

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA, UNIDAD XOCHIMILCO

División de Ciencias Biológicas y de la Salud, Unidad Xochimilco
Departamento de producción agrícola y animal

Licenciatura en Agronomía

Informe final de servicio social

“Uso de SIG para la detección de suelos agrícolas salinos en la CDMX, vinculado con la sostenibilidad alimentaria, Proyecto CASA”

Prestador de servicio social

María Nohemí Rosales García
Matricula: 2182029823



Asesor Interno
Dra. Mariela Hada Fuentes Ponce
Número económico: 34017



Asesor Interno
Dr. Cristián Reyna Ramírez
Número económico: 44066



Lugar de prestación de servicio:

Centro de cómputo en sistemas de información geográfica y agricultura de precisión,
UAM - X. Calzada del Hueso 1100, Col. Villa Quietud, Coyoacán, C.P. 04960,
Ciudad de México.

Fecha de Inicio y conclusión:

Del 5 de agosto de 2024 al 5 de febrero de 2025

Desarrollado en el proyecto: “Soberanía alimentaria: Sistema agroalimentario sostenible para la Ciudad de México” CASA-UAM Centro articulador para la sostenibilidad alimentaria (SECTEI/010/2024), Objetivos específicos: OE1 y OE2 i) Mapas generados con imágenes de satelitales y con drones sobre el uso del suelo de conservación de 2018 a 2024.

Introducción

La Ciudad de México cuenta con 88,442 hectáreas que conforman el suelo de conservación de gran diversidad biológica y cultural, más de la mitad de la superficie conforma el Suelo de Conservación (SC), este uso representa el 59% del territorio de la Ciudad de México, distribuido en 9 alcaldías bajo el esquema de propiedad social (Ibarra, 2021). El SC está compuesto por 38,252 hectáreas de bosque, 500 hectáreas de matorrales y 28,599 hectáreas de uso agropecuario (CDHCM, 2019). La superficie agrícola comprende 27% de su territorio, y alberga también, diversos sistemas de producción, donde su objetivo de producción va desde el autoconsumo hasta la venta (INEGI, 2023). La actividad agrícola se encuentra principalmente en las alcaldías Cuajimalpa, Iztapalapa, Magdalena Contreras, Milpa Alta, Álvaro Obregón, Tláhuac, Tlalpan y Xochimilco (CDHCM, 2019).

En el contexto urbano los agroecosistemas tienen un papel fundamental, las actividades agrícolas mantienen cierta importancia para la población local, tanto en términos de autosuficiencia y generación de ingresos, como en términos culturales y de servicios ecosistémicos. De esta forma, la soberanía alimentaria busca la autonomía de los pueblos en la producción de alimentos privilegiando y protegiendo la producción local de las prácticas negativas de los mercados internacionales favoreciendo las condiciones generales de los pequeños agricultores (FAO, 2012; Vía Campesina, 2018).

En la Ciudad de México, los agroecosistemas del suelo de conservación proveen alimentos y al mismo tiempo servicios ecosistémicos. Es así que, estos sistemas no solo proporcionan recursos naturales esenciales para la supervivencia humana, sino que también mantienen la biodiversidad y regulan el clima. Sin embargo, existen diversos problemas en estos agroecosistemas, la salinidad del suelo es un problema que presentan estos a nivel mundial, que amenaza el crecimiento y rendimiento de los cultivos e impide el desarrollo sostenible de la agricultura, los cultivos básicos no pueden completar su ciclo de vida cuando las concentraciones de NaCl en el suelo superan los 200 mM (De la Cruz, et. al., 2023).

La salinización de los suelos consiste en la acumulación de sales solubles (cloruros, sulfatos, carbonatos, bicarbonatos de potasio, magnesio, calcio y sodio). Cuando estas sales entran en contacto con el medio acuoso, se disuelven y son transportadas a otros lugares; posteriormente con la evaporación o percolación del agua que las transporta, las sales recrystalizan y se depositan en el suelo (Padilla, 2017). La mayoría de los suelos afectados por elevadas concentraciones de sales se clasifican como Solonchakz (FAO, 2024). Su conductividad eléctrica (CE), en el extracto de saturación es mayor a 4 dSm⁻¹ a 25°C con un porcentaje de sodio intercambiable menor de 15. Estos valores, influyen en la presión osmótica, con repercusiones sobre la vegetación, interfiriendo en el crecimiento de la mayoría de los cultivos (Mata et. al., 2014), afectando la asimilación de nutrientes por las plantas y la actividad microbiana en el suelo (FAO, 2024).

Esta salinidad restringe las actividades agrícolas, sin importar el tamaño de las tierras, ya que disminuye la capacidad productiva de los suelos y el rendimiento de los cultivos, afectando la calidad ecológica del medio ambiente. Las plantas pueden ser tolerantes a la

salinidad del suelo (alofitas), pero también dependen de algunas propiedades como textura, conductividad eléctrica, pH, entre otros (Delgado, C., et al., 2022). La salinidad es un ejemplo de degradación de los suelos, que presentan cambios significativos en su comportamiento fisicoquímico (Mata et al., 2014).

En la Ciudad de México, específicamente en la zona lacustre de la alcaldía Tláhuac la salinidad del suelo ha estado presente a través del tiempo. Estos suelos salino-sódicos interfieren en el crecimiento y la calidad de las plantas, además, son una limitante para la producción agrícola. Por ello, es importante buscar alternativas de evaluación más eficientes que permitan implementar estrategias adecuadas que mejoren la productividad de los cultivos y a su vez, entender el efecto y monitoreo de la salinidad.

Tradicionalmente, la salinidad del suelo se ha medido a través de muestras colectadas en el terreno o mediante plantas indicadoras de salinidad. Sin embargo, actualmente se utilizan datos de reflectancia obtenidos por percepción remota debido a su resolución espacial, temporal y radiométrica. Obtener indicadores de la salinidad del suelo a través de las imágenes de satélite o drones requieren menos tiempo, ya que las imágenes se toman a intervalos regulares sin interrupción, permitiendo derivar indicadores rápidos de la condición de salinidad del suelo a escala de píxel que puede ser hasta en mm o cm su resolución (Rodríguez, et al., 2016).

La teledetección utiliza la energía electromagnética reflejada por los objetivos para obtener información sobre la superficie terrestre. Dado que la salinidad afecta a la vegetación, la reflectancia detectada remotamente se usa como un indicador indirecto de la salinidad (Allbed et al., 2014). Los datos obtenidos se procesan con Sistemas de Información Geográfica (SIG), lo que permite calcular diversos índices espectrales como indicadores (Olivares, 2019; Revelo, 2020).

La vegetación saludable tiene una baja reflectancia en la región visible debido a la absorción por la clorofila, que se utiliza para la fotosíntesis, y una alta reflectancia en la región del infrarrojo cercano (NIR) debido a la estructura celular de las hojas de las plantas. Por el contrario, la vegetación no saludable tiene menos clorofila y, por lo tanto, muestra una mayor reflectancia en la región visible y una menor reflectancia en la región del infrarrojo cercano (Allbed, et. al., 2014).

Un ejemplo destacado es este estudio es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), utilizado para evaluar el estado de la vegetación. Este índice se basa en la diferencia entre la máxima absorción de radiación en la banda roja y la máxima reflexión en la banda infrarroja cercana. Los valores del NDVI oscilan entre -1.0 y 1.0, donde los valores más altos indican vegetación densa y saludable (INEGI, 2024).

Por otro lado, los suelos afectados por sales reflejan más luz en el espectro visible (0.45-0.68 μm) que los suelos normales, lo cual es útil para diferenciarlos. Las tierras salinas presentan una alta reflectancia espectral en la ventana visible, especialmente en los rangos azul y rojo del espectro (Rastoskuev & Shiozawa, 2005).

Como alternativa a los intervalos de clase, para categorizar la salinidad en el suelo, se han propuesto los siguientes intervalos: < 16 dSm⁻¹, moderadamente salino; dSm⁻¹, salino; >20 dS m⁻¹, altamente salino (Rodríguez, et al., 2016). En consecuencia, varios estudios han evaluado la salinidad del suelo con la reflectancia de la vegetación utilizando una variedad de índices de vegetación. Además, se han desarrollado varios índices espectrales de salinidad del suelo para detectar y mapear depósitos de sales (Allbed, et. al., 2014).

Por lo anterior, el principal objetivo de este proyecto fue evaluar y monitorear la salinidad de los suelos agrícolas en las parcelas pertenecientes al suelo de conservación de la alcaldía Tláhuac, utilizando herramientas SIG y con estudios de laboratorio. Esto para determinar si los datos de salinidad obtenidos por técnicas de laboratorio convencionales tienen una correlación significativa con los índices espectrales, lo que permitiría medir la cantidad de sales presentes en el suelo.

Objetivo general

Este proyecto tuvo como objetivo principal desarrollar habilidades y capacidades para evaluar y monitorear la salinidad de los suelos en la zona de Tláhuac, área de suelo de conservación de la Ciudad de México, para proponer estrategias y recomendaciones que mejoren el desarrollo sostenible y el fortalecimiento de los sistemas agroalimentarios en el marco del proyecto CASA.

Objetivos específicos

- Toma de fotografías utilizando cámaras multiespectrales del dron para la creación de ortomosaicos.
- Análisis del ortomosaicos para la clasificación del uso del suelo y los cultivos presentes en la zona de estudio.
- Cálculo del NDVI, NDSI, SI y BI a partir de las imágenes tomadas con el dron.
- Toma de muestras y análisis del suelo para determinar pH, conductividad eléctrica y sodio.
- Correlación entre los valores de pH, CE y Na⁺ con los índices calculados utilizando imágenes multiespectrales.

Materiales y métodos

Sitio de estudio

La investigación se realizó en las tablas 8 y 9 con un total de 100 hectáreas y 200 parcelas, un predio ubicado en Xico (-98.95505,19.24921 WGS 84), en los límites de la alcaldía Tláhuac, localizada en el sur – oriente de la ciudad de México (Figura 1).



Figura 1. Mapa de área de estudio, tablas 8 y 9 (elaboración propia). Centro de cómputo en sistemas de información geográfica y agricultura de precisión, UAM, X.

El estudio tuvo un enfoque multidisciplinario, combinando la recopilación y análisis de datos tanto cuantitativos como cualitativos, lo que permitió cumplir con los objetivos de la investigación. El proyecto se desarrolló durante un periodo de 24 semanas, dividido en fases, los tiempos se ajustaron de acuerdo con las actividades específicas de la investigación, descritas a continuación:

1. *Vuelo de dron*

Con el apoyo de Alberto Ramos Hernández, Trinidad Ávila Camacho y Francisco Villarruel Garduño, productores de tres parcelas de la zona conocida como "Las Tablas", se emplearon drones Phantom y DJI MAVIC 3 Enterprise junto con un receptor GPS diferencial GNSS GeoMex modelo L100 Pro. Este equipo permitió obtener imágenes del área de estudio con alta resolución y precisión en la posición geográfica.

Se realizaron vuelos para capturar imágenes aéreas de las parcelas con resolución de 5 cm/píxel, las cuales fueron posteriormente procesadas para generar ortomosaicos. El procesamiento de las imágenes se llevó a cabo utilizando el software Agisoft Metashape Professional, mientras que el software QGIS se utilizó para la creación de mapas temáticos basados en las imágenes procesadas y el cálculo de indicadores.

Finalmente, los mapas generados fueron entregados a los agricultores participantes para que pudieran analizar las áreas de interés dentro de sus parcelas y tomar decisiones sobre su manejo.

2. *GPS diferencial y procesamiento del vuelo*

Un GPS diferencial es una herramienta que permite mejorar la precisión de las coordenadas geográficas al recibir señales satelitales y corregir posibles errores en la ubicación. En este caso, se utilizó una antena GPS que se conectó al dron para garantizar una mayor exactitud en las coordenadas de los vuelos realizados. Antes de cada vuelo, se llevó a cabo un proceso de configuración del GPS diferencial, estableciendo como sistema de proyección la zona WGS 84. Para corregir las imágenes capturadas en los últimos tres vuelos, se conectó la antena GPS y se emplearon diversas aplicaciones y plataformas especializadas, como: Converter GNSS, Rinex 3.4, el sitio oficial del INEGI para descargar los puntos fijos más cercanos, UNIRENIX para unir los archivos y Geomatics office SGO. Estas herramientas permitieron mejorar las coordenadas y garantizar la calidad de las imágenes utilizadas en el análisis espacial de las parcelas estudiadas con un error de 8 mm.

3. *Clasificación supervisada de cultivos con las imágenes de dron*

Para la clasificación del uso de suelo, se utilizó la herramienta de “clasificación supervisada” en el software QGIS, este método permitió la extracción de información contenida en las imágenes complementando el análisis visual con la aplicación de técnicas cuantitativas para automatizar la identificación de los objetos contenidos en una escena. Las imágenes fueron procesadas a través de algoritmos para asignar a cada unidad homogénea mínima (píxel), un valor en la imagen. Para lograrlo, en la imagen se agregaron polígonos que se le asignaron un valor de acuerdo a un conjunto de píxeles similares y cada conjunto se clasificó a nuestro interés. Posteriormente se utilizó el complemento dzetsaka: classification tool en QGIS, para el análisis.

Para calcular el área correspondiente a cada clasificación, se transformó del raster clasificado a vector, posteriormente el archivo tipo fue exportado un documento Excel que fue analizado en R-studio. Este procedimiento se realizó para dos clasificaciones. La primera clasificación general incluyó siete categorías principales: biomasa (1), suelo expuesto (2), agua (3), construcción (4), salinidad (5), suelo labrado (6) e infraestructura agrícola (7). La segunda clasificación considero: acelga (1), calabaza (2), cempasúchil (3), maíz (4), olivo (5), romero semilla (6), coquia (7), acelga/romero (8), romero (9), amaranto (10), coquia seca (11), costra con romero (12), pasto (13), costra con coquia (14), siembra de romero (15), pasto/coquia (16), costra (17), suelo labrado sin cultivo (18), suelo labrado con romero (19), avena (20), maíz/calabaza (21), suelo expuesto sin cultivo (22), romero germinado (23), estructura agrícola (24), col (25), lechuga (26), ramas secas (27), construcción (28) y suelo inundado (29).

4. *Índices de salinidad: NDVI, NDSI, SI y BI*

El Cuadro 1 se incluye las fórmulas que se utilizaron en QGIS para calcular los índices de vegetación y de salinidad. Se utilizaron las imágenes tomadas con el dron en las diferentes bandas que cada ecuación requería.

Cuadro 1. Fórmulas que se utilizaron para el cálculo de los índices de salinidad (Rastoskuev & Shiozawa, 2005).

Índice	Formula
Índice de vegetación normalizada	$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$
Índice de salinidad normalizada	$NDSI = \frac{(R - NIR)}{(R + NIR)}$
Índice de salinidad	$SI = \sqrt{BLUE * RED}$
Índice de brillo	$BI = 2RED^2 * NIR^2$

Con las clasificaciones y los índices se realizaron mapas que permitieron un mejor análisis de la información. Los mapas elaborados representan visualmente la zona de estudio, destacan la clasificación del uso de suelo y los cultivos presentes en las parcelas de las tablas 8 y 9 de Tulyehualco, así como las parcelas de los productores que participaron en el estudio, además de los valores de los índices en la zona de estudio.

5. *Recolección de muestras de suelo en tablas 8 y 9 de Tulyehualco y preparación de las muestras del suelo*

Se recolectaron 30 muestras de suelo en la zona de estudio (Figura 16), para cada muestra se registraron las coordenadas geográficas exactas utilizando un dispositivo GPS, asegurando la precisión en la localización de los puntos de muestreo.

El proceso de recolección de las muestras se realizó siguiendo protocolos establecidos para garantizar la representatividad y calidad de estas. En este procedimiento, participaron activamente los productores locales, quienes colaboraron en la identificación de las áreas de interés y en la extracción de las muestras, en la Figura 2 se ilustra el proceso de recolección, que incluyó el uso de herramientas específicas para la extracción de suelo, así como la preparación adecuada de las muestras para su posterior análisis en laboratorio. Este enfoque colaborativo permitió integrar el conocimiento local con las técnicas científicas, fortaleciendo la relación entre los investigadores y la comunidad agrícola.



Figura 2. Productores tomando muestras del suelo en tablas 8 y 9.

Una vez recolectadas, las muestras de suelo fueron llevadas al laboratorio de suelos de la Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Xochimilco, para su preparación. Para garantizar el correcto manejo de las muestras se realizó el siguiente procedimiento: secado, tamizado y medición de 350 gramos de suelo para su análisis posterior (Figura 3).



Figura 3. Secado y preparación de muestras de suelo.

6. *Análisis de muestras en laboratorio*

Se analizaron las muestras recolectadas de las tablas 8 y 9 para medir la salinidad del suelo, estos análisis se llevaron a cabo en el Laboratorio de Fertilidad de Suelos y Química Ambiental del Colegio de Postgraduados, Plantel Montecillo, México. El análisis de suelo considero que la muestra fuera tomada del extracto de saturación, donde se midieron los siguientes parámetros:

- Medición de pH mediante potenciómetro.
- Conductividad eléctrica mediante conductimetría en el extracto de saturación.
- Sodio en emisión atómica.
-

Preparación del extracto de saturación

Se pesaron 50 gramos de suelo de cada una de las muestras utilizando una balanza analítica y se colocaron en frascos de polipropileno que fueron etiquetados de acuerdo con el número de cada muestra. Siguiendo las medidas de cuidado para evitar la contaminación, se agregó agua destilada tipo 1 a cada muestra, poco a poco, mientras se agitaba para formar una pasta. Utilizando una espátula, la mezcla se homogenizó, evitando grumos, hasta lograr una pasta correctamente saturada (Figura 5). Se registró la cantidad de agua utilizada en la bitácora. Posteriormente, las muestras se dejaron reposar durante 24 horas antes de proceder al proceso de filtrado.



Figura 5. Preparación de la pasta de saturación.

Pasado el tiempo de reposo de las muestras, se realizó el proceso de filtrado utilizando una bomba de vacío. A continuación, se describen los pasos detallados (Bartels, 1996):

1. Preparación del equipo de filtrado:

Se conectó un matraz kitazato a la manguera de vacío. Dentro del matraz, se colocó un tubo de ensayo para recolectar el extracto, se colocó un papel filtro en el embudo, el cual fue humedecido con agua destilada tipo 1 para asegurar su correcta colocación.

2. Verificación de la pasta:

Se verificó que la pasta tuviera la cantidad de humedad adecuada para estar correctamente saturada, se mezcló nuevamente la pasta homogéneamente con una espátula antes de añadirla al embudo de filtración.

3. Filtración del extracto:

Se agregó la pasta de saturación al embudo asegurándose de incluir la mayor cantidad de muestra posible, se activó la llave de succión para iniciar el filtrado y obtener el extracto del suelo. Durante el procedimiento, se revisó constantemente que la pasta en el embudo estuviera completamente seca antes de cerrar la llave.

4. Recolección y etiquetado del extracto:

Una vez seco, se retiró el tubo de ensayo con cuidado, se rotuló con el número correspondiente a la muestra y se colocó en una rejilla. Este mismo procedimiento se repitió para las 30 muestras, asegurando que el material fuera enjuagado entre cada muestra para evitar contaminación cruzada (Figura 6).



Figura 6. Extracción de la pasta de saturación

pH

El pH del suelo es un parámetro fundamental que indica la acidez o alcalinidad de este, afectando directamente la disponibilidad de nutrientes para las plantas. Los métodos para determinar el pH en suelos se dividen en dos grupos principales: colorimétricos y electrométricos. Los métodos colorimétricos utilizan indicadores ácido-base que cambian de color según la actividad del ion H^+ , mientras que los métodos electrométricos, más comunes en laboratorios de suelo, miden el potencial de un electrodo sensible a iones de hidrógeno (electrodo de vidrio) en referencia a un electrodo de calomelanos, que también actúa como puente salino (Bartels, 1996).

Para el análisis de pH en nuestras muestras, se utilizó el método electrométrico. La lectura se realizó con un potenciómetro (Figura 7), utilizando directamente los extractos de saturación obtenidos previamente. Entre cada muestra, se limpió cuidadosamente el electrodo con agua destilada tipo 1 para evitar contaminación cruzada entre los extractos. Los

resultados se registraron en la bitácora, asociándolos al número correspondiente de cada muestra.



Figura 7. Potenciómetro para medir pH

Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) es una medida de la cantidad de sales solubles en el suelo, lo que la convierte en un indicador directo de la salinidad de este. Este parámetro es crucial para evaluar la calidad del suelo y su impacto en el desarrollo de los cultivos, ya que la salinidad afecta la disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas (Bartels, 1996).

Para determinar la conductividad eléctrica en las muestras, se utilizaron los extractos de saturación obtenidos previamente. El análisis se realizó utilizando un puente de conductividad (Figura 8). Antes de cada lectura, se tomó la temperatura de la solución, ya que este factor influye directamente en los resultados. La lectura correcta de la CE se obtuvo ajustando el aparato hasta lograr la máxima apertura de la sombra del "ojo mágico". Los resultados se registraron en la bitácora para su posterior análisis y conversión a las unidades correspondientes: mmhos/cm a, dS m^{-1}



Figura 8. Conductímetro para medir conductividad eléctrica

Sodio (Na^+)

El sodio es un componente clave en los suelos salino-sódicos, ya que puede afectar negativamente la estructura del suelo y el crecimiento de las plantas. Este tipo de suelo presenta un alto porcentaje de sodio intercambiable, lo que puede limitar la producción agrícola debido a problemas como la compactación del suelo y la reducción de la infiltración de agua (Bartels, 1996).

Las muestras se analizaron directamente utilizando el equipo de absorción atómica y (figura 9). De acuerdo con la concentración de sales en las muestras, el intervalo lineal de la

curva de calibración fue muy elevado, por lo tanto, se trabajó sobre diluciones. Los datos obtenidos se registraron en la bitácora para su posterior análisis.



Figura 9. Equipo de absorción atómica para medir bases

7. *Correlación de los resultados*

Finalmente, con los resultados de laboratorio y vuelos, se realizó un análisis de correlación, para saber si es posible predecir algún resultado de laboratorio (pH, CE, Na⁺) a partir de los índices NDVI, NDSI, SI o BI.

Resultados

Los resultados incluyen la captura y el procesamiento de imágenes multiespectrales tomadas del vuelo con el dron DJI MAVIC 3 Enterprise RTK y corregidas con el GPS diferencial, estas imágenes permitieron clasificar el uso del suelo y los cultivos presentes en la zona de estudio, el cálculo de índices espectrales como el **NDVI** (Índice de Vegetación Normalizada), **NDSI** (Índice de Salinidad Normalizada), **SI** (Índice de Salinidad) y **BI** (Índice de Brillo), así como mapas temáticos que muestran los valores de salinidad y la actividad vegetativa, lo cual permitió identificar zonas afectadas por la salinidad y finalmente. También, se incluyen los resultados del análisis de laboratorio del suelo (pH, conductividad eléctrica y sodio) y finalmente el análisis de correlación entre los índices espectrales y los resultados de laboratorio, lo que permitió interpretar la relación entre las propiedades del suelo y los índices calculados.

Mapas de clasificación de cultivos presentes en las tablas con las imágenes de dron

Los usos de suelos generales que se encontraron en las tablas 8 y 9 fueron: biomasa, suelo expuesto, agua, construcciones, salinidad (costras), suelo labrado e infraestructura agrícola (Figura 10), siendo la biomasa la que presentaba la mayor área (56.03 hectáreas) seguida por suelo labrado (25.35 hectáreas) y salinidad observada por costras (10.46 hectáreas) (Cuadro 2). De acuerdo con Muñoz en 2013, los drones son herramientas clave en la agricultura de precisión, ya que permiten realizar un monitoreo avanzado de cultivos y suelos en menos tiempo y con mayor precisión. Estos mapas no solo proporcionan información visual sobre el estado actual del suelo y los cultivos, sino que también permiten realizar un seguimiento temporal de los cambios en el uso del suelo. Esto es especialmente útil para evaluar el impacto de prácticas agrícolas, identificar problemas como la salinidad o erosión, y optimizar el manejo de recursos (Muñoz, 2013).

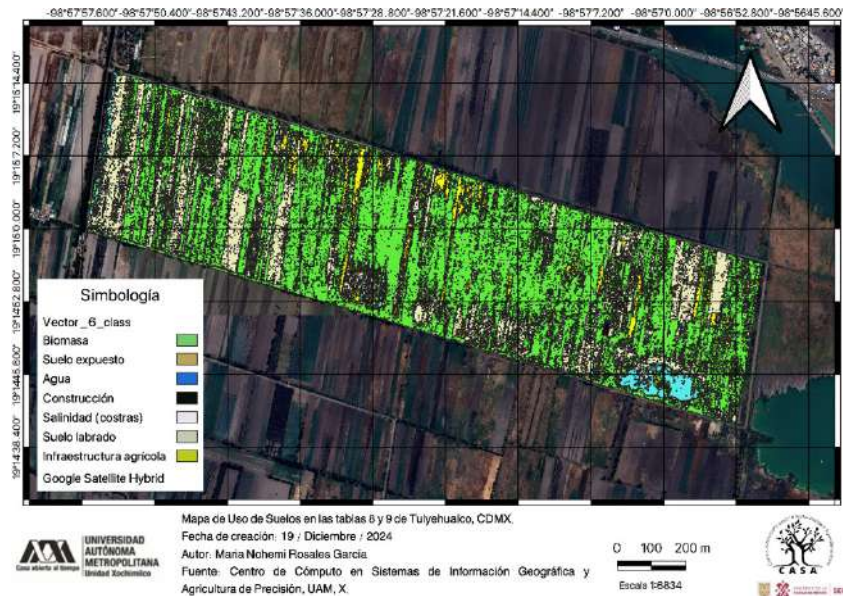


Figura 10. Mapa de clasificación de usos de suelo en tablas 8 y 9 de Tulyehualco, CDMX (elaboración propia). Centro de cómputo en sistemas de información geográfica y agricultura de precisión, UAM, X.

Posterior a la primera clasificación se consideró realizar una clasificación considerando 29 usos, estos fueron: acelga (*Beta vulgaris*), calabaza (*Curcubita pepo*), cempasúchil (*Tagetes erecta*), maíz (*Zea mays*), olivo (*Olea europea*), romerito semilla (*Suaeda Torreyana S.*), coquia (*Kochia scoparia L.*), acelga / romero, romero, amaranto (*Amaranthus*), coquia seca, costra con romero, pasto, costra con coquia, siembra romero, pasto/coquia, costra, suelo labrado sin cultivo, suelo labrado con romero, avena (*Avena sativa*), maíz/calabaza, suelo expuesto sin cultivo, romero germinado, estructura agrícola, col (*Brassica oleracea var. capitata*), lechuga (*Lactuca sativa*), ramas secas, construcción y suelo inundado (Figura 11). Con esta clasificación los usos de suelo generales fueron más específicos, por ejemplo, en la primera clasificación la biomasa representa la mayor superficie, para esta clasificación se pudo observar que características tenía esta biomasa y cuales cultivos o plantas nativas representaban que superficies, donde la mayor superficie fue por una planta nativa llamada coquia con 31.51 hectáreas, seguido por suelo labrado sin cultivo (21.64 hectáreas). Los cultivos que representaron mayor superficie fueron Maíz (6.26 hectáreas) y Romero en germinación (6.77 hectáreas) (Cuadro 3).

Es importante resaltar que tanto en la primera como segunda clasificación los cuerpos de agua mantuvieron valores similares 2.54 hectáreas para la primera y 2.58 hectáreas para la segunda, demostrando un error pequeño entre una y otra clasificación (0.04 hectáreas), esto también se observó en el uso de suelo denominado construcción (Cuadro 2 y 3).

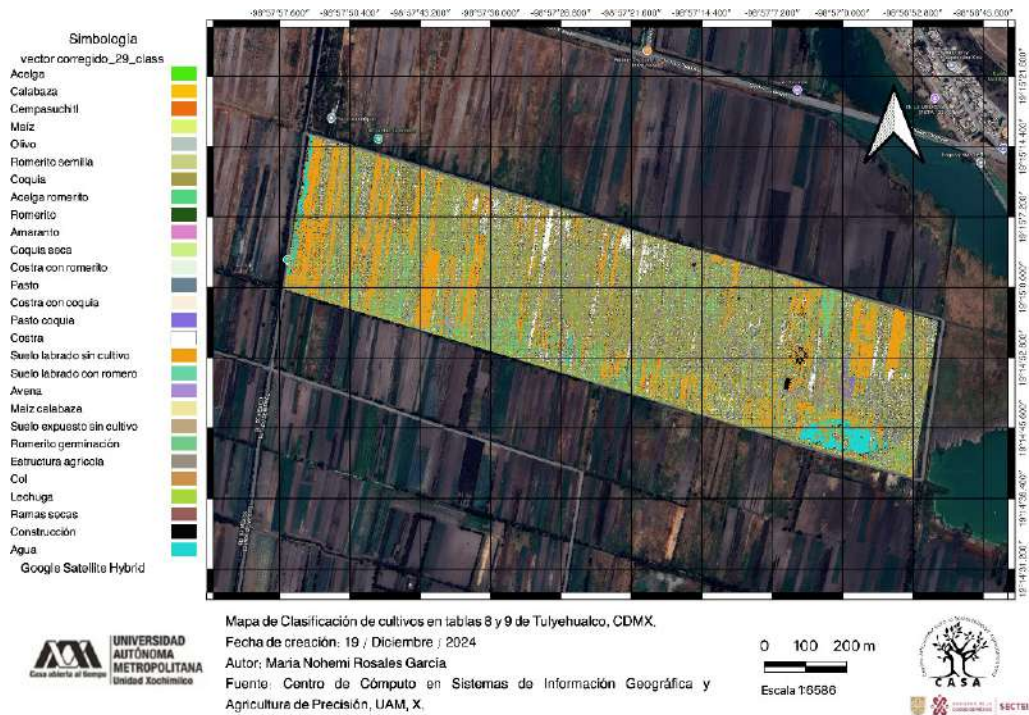


Figura 11. Mapa de clasificación de cultivos en las tablas 8 y 9 de Tulyehualco, CDMX (elaboración propia). Centro de cómputo en sistemas de información geográfica y agricultura de precisión, UAM, X.

Cuadro 2. Área de clasificación del uso de suelo en tablas 8 y 9 de Tulyehualco, CDMX.

T	Uso de suelo		NDVI	NDSI	SI	BI
1	Biomasa N=5101	Área*	56.03	56.03	56.03	56.03
		mean	0.06	-0.06	112.32	17031.59
		sd	0.16	0.16	29.68	4931.86
		min	-0.39	-0.61	12.93	4106.88
		máx.	0.61	0.39	218.79	44249.98
2	Suelo expuesto N= 2307	área	1.17	1.17	1.17	1.17
		mean	-0.03	0.03	121.61	15386.57
		sd	0.11	0.11	28.07	4014.56
		min	-0.28	-0.57	23.51	3606.85
		máx	0.57	0.28	212.22	39271.32
3	Agua N= 1681	área	2.54	2.54	2.54	2.54
		mean	-0.01	0.01	85.46	10910.73
		sd	0.12	0.12	23.77	3377.48
		min	-0.32	-0.63	26.88	3866.97
		máx	0.63	0.32	175.95	29629.51

4	Construcción	área	0.58	0.58	0.58	0.58
	N= 994	mean	0.05	-0.05	112.20	17940.95
		sd	0.20	0.20	48.33	8143.78
		min	-0.35	-0.69	10.27	3632.71
		máx	0.69	0.35	231.83	56212.12
5	Salinidad (Costras)	área	10.46	10.46	10.46	10.46
	N= 9489	mean	0.12	-0.12	114.26	18940.85
		sd	0.16	0.16	27.37	4219.13
		min	-0.27	-0.74	38.67	5540.40
		máx	0.74	0.27	225.52	42843.71
6	Suelo labrado	área	25.35	25.35	25.35	25.35
	N= 9605	mean	0.21	-0.21	93.28	17303.63
		sd	0.20	0.20	30.20	4870.43
		min	-0.39	-0.75	10.67	3984.96
		máx	0.75	0.39	228.25	47699.39
7	Infraestructura agrícola	área	0.10	0.10	0.10	0.10
	N= 181	mean	-0.03	0.03	86.12	11541.26
		sd	0.15	0.15	35.70	4632.57
		min	-0.34	-0.46	24.12	3793.76
		máx	0.46	0.34	222.31	42798.64

* Área en hectáreas

Cuadro 3. Área de clasificación de los cultivos en tablas 8 y 9 de Tulyehualco, CDMX.

T	Cultivos		NDVI	NDSI	SI	BI
1	Acelga	Área*	0.46	0.46	0.46	0.46
	N= 1199	mean	0.48	-0.48	81.78	21928.31
		sd	0.14	0.14	20.97	5241.58
		min	-0.21	-0.80	23.55	7958.60
		max	0.80	0.21	173.96	46500.57
2	Calabaza	área	0.01	0.01	0.01	0.01
	N= 14	mean	0.41	-0.41	91.47	20867.31
		sd	0.12	0.12	21.12	3272.76
		min	0.08	-0.57	61.39	15745.57
		max	0.57	-0.08	127.66	26813.83
3	Cempasuchitl	área	0.03	0.03	0.03	0.03
	N= 69	mean	0.29	-0.29	97.26	19410.31
		sd	0.16	0.16	20.47	3863.83
		min	-0.10	-0.64	57.25	11147.99
		max	0.64	0.10	153.53	31664.03
4	Maíz	área	6.26	6.26	6.26	6.26
	N= 13196	mean	0.30	-0.30	97.74	19241.27

	sd	0.18	0.18	27.02	4469.03
	min	-0.49	-0.78	21.23	5174.86
	max	0.78	0.49	216.19	47291.50
5 Olivo	área	0.02	0.02	0.02	0.02
N= 54	mean	0.35	-0.35	93.93	19042.55
	sd	0.16	0.16	22.06	4076.94
	min	0.00	-0.64	45.46	11998.53
	max	0.64	0.00	142.55	29745.06
6 Romero semilla	área	1.81	1.81	1.81	1.81
N= 4412	mean	0.35	-0.35	93.32	19609.82
	sd	0.14	0.14	20.11	4037.31
	min	-0.21	-0.70	38.50	8057.68
	max	0.70	0.21	189.25	39791.42
7 Coquia	área	31.51	31.51	31.51	31.51
N= 15418	mean	0.27	-0.27	101.08	19446.80
	sd	0.20	0.20	23.55	4743.22
	min	-0.25	-0.76	26.06	4145.45
	max	0.76	0.25	196.56	44762.14
8 Acelga / romero	área	0.01	0.01	0.01	0.01
N= 15	mean	0.45	-0.45	81.39	19790.43
	sd	0.17	0.17	20.38	3982.90
	min	0.19	-0.73	46.12	12713.49
	max	0.73	-0.19	111.04	29172.63
9 Romero	área	0.07	0.07	0.07	0.07
N= 194	mean	0.32	-0.32	90.02	18245.29
	sd	0.17	0.17	21.22	4126.11
	min	-0.17	-0.70	55.30	10355.91
	max	0.70	0.17	155.43	31141.23
10 Amaranto	área	0.02	0.02	0.02	0.02
N= 46	mean	0.26	-0.26	97.27	18833.26
	sd	0.22	0.22	26.58	4904.61
	min	-0.24	-0.74	52.16	10800.56
	max	0.74	0.24	165.41	27923.25
11 Coquia seca	área	0.27	0.27	0.27	0.27
N= 684	mean	0.16	-0.16	93.33	14755.05
	sd	0.19	0.19	25.98	4189.40
	min	-0.25	-0.71	35.14	5867.36
	max	0.71	0.25	191.67	34335.42
12 Costra con romerito	área	2.54	2.54	2.54	2.54
N= 5706	mean	0.14	-0.14	123.79	20943.30
	sd	0.18	0.18	30.35	4825.29

	min	-0.35	-0.74	41.86	8085.35
	max	0.74	0.35	226.43	46813.63
13 Pasto	área	2.32	2.32	2.32	2.32
N= 5045	mean	0.20	-0.20	111.92	19166.93
	sd	0.13	0.13	21.49	3726.76
	min	-0.23	-0.67	42.61	7597.42
	max	0.67	0.23	215.26	36651.74
14 Costra con coquia	área	0.35	0.35	0.35	0.35
N= 881	mean	0.03	-0.03	142.65	20547.61
	sd	0.14	0.14	26.73	5178.12
	min	-0.24	-0.50	67.66	8830.22
	max	0.50	0.24	219.77	44079.99
16 Pasto / Coquia	área	3.44	3.44	3.44	3.44
N= 6799	mean	0.39	-0.39	94.35	21278.69
	sd	0.12	0.12	18.73	4078.44
	min	-0.14	-0.73	36.56	6137.74
	max	0.73	0.14	186.90	44609.20
17 Costra	área	7.60	7.60	7.60	7.60
N= 8212	mean	0.08	-0.08	128.56	19413.61
	sd	0.14	0.14	25.65	4522.86
	min	-0.31	-0.59	51.86	7781.79
	max	0.59	0.31	223.55	43657.76
18 Suelo labrado sin cultivo	área	21.64	21.64	21.64	21.64
N= 8198	mean	0.13	-0.13	106.63	16175.22
	sd	0.17	0.17	31.23	4557.01
	min	-0.39	-0.67	22.00	3606.85
	max	0.67	0.39	228.18	50476.22
19 Suelo labrado con romero	área	3.90	3.90	3.90	3.90
N= 8079	mean	0.21	-0.21	105.51	17337.06
	sd	0.20	0.20	25.94	4241.94
	min	-0.27	-0.76	33.23	4823.08
	max	0.76	0.27	215.12	39019.86
20 Avena	área	1.64	1.64	1.64	1.64
N= 3964	mean	0.30	-0.30	99.61	19118.56
	sd	0.13	0.13	20.19	3695.95
	min	-0.22	-0.71	42.27	6320.56
	max	0.71	0.22	190.31	37580.63
21 Maíz calabaza	área	0.73	0.73	0.73	0.73
N= 1863	mean	0.38	-0.38	94.34	21111.05
	sd	0.18	0.18	26.82	5097.27
	min	-0.18	-0.76	28.49	8229.06

	max	0.76	0.18	203.88	45161.38
22 Suelo expuesto sin cultivo	área	1.33	1.33	1.33	1.33
N= 2602	mean	-0.02	0.02	128.05	15476.23
	sd	0.12	0.12	26.77	4086.35
	min	-0.28	-0.57	33.75	4047.05
	max	0.57	0.28	212.78	39271.32
23 Romero germinación	área	6.77	6.77	6.77	6.77
N= 10367	mean	0.39	-0.39	94.03	20973.32
	sd	0.21	0.21	27.38	5048.16
	min	-0.37	-0.77	33.80	4106.88
	max	0.77	0.37	230.60	49922.55
24 Estructura agrícola	área	0.11	0.11	0.11	0.11
N= 199	mean	-0.01	0.01	93.15	11599.08
	sd	0.15	0.15	33.23	4646.83
	min	-0.34	-0.46	34.46	3793.76
	max	0.46	0.34	221.88	42798.64
25 Col	área	0.01	0.01	0.01	0.01
N= 24	mean	0.19	-0.19	105.85	18201.35
	sd	0.24	0.24	34.15	6516.02
	min	-0.24	-0.63	59.97	8899.72
	max	0.63	0.24	182.90	34781.43
26 Lechuga	área	0.03	0.03	0.03	0.03
N= 94	mean	0.38	-0.38	97.37	21139.32
	sd	0.14	0.14	22.44	4559.10
	min	0.07	-0.66	61.10	13174.06
	max	0.66	-0.07	165.54	41477.30
27 Ramas secas	área	0.13	0.13	0.13	0.13
N= 328	mean	0.03	-0.03	98.16	13048.68
	sd	0.17	0.17	35.63	4624.43
	min	-0.37	-0.59	29.88	4186.39
	max	0.59	0.37	213.49	39419.37
28 Construcción	área	0.66	0.66	0.66	0.66
N= 1179	mean	0.08	-0.08	115.43	17721.81
	sd	0.22	0.22	45.52	7681.55
	min	-0.35	-0.69	25.38	3632.71
	max	0.69	0.35	233.56	56212.12
29 Agua	área	2.58	2.58	2.58	2.58
N= 1728	mean	-0.01	0.01	94.05	10948.78
	sd	0.12	0.12	22.63	3447.94
	min	-0.32	-0.72	42.25	3866.97
	max	0.72	0.32	178.94	45176.78

* Área en hectáreas

Índices: NDVI, NDSI, SI y BI

Los índices calculados con las imágenes fueron 4: el NDVI reveló áreas con vegetación densa y saludable, mientras que los índices de salinidad como el NDSI (Índice de Diferencia Normalizada de Salinidad), SI (Índice de Salinidad) y BI (Índice de Brillo) identificaron zonas con alta concentración de sales en el suelo. Estas áreas con mayor salinidad pueden requerir estrategias de manejo específicas para mejorar la productividad agrícola (Figura 12, 13, 14 y 15). Estos datos nos permiten identificar las áreas con mayor problema de salinidad que necesitan atención especial, así como las zonas que pueden ser productivas.

NDVI

El índice de NDVI de las parcelas de las tablas 8 y 9 de Tulyehualco en la Ciudad de México mostraron valores entre -0.61 a 0.85, normalmente este índice va se mide de -1 a 1. Los valores negativos están representados con color rojo y se refiere a una menor actividad vegetativa como suelo expuesto sin cultivo y cuerpos de agua. Por el contrario, cuando es el valor es más alto se representa con color azul y se refiere a una mayor actividad vegetativa como acelga o coquia (Figura 12).

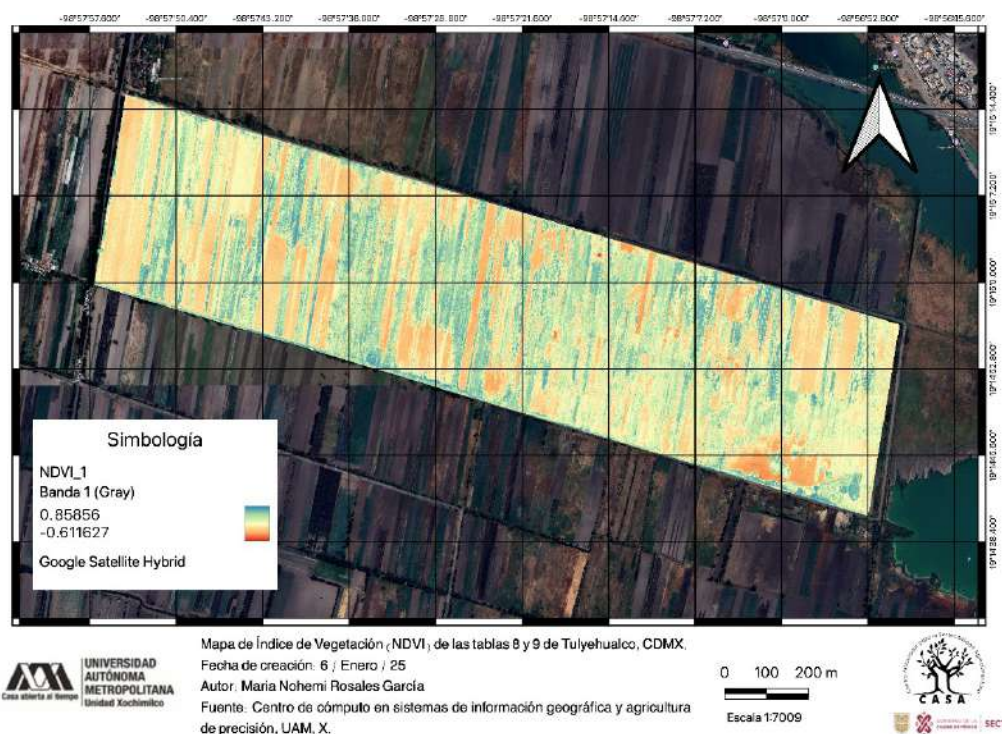


Figura 12. Mapa de Índice de Vegetación (NDVI) en tablas 8 y 9 de Tulyehualco CDMX (elaboración propia). Centro de cómputo en sistemas de información geográfica y agricultura de precisión, UAM, X.

NDSI

El NDSI, cuyos resultados muestran un rango de valores entre -0.85 y 0.61 (Figura 13). Es interesante notar que existe una relación inversa entre el NDVI y el NDSI (Khan,

2005), por ejemplo, cuando el NDVI identifica áreas con mayor actividad vegetativa en valores positivos, el NDSI refleja una mayor salinidad en valores positivos, esto implica que, en zonas donde el NDVI es alto (indicando vegetación densa y saludable), el NDSI tiende a ser bajo, lo que sugiere una menor salinidad, por el contrario, en áreas con valores altos de NDSI, el NDVI es bajo, lo que indica una vegetación escasa o nula debido a la alta concentración de sales (Figura 12 y 13).

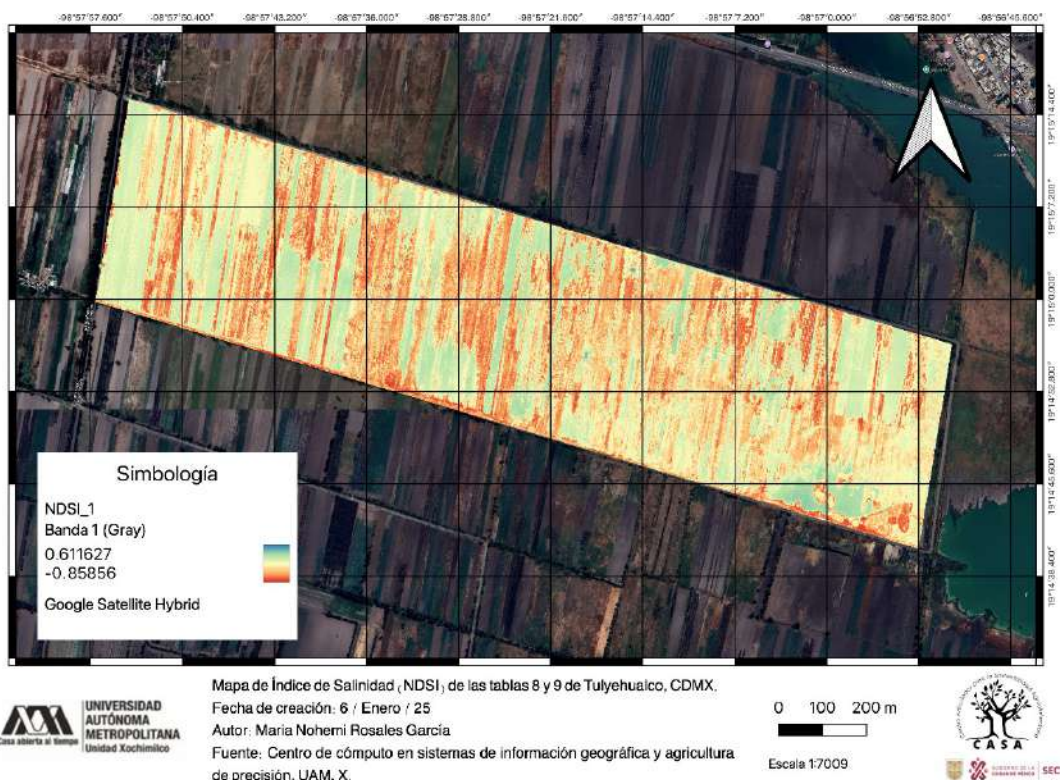


Figura 13. Mapa de Índice de salinidad normalizada (NDSI) (elaboración propia). Centro de cómputo en sistemas de información geográfica y agricultura de precisión, UAM, X.

SI

El índice SI van entre 0 como valor mínimo y 254 como valor máximo (Figura 14). En este mapa, los valores más bajos están representados en color rojo, mientras que los valores más altos se muestran en color azul, este índice nos permitió identificar áreas con diferentes niveles de salinidad en el suelo, siendo las zonas con valores entre 51.86 a 223 las que indicativas una mayor concentración de sales, mientras que las zonas con valores entre 23.55 a 173.96 reflejan una menor salinidad (Cuadro 3). La representación cromática facilita la interpretación visual de los datos, permitiendo localizar rápidamente las áreas críticas donde la salinidad podría estar afectando la productividad agrícola.

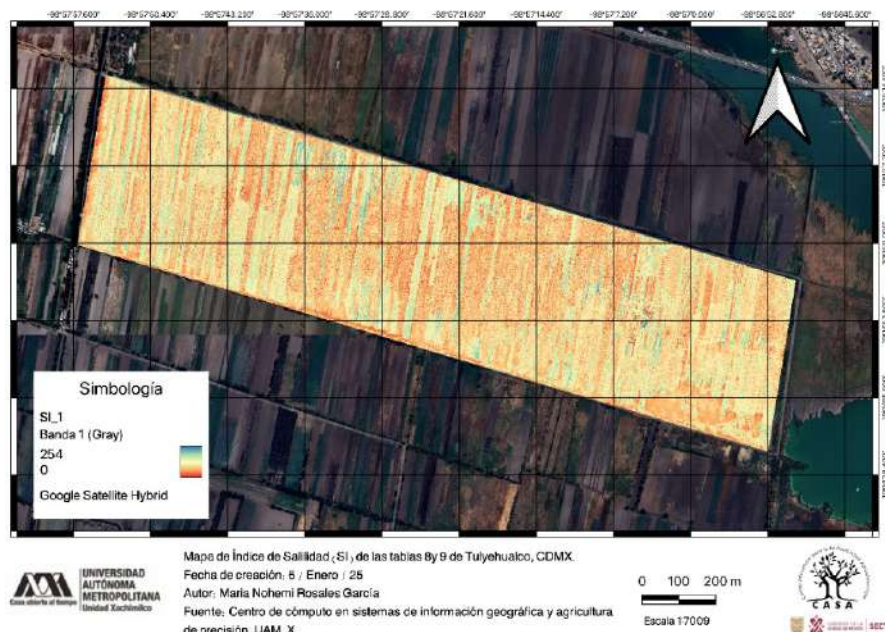


Figura 14. Mapa de Índice de Salinidad (SI) (elaboración propia). Centro de cómputo en sistemas de información geográfica y agricultura de precisión, UAM, X.

BI

El índice de Brillo (BI) de la zona de estudio. Los valores en este análisis oscilan entre 3,103.48 como valor mínimo y 83,095.45 como valor máximo. Este índice nos permitió identificar áreas con diferentes niveles de brillo en la superficie, lo cual puede estar relacionado con características como la reflectancia del suelo, la cobertura vegetal o la presencia de materiales específicos en la región (Figura 15).

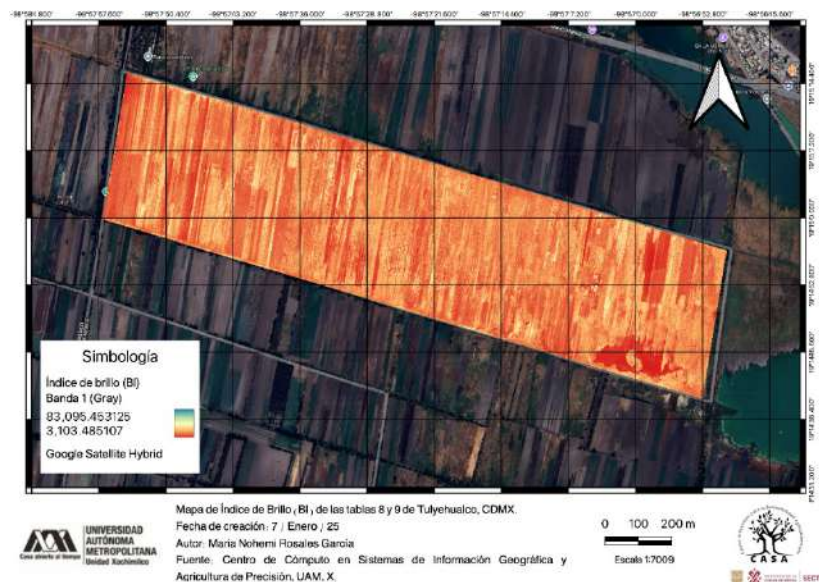


Figura 15. Mapa de Índice de Brillo BI (elaboración propia). Centro de cómputo en sistemas de información geográfica y agricultura de precisión, UAM, X.

Índices y usos de suelo

Considerando los usos de suelo de la segunda clasificación el cultivo que presento mayor actividad vegetativa por el índice de NDVI fue el cultivo de acelga (0.48), por el contrario, el uso que presento menor actividad vegetativa fue suelo expuesto sin cultivo (-0.02), por otra parte, las plantas como la coquia presentaron valores de 0.27 en NDVI (Cuadro 3). Respecto al NDSI en suelo con costras los valores fueron de -0.08, mientras que en NDVI fue de 0.08 y en SI 128.56, siendo uno de los más altos en ese índice, consideramos que la reflectancia de las sales expuesta en formas de costras es cercana a 0 tanto en los índices de NDVI como en los de NDVI, mientras que en el índice de SI sus valores son entre 51.86 a 223.55 (Cuadro 3).

Características del suelo en tablas de Tulyehualco

La figura 16 representa el mapa de puntos de muestreo para el análisis del suelo en tablas 8 y 9 de Tulyehualco de la CDMX. El cuadro 4 incluye las coordenadas de los puntos de muestreo, los cultivos presentes, altura, así como el peso y volumen utilizado en laboratorio para la preparación de la pasta de saturación.



Figura 16. Mapa de puntos de muestreo para análisis en tablas 8 y 9 de Tulyehualco, CDMX (elaboración propia). Centro de cómputo en sistemas de información geográfica y agricultura de precisión, UAM, X.

Cuadro 4. Puntos de muestreo y resultados de pasta de saturación

No. Identificación		Pasta de saturación				
Lab.	Cultivo			Altura	suelo	H2O
		UTM-X	UTM- Y		(g)	(ml)
1	Col, acelga, maíz, olivos	-98.9611	19.2529	2224	50	53.5
2	Romero silvestre, salinidad	-98.9598	19.2524	2226	50.01	41.5
3	Sal	-98.9583	19.2521	2230	50.01	44.5
4	Sin cultivo	-98.9576	19.2519	2229	50.01	47.5
5	Nopal, agave	-98.9564	19.2513	2230	50.01	46.5
6	Romero, coquia, falsa verd	-98.9554	19.2514	2229	50	47
7	Olivo, coquia, romero con flor	-98.9546	19.251	2232	50	45
8	Quelite, romero	-98.9533	19.2507	2229	50	45.5
9	Cempasuchil, verdolaga, olivos, espinaca	-98.9512	19.2498	2231	50	50.5
10	Sin cultivo	-98.9486	19.2491	2231	50.01	48.5
11	Granada, olivos, nopal	-98.9635	19.2533	2230	50	36
12	Romero para semilla	-98.9642	19.2516	2228	50	44
13	Amaranto	-98.9648	19.2498	2224	50.01	48.5
14	Romero, amaranto, maleza	-98.9633	19.2494	2226	50.01	47
15	Maíz, calabaza	-98.9617	19.2488	2225	50	51.5
16	Acelga, maíz, romero, maleza	-98.9602	19.2484	2227	50.02	47.5
17	Maíz	-98.9583	19.2479	2227	50.01	53
18	Amaranto, coquia	-98.9568	19.2475	2222	50.01	51.5
19	Maíz, coquia, maleza	-98.9559	19.2471	2228	50.02	49.5
20	Coquia, maleza inundado	-98.9549	19.2468	2228	50.02	59.5
21	Coquia, maíz, chicalote	-98.9551	19.2485	2229	50	41.5
22	Sal	-98.948	19.2486	2224	50	50
23	Pasto	-98.9488	19.2461	2225	50.01	50
24	Pasto, coquia	-98.9498	19.2475	2226	50.02	58
25	Pasto, sal, maleza, coquia	-98.9524	19.2487	2226	50	56
26	Maleza, zacate cola de caballo, Coquia	-98.9562	19.2498	2225	50.01	53
27	Sal, coquia, pasto, romero	-98.9586	19.2502	2224	50.01	53
28	Coquia, pasto, amaranto, romero	-98.9618	19.2511	2226	50.01	49
29	Coquia, maleza, romero siembra	-98.9633	19.2516	2220	50.02	55
30	Romero cultivo	-98.9651	19.2543	2211	50.01	53

Las características de los suelos en el caso del pH se encuentran entre 8.1 y 9.4, lo que nos indica suelos alcalinos en todas las muestras. La conductividad eléctrica (CE) entre 1.1 mmhos/cm (dSm^{-1}) en suelos con menor salinidad y 59.1 mmhos/cm (dSm^{-1}) en suelos con alta salinidad. Los niveles de sodio fluctuaron desde 6.5 meq/L hasta un máximo de 1135.8 meq/L, esto refleja una amplia variación en la salinidad de las muestras.

Las muestras con cultivos como romero, maíz, amaranto y acelga presentaron valores de salinidad moderados, mientras que las muestras con sal o sin cultivo mostraron los niveles más altos de sodio y salinidad, por ejemplo, la muestra 2 (Romero silvestre, salinidad) presentó un pH de 8.7, CE de 54.6 dSm⁻¹ y Na⁺ de 1135.8 meq/L, un NDSI de 0.20798, y un SI de 240.41214, lo que refleja una alta concentración de sales con un cultivo tolerante a la salinidad. Mientras que suelo con contras su pH es de 8.7, 53.4 dSm⁻¹ y Na⁺ de 932 meq/l un NDSI de -0.04 y SI de 114.29 (Cuadro 5).

Cuadro 5. Resultados de pH, conductividad eléctrica, sodio, NDVI, NDSI, SI y BI.

Muestra	No. Lab	Cultivo	pH	CE mmhos/cm (dSm-1)	Na ⁺ meq/L	NDVI	NDSI	SI	BI
1	4399	Col, acelga, maíz, olivos	8.4	1.1	6.5	-0.10	0.10	162.49	19651.40
2	4400	Romero silvestre, salinidad	8.7	54.6	1135.8	-0.21	0.21	240.41	41706.36
3	4401	Sal	8.7	53.4	932.0	0.04	-0.04	114.30	25049.24
4	4402	Sin cultivo	8.8	28.4	257.3	-0.14	0.14	169.38	16190.91
5	4403	Nopal, agave	8.5	27.3	289.2	-0.08	0.08	161.76	20007.00
6	4404	Romero, coquia, falsa verd	8.6	28.4	361.5	0.25	-0.25	43.07	11928.42
7	4405	Olivo, coquia, romero con flor	8.5	56.8	823.6	-0.09	0.09	191.99	19840.78
8	4406	Quelite, romero	8.4	40.9	543.9	-0.13	0.13	122.74	14999.62
9	4407	Cempasuchil, verdolaga, olivos, espinaca	8.4	17.1	33.0	0.13	-0.13	135.50	20839.39
10	4408	Sin cultivo	8.1	11.6	81.4	0.27	-0.27	123.22	28403.50
11	4409	Granada, olivos, nopal	8.2	59.1	809.3	0.04	-0.04	153.70	28203.03
12	4410	Romero para semilla	8.6	29.6	337.8	0.48	-0.48	56.52	19558.56
13	4411	Amaranto	8.4	3.4	15.1	0.46	-0.46	83.32	20482.66
14	4412	Romero, amaranto, maleza	8.6	1.4	6.5	0.51	-0.51	78.69	19528.73
15	4413	Maíz, calabaza	8.6	1.9	10.6	0.49	-0.49	114.17	25806.96
16	4414	Acelga, maíz, romero, maleza	8.2	18.8	188.0	-0.10	0.10	170.29	18568.33
17	4415	Maíz	8.2	10.7	120.3	0.28	-0.28	92.79	14465.81
18	4416	Amaranto, coquia	8.4	18.2	208.1	0.16	-0.16	78.31	11795.52
19	4417	Maíz, coquia, maleza	8.6	4.5	36.2	0.40	-0.40	68.88	12704.17
20	4418	Coquia, maleza inundado	8.8	5.1	38.4	0.28	-0.28	104.52	17941.60
21	4419	Coquia, maíz, chicalote	9.0	4.0	29.2	0.42	-0.42	145.33	32269.18
22	4420	Sal	8.6	3.6	18.6	0.16	-0.16	133.09	17390.42
23	4421	Pasto	9.4	6.4	95.8	0.21	-0.21	149.67	20960.15
24	4422	Pasto, coquia	8.2	5.1	38.8	0.33	-0.33	118.93	18723.12
25	4423	Pasto, sal, maleza, coquia	8.4	30.7	273.7	0.31	-0.31	54.80	17605.78
26	4424	Maleza, zacate cola de caballo, Coquia	8.8	4.5	36.8	0.27	-0.27	76.32	14964.36
27	4425	Sal, coquia, pasto, romero	8.9	45.5	879.2	0.20	-0.20	80.55	13965.97
28	4426	Coquia, pasto, amaranto, romero	8.2	39.8	370.6	-0.08	0.08	160.00	13207.24
29	4427	Coquia, maleza, romero siembra	8.5	4.2	28.3	0.01	-0.01	138.49	11660.96
30	4428	Romero cultivo	8.7	8.0	75.8	-0.06	0.06	63.80	9098.77

Correlación entre los resultados

El análisis de correlación permitió identificar las relaciones más significativas entre los índices de salinidad y análisis de suelo en el laboratorio. Este enfoque estadístico fue fundamental para responder a la pregunta si es posible predecir valores químicos del suelo con índices multi espectrales.

Se encontró una alta correlación positiva entre los niveles de sodio (Na^+) y la conductividad eléctrica (CE) con $R^2=0.89$ (Cuadro 6) (Figura 17). Este resultado confirma que a medida que aumenta la concentración de sodio en el suelo, también se incrementa la conductividad eléctrica, lo que es consistente con la naturaleza iónica de las sales disueltas en el agua del suelo, (cita).

Tanto el NDSI como el SI tienen una correlación moderada con la CE $R^2=0.27$ y $R^2=0.10$, respectivamente (Cuadro 6) (Figura 19). Esto indica que estos índices pueden ser útiles para estimar la salinidad del suelo, pero no son tan precisos como la medición directa de la conductividad eléctrica.

Las correlaciones entre el pH y las demás variables son muy bajas (cercanas a $R^2=0$), lo que indica que el pH no tiene una relación significativa con los índices de salinidad ni con las concentraciones de sodio en este caso (Cuadro 6).

Cuadro 6. Correlación entre los resultados del análisis de suelo y los índices de salinidad

	NDVI	NDSI	SI	BI	Na^+ meq/L
pH	0.02	0.02	0.001	0.008	0.0002
CE mmhos/cm (dSm-1)	0.27	0.27	0.10	0.06	0.89
Na^+ meq/L	0.22	0.22	0.12	0.12	1

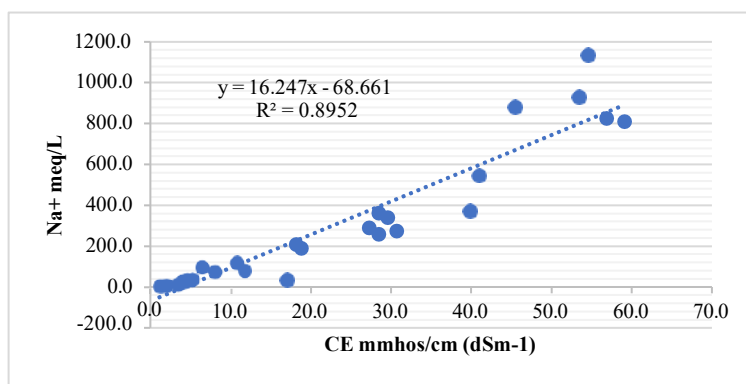
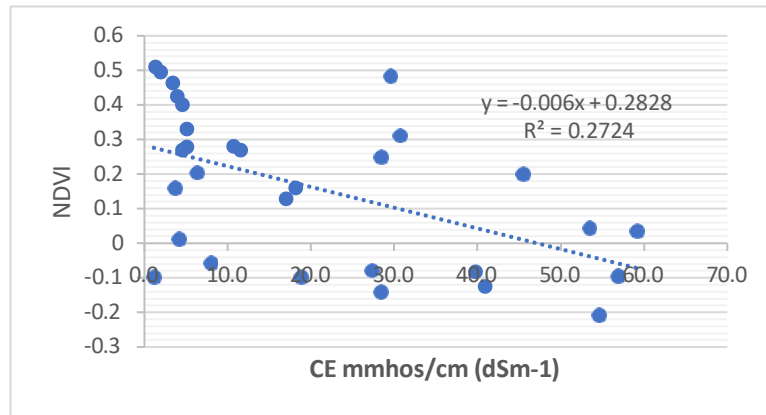


Figura 17. Correlación entre conductividad eléctrica (CE) y sodio (Na^+).



Bibliografía

- Allbed, A., Kumar, L. Y Aldakheel, Y. (2014). Assessing soil salinity using soil salinity and vegetation indices derived from IKONOS high-spatial resolution imageries: Applications in a date palm dominated region. *Geoderma* 230–2311–8.
- Bartels, J.M., 1996. *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*. SSSA, Madison, Wisconsin, USA, pp. 1400
- De la Cruz, M., Magdaleno, H., Gardezi, A., Panta, J. y Villa, O. (2023). Niveles de salinidad del suelo, utilizando imágenes de vehículos aéreos no tripulados, redes neuronales y árboles de decisión. *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*, Vol. 11, No. 64.
- Delgado, D., Rodríguez, R., Capulín, J., Madariaga, A. y Islas, M. (2022). Caracterización físicoquímica de suelos salinos agrícolas, en la localidad de Chicavasco, estado de Hidalgo, México. *South Florida Journal of Development*, Miami, p.335-344 v. 3, n. 1.
- GitHub Inc, (2024). Dzetsaka: classification tool. Sitio web: <https://github.com/nkarasiak/dzetsaka>
- Ibarra Mendoza, B. (2021). *Territorio de Conservación de la Ciudad de México*. Cauce. Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco. pp. 10- 14.
- INEGI, (2010). *Compendio de información geográfica municipal Tláhuac Distrito Federal*. (Disponible en: INEGI. Compendio de información geográfica municipal 2010. Tláhuac, Distrito Federal).
- INEGI (2023). *Censos y conteos de población y vivienda*. (Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>).
- INEGI, (2024). Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Sitio web: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)
- FAO (2012). *Informe de la 32ª Conferencia Regional de la FAO para América Latina y el Caribe*. Buenos Aires, FAO (disponible en: <http://www.fao.org/docrep/meeting/025/md612s.pdf>).
- Khan, N., Rastokuev, V., & Shiozawa, S. (2005). Assessment of hydrosaline land degradation by using a simple approach of remote sensing indicators. *Agricultural Water Management* 77 (2005) 96–109.
- Gutierrez, E. y Cáceres, A. (2018). Correlación entre la conductividad eléctrica medida en el extracto de saturación del suelo y en extractos con cinco relaciones suelo-agua. *Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinarias ALFA Centro de Estudios Transdisciplinarios, Bolivia*. vol. 2, núm. 6.
- Lamz, A. y González, M. (2013). La salinidad como problema en la agricultura: la mejora vegetal una solución inmediata. ISSN digital: 1819-4087 vol. 34, no. 4, p. 31-42.
- Mata, I., Rodríguez, M., Vela, G. (2014). Dinámica de la salinidad en los suelos. *Revista Digital del Departamento El Hombre y su Ambiente* ISSN: 2007-5782 Vol. 1 (5): 26-35.
- Muñoz, P. (2013). *Apuntes de Teledetección: Índices de vegetación*. CIREN, Centro de Información de Recursos Naturales.
- Olivares B., López B., (2019). Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada aplicado al territorio indígena agrícola de Kashaama, Venezuela. *Cuadernos de Investigación UNED*, 11(2), 112-121.

- Padilla, L. (2017). Variabilidad espacial de la salinidad en suelos del distrito de riego 014, Mexicali Baja California. Universidad Autónoma del Estado de México facultad de planeación urbana y regional.
- Revelo D., Mejía J., Montoya B. y Hoyos J. (2020). Análisis de los índices de vegetación NDVI, GNDVI y NDRE para la caracterización del cultivo de café, Colombia. Universidad del Norte, Vol. 38 n.º 2. 298-312.
- Rodríguez, V., Ruiz, J., Padilla, J. y Silva, M. (2016). Mapeo espacial de la salinidad del suelo a través de sensores remotos. Estudio de caso norte de Tamaulipas. Revista mexicana de ciencias agrícolas ISSN 2007-0934 vol.7.