las ramas finas muertas en la superficie y los troncos son carbonizados o consumidos y la capa orgánica del suelo es en gran parte consumida (Keeley, 2009).

En lo referente a la TS, las quemas propician su incremento, provocando que exista una relación directa entre esta variable y la época de la zafra, sin olvidar que la TS también está relacionada con las variaciones en la temperatura atmosférica. La menor TS media mensual se registró durante el mes de enero de 2021 y fue de 17 °C. Hasta la primera quincena del mes de febrero de 2022, las temperaturas se mantuvieron en rangos en los que la vegetación y los procesos edáficos se pueden desarrollar de forma adecuada; sin embargo, a partir de la segunda quincena de febrero, las temperaturas superaron los 36 °C en una importante proporción de la superficie de la zona. Para el mes de mayo de ese año, casi la totalidad de la superficie de la zona cañera reportó una temperatura máxima superior a los 51 °C, con una mínima de 30 °C.

A partir del mes de junio, la TS comenzó a descender, lo cual coincide con los cambios naturales de temperatura ambiente, pero también con el final de la zafra, por lo que para el mes de septiembre se vuelven a registrar TS más aptas para la vegetación y particularmente para la agricultura. En la mayoría de los meses hay un patrón de descenso de las temperaturas del suelo de este a oeste, probablemente por la influencia del incremento de la altitud de las formaciones de la Sierra Madre Oriental, lo que limita al oeste de la región cañera potosina (Figura 4).

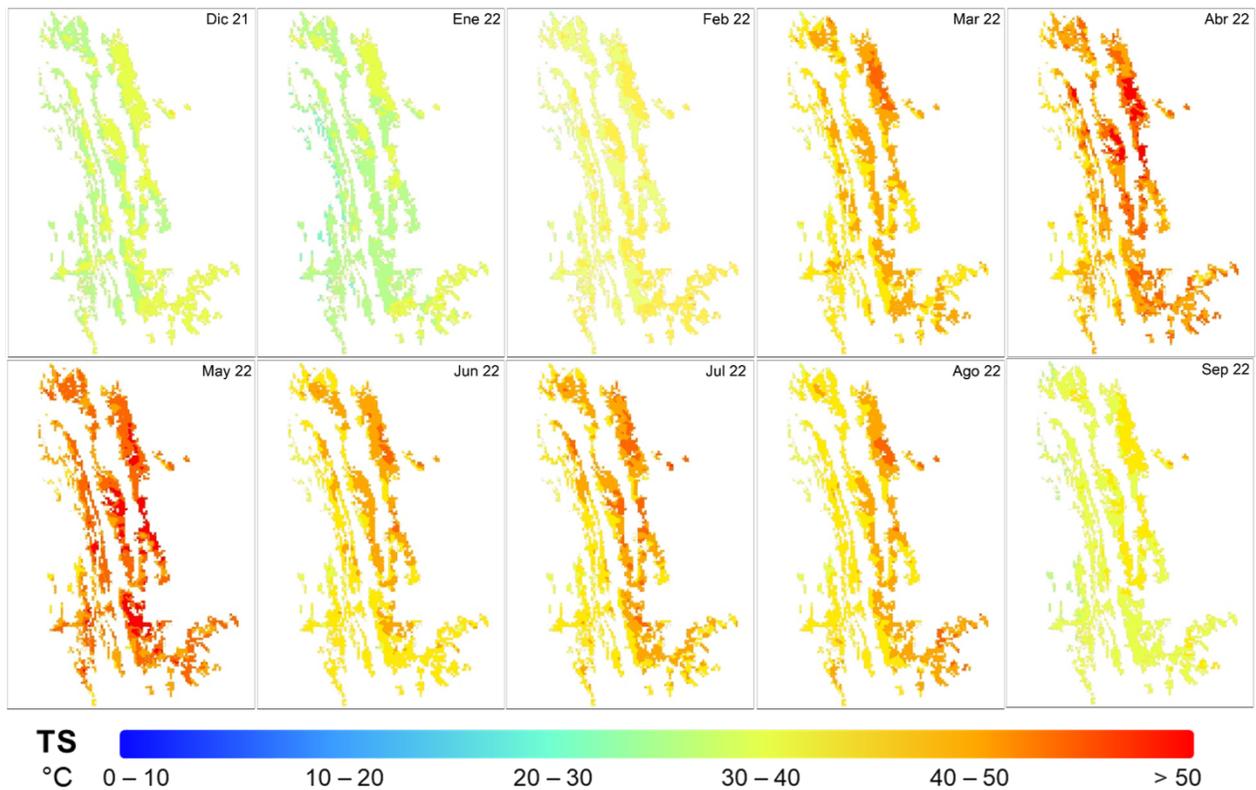


Figura 4. Temperatura del suelo (TS) en la zona cañera de San Luis Potosí.
Fuente: Elaboración propia.

Según de Celis *et al.* (2013), a partir de los 40 °C se detiene la actividad biológica y se frenan los procesos edafogénicos. La TS es particularmente importante en la agronomía, ya que afecta el desarrollo radicular de las plantas, la absorción de agua y nutrientes por parte de las raíces, la germinación de las semillas, los procesos de respiración de las raíces, así como los brotes de las yemas.

El EVI, otra de las variables analizadas, tiene un rango de valores de -1.0 a 1.0, en función de la reflectancia de la superficie del suelo. Aunque algunos autores han establecido que un EVI con valores entre 0.2 y 0.8 denotan una vegetación sana (EOS Data Analytics, 2023), en general se puede decir que una vegetación saludable muestra valores cercanos a 1.0, mientras que suelos completamente descubiertos o con vegetación muerta muestran valores de -1.0. Por lo tanto, existe una relación directa entre el valor del EVI y la salud de la vegetación (Vian *et al.*, 2018).

El EVI para la zona de estudio se mantuvo entre 0.2 y 0.4, a excepción de la parte noreste, en donde ya se habían realizado quemas. En los meses subsiguientes, los valores disminuyeron paulatinamente hasta el mes de junio, pero a partir de julio comenzaron a incrementarse nuevamente (durante la temporada de no zafra) hasta alcanzar valores que superan el 0.5. Durante el periodo de análisis, la zona de abasto del Ingenio Plan de Ayala mantuvo los menores valores y la zona de Alianza Popular los más altos (Figura 5).

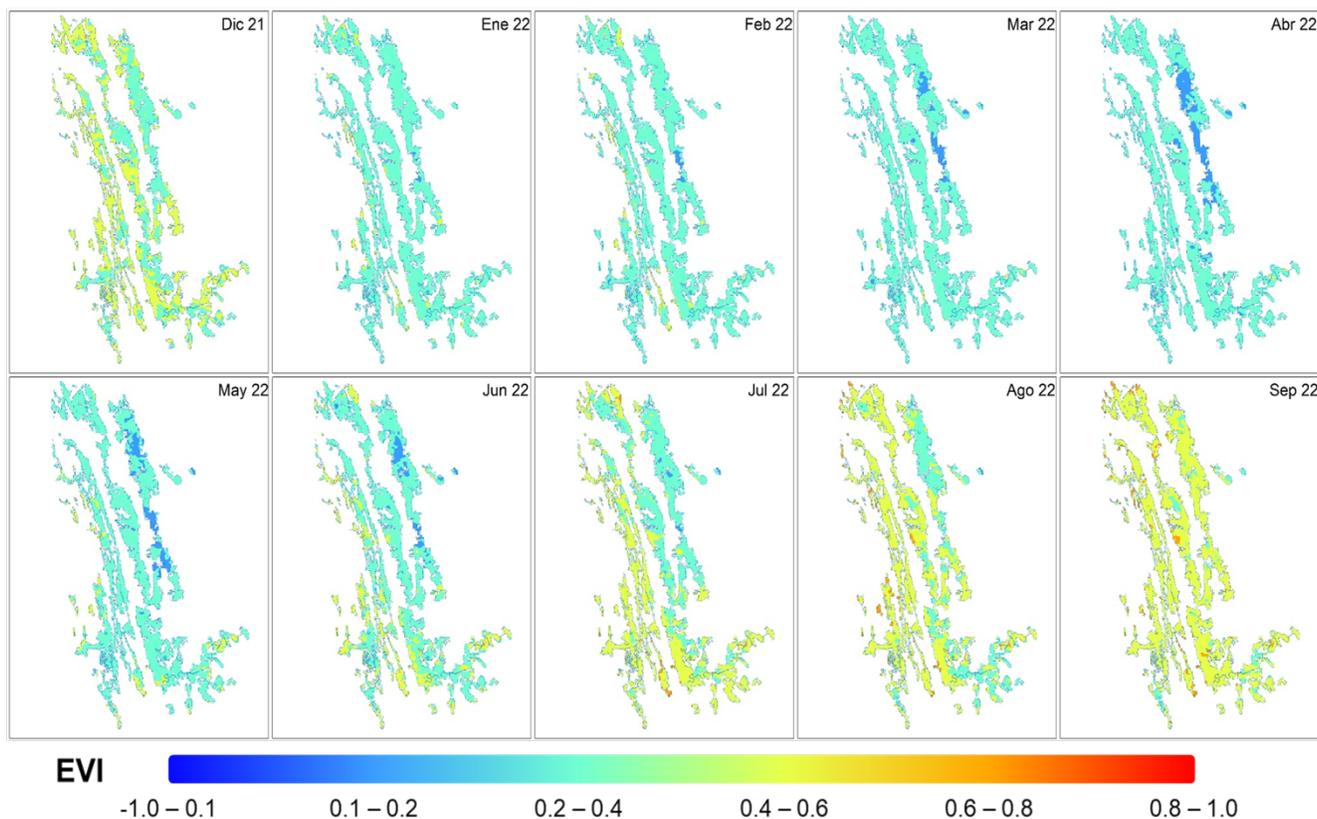


Figura 5. Índice de vegetación mejorado (EVI) en la zona cañera de San Luis Potosí.
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, las variables descritas están relacionadas con la actividad cañero-azucarera de San Luis Potosí, sobre todo durante la temporada de zafra. Por ello, se utilizaron para proponer un ICA que, a diferencia de otros, se enfoca en los efectos ambientales, productivos y de salud humana. La zafra 2021-2022 en San Luis Potosí al 100% de capacidad agroindustrial comenzó en el mes de diciembre de 2021, y el pico de producción se ubicó en el mes de enero de 2022, para después comenzar a descender de forma paulatina hasta el final de la zafra (15 de junio de 2022) (Unión Nacional de Cañeros A. C., 2022).

Se encontró que, durante el mes de diciembre de 2021, el ICA predominante en la zona cañera de San Luis Potosí fue regular; no obstante, se encontraron algunas zonas con un ICA bueno en el Ingenio San Miguel del Naranjo, así como pequeños manchones en donde el ICA llegó a ser malo en los Ingenios Plan de Ayala y Alianza Popular.

Asimismo, durante el mes de enero de 2022, los Ingenios Plan de Ayala de Ciudad Valles y Alianza Popular de Tamasopo mostraron mala calidad ambiental prácticamente en toda su superficie, incluso alcanzando en algunas partes la peor categoría de ICA.

El Ingenio Plan de San Luis de Ciudad Valles mostró una transición entre una calidad ambiental de mala a regular, mientras que la mayor parte del Ingenio San Miguel del Naranjo en el municipio del Naranjo mantuvo su calidad ambiental en estatus de regular durante el mismo mes (enero de 2022).

Durante los siguientes tres meses la calidad ambiental comenzó a mejorar para llegar a ser buena prácticamente en toda la zona cañera, a partir del mes de abril de 2022, manteniendo la característica de ser peor en la parte sur y mejorar gradualmente hacia el norte.

Para el mes de junio, cuando concluyó la zafra y durante los meses subsecuentes, se mantuvo una calidad ambiental buena en la mayor parte de la superficie, alcanzando a ser muy buena en varias zonas (Figura 6).

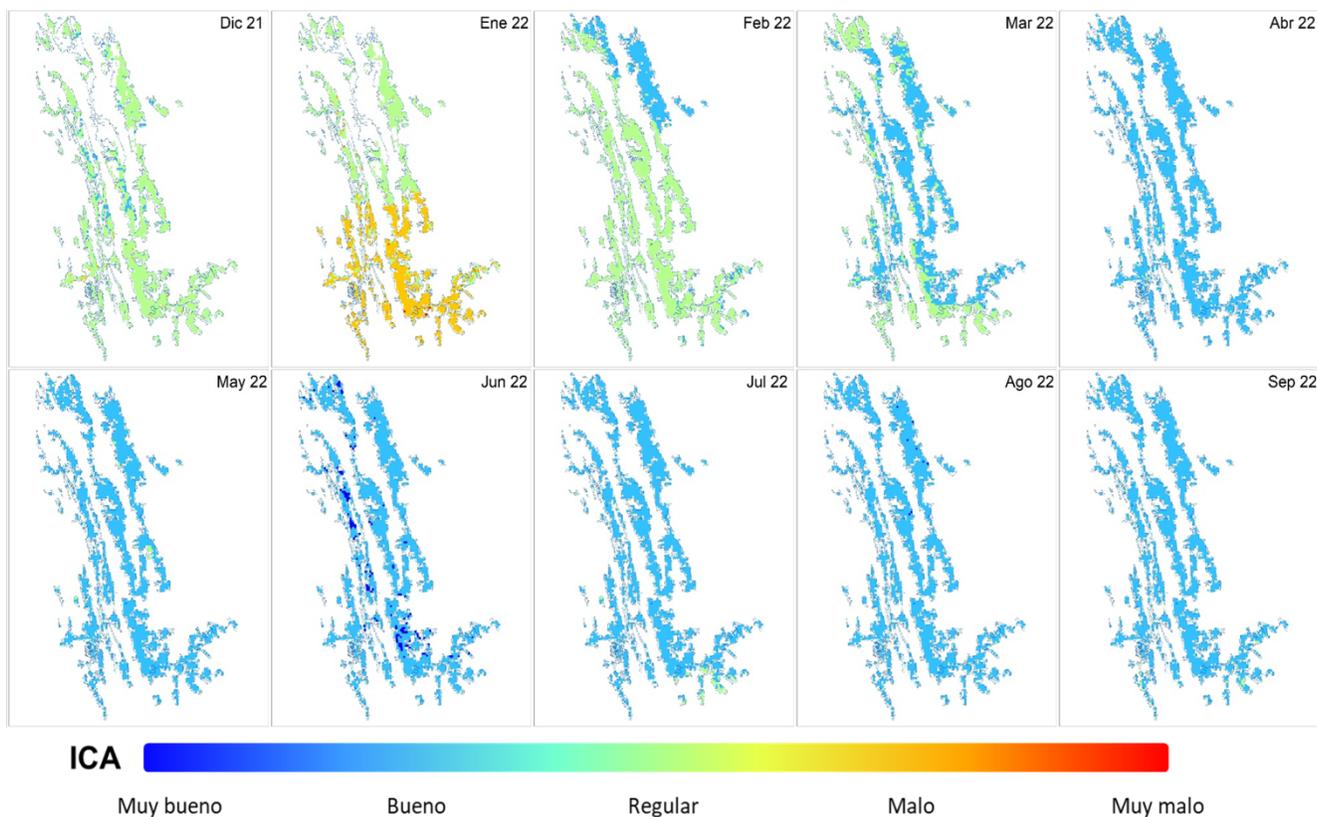


Figura 6. Índice de calidad (ICA) propuesto para superficies cañeras, aplicado a la zona cañera de San Luis Potosí.
Fuente: Elaboración propia.

Discusión

Habitualmente, el monitoreo de contaminantes del aire se realiza solo en las grandes ciudades y en países en donde se cuenta con extensas redes de estaciones de monitoreo directo, descuidando las zonas rurales y agrobiudades en donde algunas actividades también son causantes de altas emisiones. El uso de tecnologías de vanguardia como la satelital permiten el monitoreo de estos contaminantes (como el BC), además de otros indicadores de la atmósfera, en superficies extensas, en tiempo cuasi real y a bajo costo. Ello permite mejorar la certidumbre en la estimación de la afectación de las actividades naturales y antropogénicas en el ambiente y la salud humana, así como coadyuvar en políticas enfocadas en la reducción de las emisiones generadas.

Además, con el procesamiento de las imágenes de satélite se pueden crear índices que, mediante la identificación de la afectación de más servicios ecosistémicos como el calentamiento global, la salud humana o la productividad agrícola, determinen la calidad ambiental. Los ICA se pueden construir con variables relacionadas con actividades antropogénicas como la producción e industrialización de caña de azúcar.

Es conveniente mencionar que, en una escala ordinal, el orden de las opciones de respuesta es el aspecto más importante y no la cuantificación de la diferencia en los niveles, ya que ésta es relativa. En este caso, la categorización de cada variable tuvo criterios específicos, como en la temperatura del suelo, que obedeció al efecto sobre la vegetación y en el NBR, en donde se tomó de la escala de USGS. La reclasificación para el ICA constó de una escala simétrica en donde los valores ascendentes de cada variable se acomodaron de mejor a peor o viceversa, de acuerdo con su efecto.

Un ICA en escala ordinal permite visualizar geográficamente las diferencias espaciales y temporales en la calidad ambiental, en base a las variables incluidas, entendiendo que es una estimación de los efectos conjugados de las mismas, ya que la cuantificación exacta de los efectos es complicada debido a la naturaleza y escalas de cada variable, por ejemplo, los °C de la TS y las unidades adimensionales del EVI y el NBR.

Con el análisis realizado se pudo constatar que las variables incluidas en el ICA propuesto están influenciadas por la temporada de zafra. De esta forma, durante el mes de enero de 2022, cuando se alcanzó el pleno de la cosecha de la caña de azúcar y su procesamiento en San Luis Potosí, también se tuvieron los niveles más altos de BC y NBR y los más bajos de EVI.

Asimismo, se observó que durante el resto de los meses que duró la zafra, el ICA no rebasó el nivel de regular y se incrementó hasta llegar a niveles buenos, posterior a su culminación. En el mismo sentido, se puede apreciar una diferencia entre el ICA de las áreas de abasto de los diferentes ingenios, lo que está relacionado con las características de los distintos procesos agrícolas y agroindustriales, como el método de cosecha, las características de la maquinaria y equipo y el uso de aditamentos para reducir emisiones, entre otros.

En esta investigación se desarrolló un ICA que contiene factores que afectan el ambiente, la agricultura y la salud humana. Derivado de los resultados obtenidos, se considera relevante realizar investigaciones posteriores en donde se experimente con más indicadores, se varíen los pesos asignados a cada variable y se extienda el periodo de análisis para observar y analizar las variaciones espaciotemporales.

Se podría considerar el ICA desarrollado como exploratorio, ya que para robustecer la validez de sus resultados habría que incluir más áreas, un análisis de más tiempo, así como identificar e incluir más variables que contribuyan a la determinación del índice. No obstante, su principal aportación lo constituye la propuesta metodológica que puede sentar el precedente para sistemas de vigilancia que coadyuven en la creación o adecuación de políticas ambientales enfocadas a la reducción de las emisiones de la actividad cañero-azucarera en el estado y el país.

Conclusiones

El desarrollo tecnológico permite que actualmente se pueda realizar el monitoreo de la calidad ambiental en zonas donde habitualmente no se realizaba, por su complejidad y altos costos. Con el monitoreo continuo se pueden construir sistemas de vigilancia accesibles y oportunos que coadyuven en la calidad del ambiente, especialmente en zonas en donde se desarrollan actividades de alto impacto para los sistemas productivos, para la salud humana y, en general, para el ambiente. Un ejemplo lo constituyen las zonas en donde se produce e industrializa la caña de azúcar, como la del estado de San Luis Potosí, en donde varias de sus actividades, particularmente las realizadas durante la temporada de zafra, ocasionan efectos altamente nocivos.

El BC, segundo precursor del calentamiento global, y uno de los principales indicadores de la calidad del aire para la salud humana, es un claro ejemplo de cómo la actividad cañero-azucarera está relacionada con la contaminación del aire; además, otros recursos como el suelo y el agua también se ven afectados, lo que se comprobó con un índice de calidad ambiental que muestra que, durante la temporada de zafra, la calidad ambiental de la zona empeora. Por lo anterior, se considera que la adopción y masificación en el uso de tecnologías de vanguardia, como la satelital, constituyen una herramienta importante para crear y dar seguimiento a medidas enfocadas en la mitigación de las problemáticas ambientales actuales.

El ICA desarrollado es un buen punto de partida para investigaciones posteriores que amplíen la profundidad del análisis desde todos los puntos de vista para robustecer la validez de los resultados. Se espera que el ICA se convirtiera en una sólida herramienta de información que proporcione elementos confiables para los tomadores de decisiones en la creación de mecanismos que coadyuven en la reducción de emisiones de diferentes actividades económicas, las cuales tradicionalmente no han sido consideradas en las agendas ambientales estatales y nacionales.

Agradecimientos

Se agradece el financiamiento de esta investigación al Fondo Sectorial de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación en Actividades Espaciales CONACYT-AEM 2018 propuesta B-S-64363, a través del proyecto denominado "Modelo de innovación para la identificación y monitoreo de contaminantes atmosféricos a través de tecnología espacial".

Conflicto de interés

Los autores del presente manuscrito declaramos que no tenemos ningún tipo de conflicto de interés financiero, personal o profesional que pudiera haber interferido con la objetividad de los resultados, el análisis y las conclusiones emitidos en el presente trabajo de investigación.

Referencias

- Agricultura Puebla (13 de noviembre de 2018). *Inicia temporada de zafra en Puebla*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/agricultura/puebla/articulos/inicia-temporada-de-zafra-en-puebla?idiom=es>
- Boori, M. S., Choudhary, K., Paringer, R., & Kupriyanov, A. (2021). Eco-environmental quality assessment based on pressure-state-response framework by remote sensing and GIS. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 23, 100530. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100530>
- Bové, H., Bongaerts, E., Slenders, E., Bijmens, E. M., Saenen, N. D., Gyselaers, W., Van Eyken, P., Plusquin, M., Roeffaers, M. B. J., Ameloot, M., & Nawrot, T. S. (2019). Ambient black carbon particles reach the fetal side of human placenta. *Nature Communications*, 10, 3866. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11654-3>
- Burroughs-Peña, M. S., & Rollins, A. (2017). Environmental exposures and cardiovascular disease. *Cardiology Clinics*, 35(1), 71-86. <https://doi.org/10.1016/j.ccl.2016.09.001>
- Casares-Long, J. J., Longhurst, J. W. S., & Barnes, J. (2020). *Air Pollution XXVIII (Wit Transactions on Ecology and the Environment, Vol 244)*. WIT Press.
- Cardoso, T. F., Watanabe, M. D. B., Souza, A., Chagas, M. F., Cavalett, O., Morais, E. R., Nogueira, L. A. H., Leal, M. R. L. V., Braunbeck, O. A., Cortez, L. A. B., & Bonomi, A. (2017). Economic, environmental, and social impacts of different sugarcane production systems. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 12(1), 68-82. <https://doi.org/10.1002/bbb.1829>
- Chaudhuri, I., Fruittier-Pölloth, C., Ngiewih, Y., & Levy, L. (2017). Evaluating the evidence on genotoxicity and reproductive toxicity of carbon black: a critical review. *Critical Reviews in Toxicology*, 48(2), 143-169. <https://doi.org/10.1080/10408444.2017.1391746>

- Comisión Ambiental de la Megalópolis. (21 de septiembre de 2018). *IMECA: Índice Metropolitano de la Calidad del Aire*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/comisionambiental/articulos/imeca-indice-metropolitano-de-la-calidad-del-aire?idiom=es>
- Comisión Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (Conadesuca). (13 de octubre de 2021). *8° Informe Estadístico del Sector Agroindustrial de la Caña de Azúcar en México*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conadesuca/es/articulos/8-informe-estadistico-del-sector-agroindustrial-de-la-cana-de-azucar-en-mexico?idiom=es>
- Comisión Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (Conadesuca). (2022). *Sistema Sinfocaña*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conadesuca/acciones-y-programas/sistema-infocana>
- Davis, Z., de Groh, M., & Rainham, D. G. (2022). The Canadian Environmental Quality Index (Can-EQI): Development and calculation of an index to assess spatial variation of environmental quality in Canada's 30 largest cities. *Environment International*, 170, 107633. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107633>
- de Celis, R., Jordán-López, A., & Martínez-Zavala, L. M. (2013). Efectos del fuego en las propiedades biológicas, físicas y químicas del suelo. En *Grandes incendios florestais, erosão, degradação e medidas de recuperação dos solos* (pp. 145-160). António Bento Gonçalves. <https://idus.us.es/handle/11441/53599>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2012). NORMA Oficial Mexicana NOM-156-SEMARNAT-2012, *Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5259464&fecha=16/07/2012#gs.c.tab=0
- Dobbie, M. J., & Dail, D. (2014). Environmental Indices. *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*. <https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat07691>
- Earth Data. (2015). *MERRA-2 tavg1_2d_aer_Nx: 2d,1-Hourly,Time-averaged,Single-Level,Assimilation (Aerosol Diagnostics V5.12.4)* [Conjunto de datos]. <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>
- EOS Data Analytics. (6 de enero de 2023). *Vegetation indices to drive digital agri solutions*. <https://eos.com/blog/vegetation-indices/>
- EOS Data Analytics. (30 de enero de 2023). *Soil temperature as a factor of crops development*. <https://eos.com/blog/soil-temperature/>
- GEASIG. (24 de mayo de 2021). *Superposición Ponderada con ArcGIS*. <https://www.geasig.com/superposicion-ponderada-con-arcgis/>
- Gobierno de la Ciudad de México. (15 de diciembre de 2022). *Calidad del aire*. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2022). *Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire*. <https://sinaica.inecc.gob.mx/index.php>
- IQAir. (20 de diciembre de 2022). *Calidad del aire en Buenos Aires. Índice de la calidad del aire (ICA) de Buenos Aires y contaminación del aire en Argentina*. <https://www.iqair.com/es/argentina/buenos-aires>
- Janssen, N. A. H., Gerlofs-Nijland, M. E., Lanki, T., O Salonen, R., Cassee, F., Hoek, G., Fisher, P., Brunekreef, B., & Kryzanowski, M. (2012). *Health effects of black carbon*. World Health Organization, Regional Office for Europe. https://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0004/162535/e96541.pdf
- Jian, Y., Wu, C. Y. H., & Gohlke, J. M. (2017). Effect modification by environmental quality on the association between heatwaves and mortality in Alabama, United States. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(10), 1143. <https://doi.org/10.3390/ijerph14101143>
- Keeley, J. E. (2009). Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*, 18(1), 116. <https://doi.org/10.1071/wf07049>
- LAADS DAAC. (2022). *Terra Land Surface Temperature/3-Band Emissivity 8-Day L3 Global 1km SIN Grid* [Conjunto de datos]. <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>
- Liu, X., Zheng, M., Liu, Y., Jin, Y., Liu, J., Zhang, B., Yang, X., Wu, Y., Zhang, T., Xiang, Y., Liu, B., & Yan, C. (2022). Intercomparison of equivalent black carbon (eBC) and elemental carbon (EC) concentrations with three-year continuous measurement in Beijing, China. *Environmental Research*, 209, 112791. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112791>

- Ma, H., Zeng, J., Zhang, X., Fu, P., Zheng, D., Wigneron, J. P., Chen, N., & Niyogi, D. (2021). Evaluation of six satellite- and model-based surface soil temperature datasets using global ground-based observations. *Remote Sensing of Environment*, 264, 112605. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112605>
- Mancini, S., Guida, M., Graziuso, G., Quartieri, J., & Guarnaccia, C. (2020). Development of an environmental quality index to assess physical agents pollution. *Journal of Physics: Conference Series*, 1603(1), 012005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1603/1/012005>
- Messer, L. C., Jagai, J. S., Rappazzo, K. M., & Lobdell, D. T. (2014). Construction of an environmental quality index for public health research. *Environmental Health*, 13(1). <https://doi.org/10.1186/1476-069x-13-39>
- Moitinho, M. R., Ferraudo, A. S., Panosso, A. R., Da Silva Bicalho, E., De Bortoli Teixeira, D., De Andrade Barbosa, M., Tsai, S. M., Borges, B. M. F., De Souza Cannavan, F., De Souza, J. A. M., & La Scala, N. (2021). Effects of burned and unburned sugarcane harvesting systems on soil CO₂ emission and soil physical, chemical, and microbiological attributes. *Catena*, 196, 104903. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104903>
- Mordukhovich, I., Wilker, E., Suh, H., Wright, R., Sparrow, D., Vokonas, P. S., & Schwartz, J. (2009). Black carbon exposure, oxidative stress genes, and blood pressure in a repeated-measures study. *Environmental Health Perspectives*, 117(11), 1767-1772. <https://doi.org/10.1289/ehp.0900591>
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2022a). *Earth data. Giovanni: the bridge between data and science v 4.38*. <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2022b). *Earth data. GES DISC*. <https://daac.gsfc.nasa.gov/datasets?page=1&measurement=Black%20Carbon>
- Observatorio Ambiental de Cartagena de Indias. (2015). *Índice de la calidad del aire*. <https://observatorio.epacartagena.gov.co/gestion-ambiental/calidad-ambiental/sistema-urbano/indice-de-la-calidad-del-aire/>
- Oliveira, L. M. L., & Rodrigues, J. J. P. C. (2011). Wireless sensor networks: a Survey on environmental monitoring. *Journal of Communications*, 6(2), 143-151. [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=c2a96d4cf3738470a7ac59af44d5274806b62362](https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=c2a96d4cf3738470a7ac59af44d5274806b62362)
- Onwuka, B., & Mang, B. (2018). Effects of soil temperature on some soil properties and plant growth. *Advances in Plants & Agriculture Research*, 8(1), 34-37. <https://doi.org/10.15406/apar.2018.08.00288>
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA). (3 de junio de 2017). *Monitoreo ambiental*. <https://www.oefa.gob.pe/monitoreo-ambiental-2/ocac02/>
- Paunescu, A. C., Casas, M., Ferrero, A., Pañella, P., Bougas, N., Beydon, N., Just, J., Lezmi, G., Sunyer, J., Ballester, F., & Momas, I. (2019). Associations of black carbon with lung function and airway inflammation in schoolchildren. *Environment International*, 131, 104984. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104984>
- Riad, P. H. S., Billib, M., Hassan, A. A., Salam, M. A., & El Din, M. N. (2011). Application of the overlay weighted model and boolean logic to determine the best locations for artificial recharge of groundwater. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 5(2), 57-66. <https://doi.org/10.4090/juee.2011.v5n2.057066>
- Ruiz-Villavicencio, E., López-López, M. A., Cetina-Alcalá, V. M., & Ramírez-Guzmán, M. E. (2020). Modelación y estimación de NO₂ y O₃ en zonas rurales y suburbanas del Valle de México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36(3), 745-754. <https://doi.org/10.20937/rica.53548>
- Secretaría de Medio Ambiente. (21 de diciembre de 2022). *Mapa Calidad del Aire*. AIRE NL.GOB.MX. http://aire.nl.gob.mx/map_calidad.html
- Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial (Semadet). (20 de diciembre de 2022). *Calidad del Aire AMG*. <https://aire.jalisco.gob.mx/mapaf2019>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (18 de abril de 2018). *Calidad del aire, el desafío de las grandes urbes*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/calidad-del-aire-el-desafio-de-las-grandes-urbes>
- Sharma, A. (22 de septiembre de 2020). *Enhanced Vegetation Index (EVI) and its significance in agriculture monitoring*. Satyukt Analytics Private Limited. <https://satyukt.medium.com/enhanced-vegetation-index-evi-and-its-significance-in-agriculture-monitoring-6d9a6c3e71c0>

- Silva, L. T., & Mendes, J. F. G. (2012). City Noise-Air: an environmental quality index for cities. *Sustainable Cities and Society*, 4, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2012.03.001>
- SkyWatch. (17 de Agosto de 2022). *Top 9 free sources of satellite data [2022 Update]*. <https://skywatch.com/free-sources-of-satellite-data/>
- Suárez, L., Torres, C., Helmig, D., & Hueber, J. (2017). Medición y análisis del aerosol de carbono negro en el observatorio de Huancayo, Perú. *Revista Boliviana de Física*, 30(30), 7-15. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S1562-38232017000100003&script=sci_arttext
- Tobias, A., Karanasiou, A., Reche, C., Amato, F., Alastuey, A. y Querol, X. (2014). Effects of black carbon on respiratory health in the city of Barcelona. *European Respiratory Journal*, 44, 2923. https://erj.ersjournals.com/content/44/Suppl_58/2923
- Unión Nacional de Cañeros, A. C. (2022). *Estadística Actual: CONCLUYE ZAFRA 2021/22* [Conjunto de datos]. <http://caneros.org.mx/estadistica-actual/>
- United Nations (UN). (2018). *Normalized Burn Ratio (NBR)*. UN-SPIDER Knowledge Portal. <https://un-spider.org/advisory-support/recommended-practices/recommended-practice-burn-severity/in-detail/normalized-burn-ratio>
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (6 de junio de 2022). *Environmental Quality Index (EQI)*. <https://www.epa.gov/healthresearch/environmental-quality-index-eqi>
- Vian, A. L., Bredemeier, C., Silva, P. R. F. D., Santi, A. L., Silva, C. P. G. D., & Santos, F. L. D. (2018). Limites críticos de NDVI para estimativa do potencial produtivo do milho. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 17(1), 91. <https://doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v17n1p91-100>
- Voxco. (19 de agosto de 2021). *Ordinal Scale: Definition, Characteristics, & Uses*. <https://www.voxco.com/blog/ordinal-scale/#:~:text=The%20Ordinal%20scale%20includes%20statistical,higher%20or%20lower%20in%20scale>
- Wolf, M., Emerson, J., Esty, D., De Sherbinin, A., & Wendling, Z. (2022). Environmental Performance Index. EPI. <https://epi.yale.edu/>
- Yáñez-Narváez, A. I. (24 de noviembre de 2022). *Monitoreo ambiental*. Economipedia. <https://economipedia.com/definiciones/monitoreo-ambiental.html>
- Yong, M., Anderle, L., Levy, L., & McCunney, R. J. (2019). Carbon black and lung cancer mortality—A meta-regression analysis based on three occupational cohort studies. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 61(11), 949-00. <https://doi.org/10.1097/jom.0000000000001713>