

MODELOS PARA LA DETECCIÓN DE AFLORAMIENTOS Y SUELOS SALINOS, APLICANDO IMÁGENES SATELITALES SENTINEL 2A, EN LA REGIÓN INTERSALAR DEL ALTIPLANO BOLIVIANO, DEPARTAMENTOS ORURO Y POTOSÍ

M.Sc. José Luis Delgado Álvarez

Universidad Mayor de San Andrés

Correo Electrónico: joselo7191@gmail.com

Resumen

La salinización del suelo constituye uno de los principales procesos de degradación de tierras en regiones áridas y semiáridas, debido a sus efectos adversos sobre la productividad del suelo y la sostenibilidad de los mismos. En el altiplano boliviano, particularmente en la región intersalar comprendida entre los salares de Uyuni y Coipasa, la presencia de afloramientos salinos representa un factor importante de deterioro ambiental. En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo proponer un modelo de detección y cartografía de suelos salinos mediante el análisis espacial de imágenes satelitales Sentinel-2A.

La metodología se basa en el procesamiento de una imagen Sentinel-2A correspondiente a julio de 2024, a partir de la cual se calcularon tres índices espectrales: índice de vegetación, índice de salinidad e índice de brillo del suelo. Estos índices fueron integrados mediante técnicas de álgebra de mapas y un modelo ponderado para estimar la distribución espacial de la concentración de sales en la superficie del suelo. El procesamiento y análisis de la información se realizaron utilizando el software ERDAS IMAGINE.

Como resultado se obtuvo un mapa temático de distribución de costras salinas y concentración superficial de sales, que muestra una correspondencia espacial coherente con las condiciones conocidas del área de estudio. Los resultados constituyen una base preliminar para la identificación de zonas afectadas por salinización y para el desarrollo de futuras etapas de validación y refinamiento del modelo propuesto con fines de planificación territorial.

Abstract

Soil salinization is one of the main land degradation processes in arid and semi-arid regions due to its adverse effects on soil productivity and the sustainability of agroecosystems. In the Bolivian Altiplano, particularly in the intersalar region located between the Uyuni and Coipasa salt flats, saline outcrops represent a significant factor of environmental deterioration. In this context, the objective of this research is to propose a model for the detection and mapping of saline soils through spatial analysis of Sentinel-2A satellite imagery.

The methodology is based on the processing of a Sentinel-2A image acquired in July 2024, from which three spectral indices were calculated: vegetation index, salinity index, and soil brightness index. These indices were integrated using map algebra techniques and a weighted model to estimate the spatial distribution of salt concentration on the soil surface. Data processing and spatial analysis were carried out using ERDAS IMAGINE software.

The results produced a thematic map showing the distribution of saline crusts and surface salt concentration, which is spatially consistent with the known conditions of the study area. These results provide a preliminary basis for identifying areas affected by salinization and for developing future research stages aimed at validating and refining the proposed model for territorial planning purposes.

Palabras clave

Salinización del suelo; teledetección; Sentinel-2A; índices espectrales; análisis espacial; altiplano boliviano.

1. Introducción

La salinización de los suelos constituye uno de los principales procesos de degradación de tierras a nivel mundial, especialmente en regiones áridas y semiáridas, donde las condiciones climáticas favorecen la acumulación de sales en el perfil del suelo. Este fenómeno provoca una disminución significativa de la productividad agropecuaria al afectar la disponibilidad de agua y nutrientes esenciales para el desarrollo de los cultivos (Fox Llerena, C. 2013). La salinidad del suelo se produce cuando existe una elevada concentración de sales solubles, principalmente cationes como sodio (Na^+), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), y aniones como cloruros (Cl^-) y sulfatos (SO_4^{2-}), los cuales alteran las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Fox Llerena, C. 2013)

La evaluación de la salinidad del suelo se realiza comúnmente mediante parámetros como la conductividad eléctrica (CE), que mide la concentración total de sales solubles presentes en el suelo. En general, un suelo se considera salino cuando la CE supera el umbral de 4 dS/m (equivalente a 4 mmhos/cm). Otro parámetro utilizado es el pH del suelo, el cual refleja su grado de acidez o alcalinidad y puede estar influenciado por la presencia de determinados tipos de sales, especialmente en suelos sódicos o salino-sódicos (Aguirre et al., 2011).

La distribución y variabilidad espacial de la salinidad del suelo está condicionada por diversos factores naturales y antrópicos. Entre los factores naturales destacan la naturaleza de la roca madre, la presencia de aguas subterráneas salinas, el balance hídrico negativo, la aridez climática y los procesos de erosión. Por su parte, los factores antrópicos incluyen prácticas agrícolas inadecuadas, el uso de aguas de riego con alta concentración de sales y sistemas de drenaje deficientes (Arceda Delgado, U. & Salmerón Chavarría, 2014). Asimismo, las características edafológicas, como la textura y la permeabilidad del suelo, influyen en la acumulación de sales, ya que los suelos de baja permeabilidad tienden a favorecer su concentración en superficie.

En las últimas décadas, el cambio climático ha intensificado los procesos de degradación de suelos en diversas regiones del mundo. Las alteraciones en los patrones de precipitación, junto con el incremento de la temperatura y la mayor evapotranspiración, generan balances hídrico negativos que favorecen la acumulación de sales en el suelo (Gutiérrez, 2020). Como consecuencia, la salinización se ha convertido en una amenaza significativa para la productividad agrícola y la sostenibilidad de los ecosistemas.

En el altiplano boliviano, particularmente en la región intersalar, la salinización del suelo constituye un problema ambiental y productivo relevante. Esta región presenta una importante actividad agropecuaria basada en cultivos andinos tradicionales como quinua (*Chenopodium quinoa*), papa (*Solanum tuberosum*), oca (*Oxalis tuberosa*) y papalisa (*Ullucus tuberosus*), así como en la crianza extensiva de ovinos y camélidos andinos. Estas actividades representan una fuente fundamental de sustento para las comunidades locales (Vallejos, 2011). Sin embargo, el incremento progresivo de la salinidad, asociado tanto al uso intensivo de la tierra como a condiciones climáticas cada vez más áridas, ha comenzado a afectar la productividad de estos sistemas.

En este contexto, la identificación y cartografía de áreas afectadas por salinidad se convierte en una herramienta fundamental para la gestión sostenible del territorio. La teledetección se ha consolidado como una herramienta eficiente para el monitoreo de la salinidad del suelo a escala regional, permitiendo detectar variaciones espaciales en la reflectancia asociadas a la presencia de sales en superficie (Velez Alvarado, D. 2019).

Las imágenes satelitales ópticas permiten analizar el comportamiento espectral de diferentes coberturas de la superficie terrestre en función de la reflectancia registrada en distintas longitudes de onda del espectro electromagnético. Entre los productos satelitales más utilizados en estudios ambientales se encuentran las misiones Landsat (NASA/USGS) y Sentinel-2 (Agencia Espacial Europea), cuyas imágenes son de libre acceso y poseen resoluciones espaciales y espectrales adecuadas para el monitoreo ambiental (García Rodríguez & Pérez González, 2010).

El comportamiento espectral de los suelos salinos presenta características particulares. En general, estos suelos muestran una mayor reflectancia en las bandas del visible y del infrarrojo cercano debido a la presencia de costras salinas en superficie, la escasa cobertura vegetal y la baja humedad del suelo. Estas características permiten diferenciar espectralmente suelos salinos de suelos no salinos mediante el uso de índices espectrales derivados de imágenes satelitales (Suárez, L. 2019).

Diversos estudios han demostrado que la combinación de índices espectrales derivados de imágenes satelitales permite identificar áreas afectadas por salinidad del suelo con un alto grado de confiabilidad (Allbed et al., 2014). Entre los índices más utilizados para este tipo de estudios se encuentran el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el Índice de Salinidad (SI) y el Índice de Brillo del Suelo (IB). El NDVI permite identificar la presencia y vigor de la vegetación, cuyos valores bajos o negativos suelen asociarse con suelos desnudos o degradados. Por su parte, los índices de salinidad y brillo del suelo permiten resaltar áreas con mayor reflectancia superficial, asociadas frecuentemente a la presencia de sales en superficie (García Rodríguez & Pérez González, 2010; Fenco Chavesta, A. 2018).

La integración de estos índices mediante técnicas de álgebra de mapas y modelos ponderados constituye una estrategia eficaz para identificar áreas con probabilidad de presencia de suelos salinos o afloramientos salinos superficiales.

En este contexto, el presente estudio forma parte de un programa de investigación orientado a la cartografía de suelos salinos en la región intersalar del altiplano boliviano. Este programa contempla dos fases principales: una primera fase basada en el análisis de imágenes satelitales para la detección de costras y afloramientos salinos superficiales, y una segunda fase orientada a la validación mediante muestreo de suelos y análisis de conductividad eléctrica en diferentes profundidades del perfil del suelo.

En consecuencia, el objetivo de esta investigación es: desarrollar un modelo de detección de afloramientos y suelos salinos superficiales mediante el análisis espacial de índices espectrales derivados de imágenes satelitales Sentinel-2A en la región intersalar del altiplano boliviano, comprendida entre los departamentos de Oruro y Potosí.

La zona de estudio forma parte del altiplano central andino y se caracteriza por presentar extensas planicies endorreicas asociadas a antiguos sistemas lacustres del Cuaternario. Geográficamente, el área se sitúa aproximadamente entre las latitudes $19^{\circ} 30'$ y $20^{\circ} 45'$ S y las longitudes $67^{\circ} 3'$ y $68^{\circ} 45'$ O.

La región presenta altitudes que oscilan entre 3 650 y 3 800 m.s.n.m., con una topografía predominantemente plana a suavemente ondulada, interrumpida por pequeñas serranías y depresiones donde se concentran depósitos salinos y sedimentos lacustres. Estos ambientes geomorfológicos favorecen procesos de acumulación de sales debido a la escasa pendiente y a las condiciones de drenaje limitado características de las cuencas endorreicas del altiplano (Risacher & Fritz, 2009).

Desde el punto de vista climático, la zona presenta un clima árido a semiárido característico del altiplano sur andino, con precipitaciones anuales que varían entre 150 y 350 mm, concentradas principalmente durante los meses de verano austral (diciembre a marzo). Las temperaturas medias anuales oscilan entre 7 y 10 °C, con una elevada amplitud térmica diaria y una fuerte evaporación potencial, condiciones que favorecen la acumulación de sales en la superficie del suelo (Vallejos, 2011)

Los suelos predominantes en la región corresponden a suelos poco desarrollados, generalmente asociados a depósitos aluviales y lacustres, con presencia frecuente de horizontes salinos o salino-sódicos. La baja precipitación, combinada con altos niveles de evaporación y drenaje limitado, favorece la formación de costras salinas superficiales, particularmente en áreas cercanas a los salares y en depresiones topográficas.

En este contexto, la creciente presencia de suelos salinos y afloramientos de sales en superficie representa un desafío para la sostenibilidad de los sistemas productivos locales, lo que justifica la necesidad de desarrollar herramientas de análisis espacial que permitan identificar y cartografiar estas áreas con mayor precisión.

La delimitación espacial del área de estudio utilizada en esta investigación se presenta en la Figura 1, donde se muestra la ubicación de la zona intersalar dentro del territorio boliviano

Figura 1: Zona de estudio



2. Metodología y Desarrollo

La metodología utilizada en esta investigación se basa en el análisis de imágenes satelitales mediante técnicas de teledetección y álgebra de mapas, con el objetivo de identificar áreas con presencia potencial de sales en la superficie del suelo. El procedimiento general seguido en el estudio se muestra esquemáticamente en la Figura 2 y comprende seis etapas principales: obtención y preprocesamiento de imágenes satelitales, cálculo de índices espectrales, clasificación preliminar de coberturas, análisis de coherencia espectral, construcción de un modelo ponderado de salinidad y generación del mapa final de salinidad potencial.

Obtención y preprocesamiento de imágenes satelitales. La información satelital utilizada corresponde a imágenes de la misión Sentinel-2A, obtenidas desde la plataforma Google Earth Engine. Mediante un script desarrollado en lenguaje JavaScript se realizó la selección y descarga de las bandas espectrales correspondientes al área de estudio.

Las bandas utilizadas fueron: B2 (azul), B3 (verde), B4 (rojo), B5 (red edge 1), B6 (red edge 2), B7 (red edge 3), B8 (infrarrojo cercano – NIR), B8A (narrow NIR), B11 (SWIR1) y B12 (SWIR2). Con el propósito de homogenizar la resolución espacial de los datos, todas las bandas fueron remuestreada a una resolución espacial de 20 m, generándose una colección multibanda compuesta por diez bandas espectrales ordenadas en dicha secuencia.

Cálculo de índices espectrales. A partir de las bandas espectrales se calcularon tres índices comúnmente utilizados en estudios de teledetección para la identificación de suelos salinos: el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el Índice de Salinidad (SI3) y el Índice de Brillo del Suelo (IB).

El NDVI se calculó mediante la relación entre las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y del rojo: $NDVI = \frac{(NIR - Rojo)}{(NIR + Rojo)}$. Este índice permite identificar la presencia y vigor de la vegetación, valores bajos o negativos suelen asociarse con suelos desnudos o con escasa cobertura vegetal, condiciones frecuentemente relacionadas con procesos de degradación del suelo.

El Índice de Salinidad (SI3) se calculó utilizando la relación entre las bandas SWIR1 y NIR:

$SI3 = \frac{(SWIR1 - NIR)}{(SWIR1 + NIR)}$. Este índice permite resaltar áreas con mayor reflectancia espectral asociada a la presencia de sales en la superficie del suelo.

El Índice de Brillo del Suelo (IB) se calculó mediante la siguiente expresión:

$IB = (Rojo^2 + NIR^2)^{0.5}$. Este índice permite identificar superficies con alta reflectancia, característica frecuente de costras salinas presentes en suelos afectados por salinidad.

Con el propósito de facilitar la integración de estos índices en un mismo modelo de análisis espacial, los resultados obtenidos fueron posteriormente reescalados a una escala digital de 8 bits (0–255).

Clasificación preliminar de cobertura de la tierra. A partir de los valores del NDVI reescalado se realizó una clasificación preliminar de cobertura de la tierra, con el objetivo de identificar patrones espaciales asociados a diferentes tipos de superficie presentes en el área de estudio.

Mediante la aplicación de umbrales preliminares se diferenciaron las siguientes clases de cobertura: cuerpos de agua, afloramientos salinos asociados a los salares, suelos desnudos, áreas agrícolas o en descanso y herbazales. El resultado de este proceso fue un mapa de cobertura de la tierra (CT), utilizado posteriormente como referencia para evaluar la coherencia entre los valores de los índices espectrales y las diferentes coberturas superficiales. La definición final de los rangos utilizados se presenta y discute en la sección de resultados.

Análisis de coherencia espectral. Con el fin de evaluar la consistencia de los índices calculados, se seleccionaron puntos de muestreo representativos para cada tipo de cobertura de la tierra identificada en el mapa preliminar. En cada punto se analizaron los valores correspondientes a los índices NDVI, SI3 e IB, verificando la coherencia espectral esperada según las características de cada tipo de superficie.

Este procedimiento permitió confirmar la correspondencia entre los valores espectrales de los índices y las coberturas identificadas, proporcionando una base para la construcción del modelo de detección de salinidad.

Modelo ponderado de detección de salinidad. Una vez verificada la coherencia entre los índices espectrales y las coberturas superficiales, se implementó un modelo ponderado con el objetivo de estimar la probabilidad de presencia de salinidad en la superficie del suelo.

El modelo integra los tres índices espectrales mediante la siguiente relación matemática:

$$SA = 0.4 \cdot NDVI + 0.4 \cdot SI3 + 0.2 \cdot IB$$

Donde SA representa el índice de salinidad estimado.

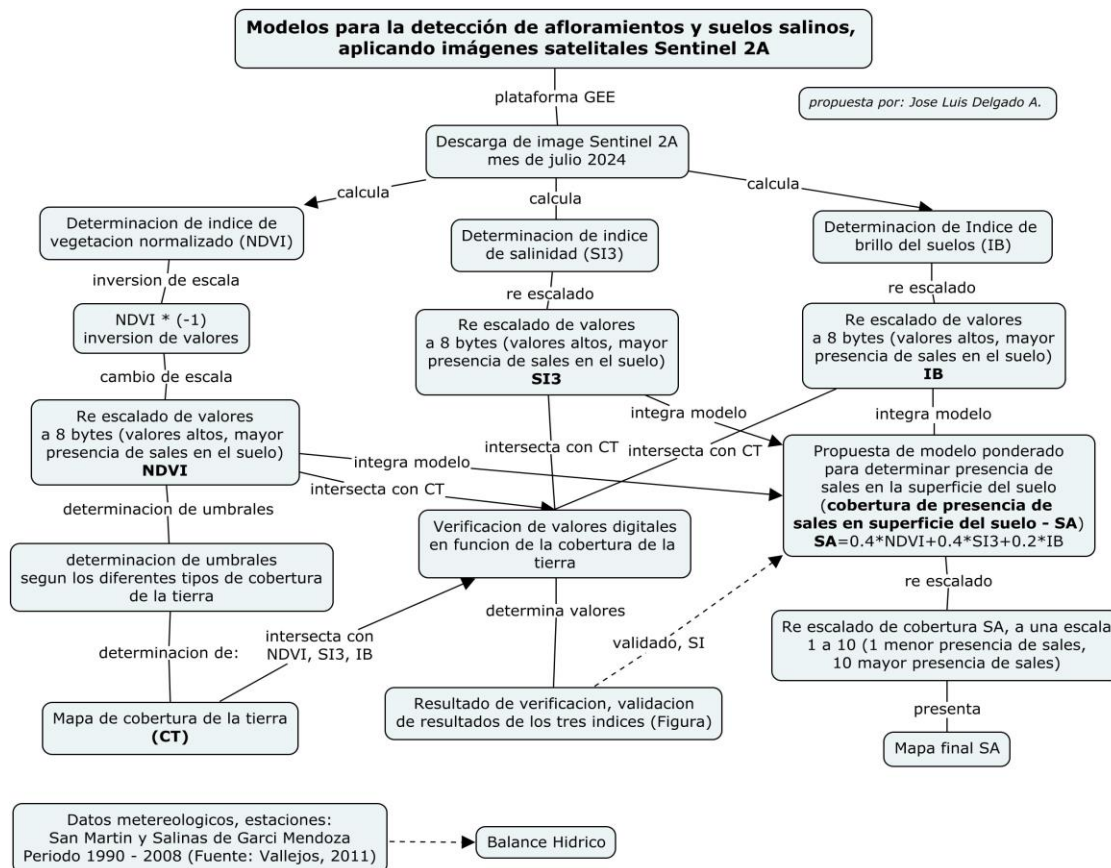
Los coeficientes asignados a cada índice reflejan su importancia relativa dentro del modelo, otorgando mayor peso al NDVI y al índice de salinidad debido a su mayor sensibilidad para identificar áreas con baja cobertura vegetal y características espectrales asociadas a la presencia de sales en superficie. El índice de brillo del suelo se incorporó como un indicador complementario relacionado con la presencia de costras salinas superficiales.

Finalmente, los valores obtenidos del modelo fueron reescalados a una escala ordinal comprendida entre 1 y 10, donde los valores más bajos representan menor presencia de sales y los valores más altos indican mayor probabilidad de salinidad superficial.

Procesamiento y análisis espacial. El procesamiento de las imágenes satelitales, el cálculo de los índices espectrales y la implementación del modelo espacial se realizaron mediante técnicas de álgebra de mapas utilizando el módulo de Model Maker del software ERDAS IMAGINE versión 2014.

El resultado final del proceso corresponde a un mapa temático que representa la distribución espacial de afloramientos y presencia potencial de sales en la superficie del suelo dentro del área de estudio.

Figura 2: Propuesta de metodología y estrategia de trabajo



3. Resultados

En esta sección se presentan los productos cartográficos y los resultados derivados del procesamiento de las imágenes satelitales y del modelo de análisis espacial aplicado para la detección de suelos salinos en el área de estudio.

3.1 Imagen satelital del área de estudio

La Figura 3 muestra la imagen satelital Sentinel-2A correspondiente al mes de julio de 2024 utilizada para el desarrollo del análisis espacial. La imagen presenta la cobertura superficial del área de estudio ubicada en la región intersalar entre los salares de Uyuni y Coipasa.

3.2 Balance hídrico de la zona de estudio

La Figura 4 presenta el balance hídrico agronómico correspondiente a dos estaciones meteorológicas ubicadas dentro del área de estudio, con base en los datos reportados por (Vallejos, 2011). En la

figura se muestran los valores mensuales de precipitación y evapotranspiración potencial utilizados como referencia para caracterizar las condiciones hidroclimáticas de la región.

Figura 3: Zona de estudio, imagen satelital Sentinel 2A, julio 2024

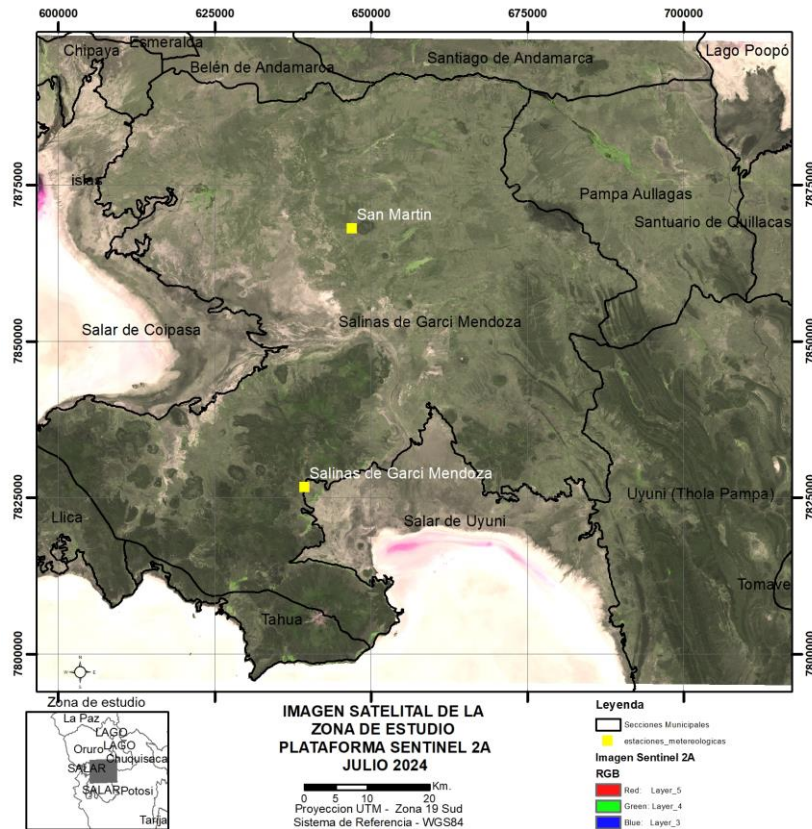
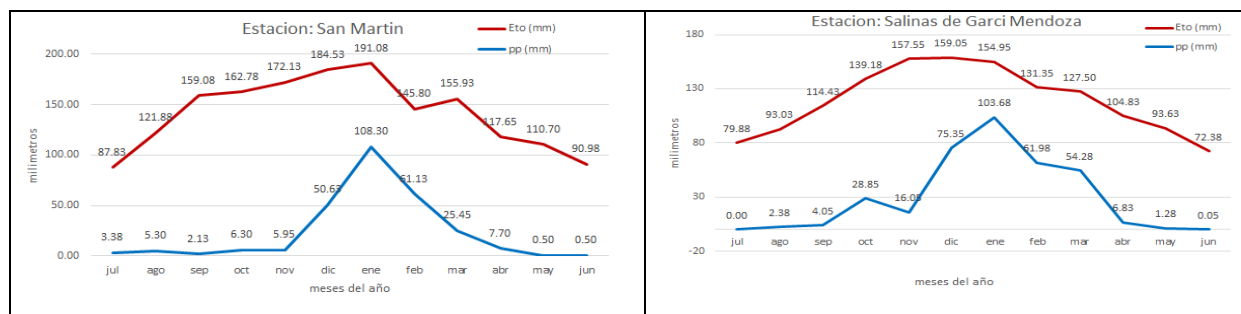


Figura 4: Balance Hídrico agronómico de dos estaciones meteorológicas de la zona de estudio



Fuente. Vallejos (2011)

3.3 Cobertura de la tierra

La identificación de las coberturas superficiales se realizó a partir del análisis del índice NDVI y de la respuesta espectral de diferentes superficies presentes en la zona de estudio.

La Figura 5 muestra las firmas espectrales obtenidas para los principales tipos de cobertura de la tierra identificados en el área de estudio.

A partir de estas firmas espectrales se generó el mapa de cobertura de la tierra presentado en la Figura 6, en el cual se distinguen diferentes clases de superficie presentes en el área de estudio.

Figura 5: Firmas espectrales de los tipos de cobertura de la tierra

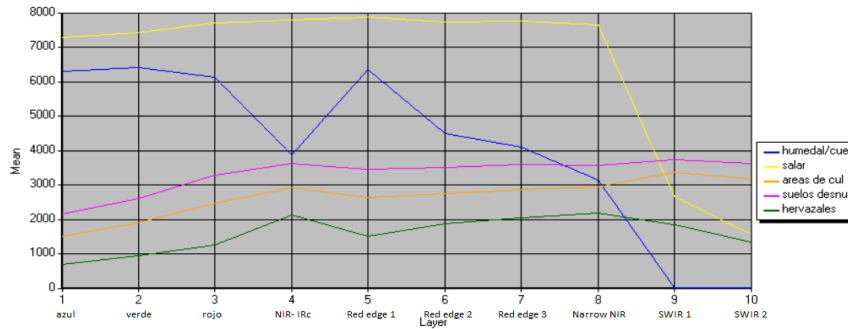
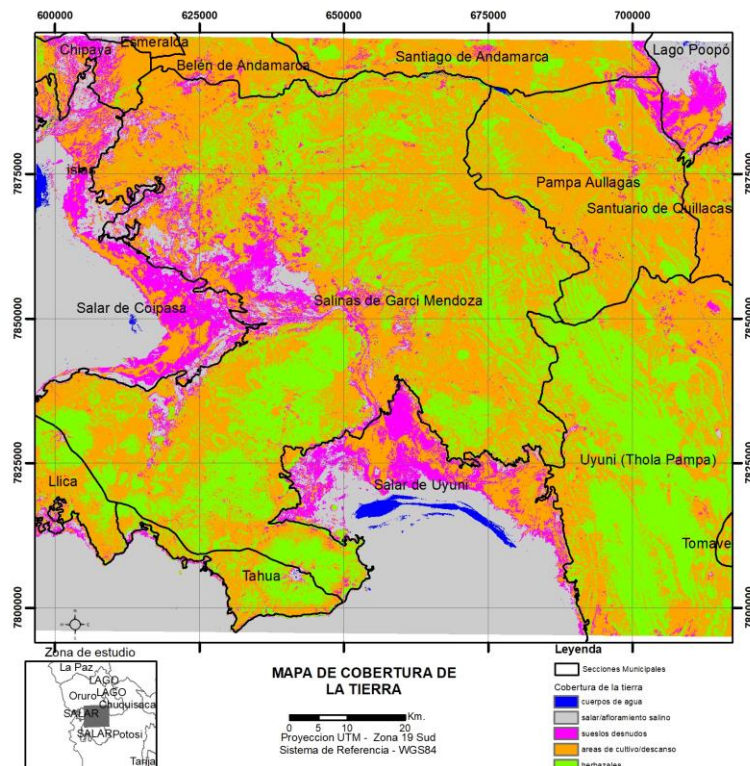


Figura 6: Mapa de cobertura de la tierra

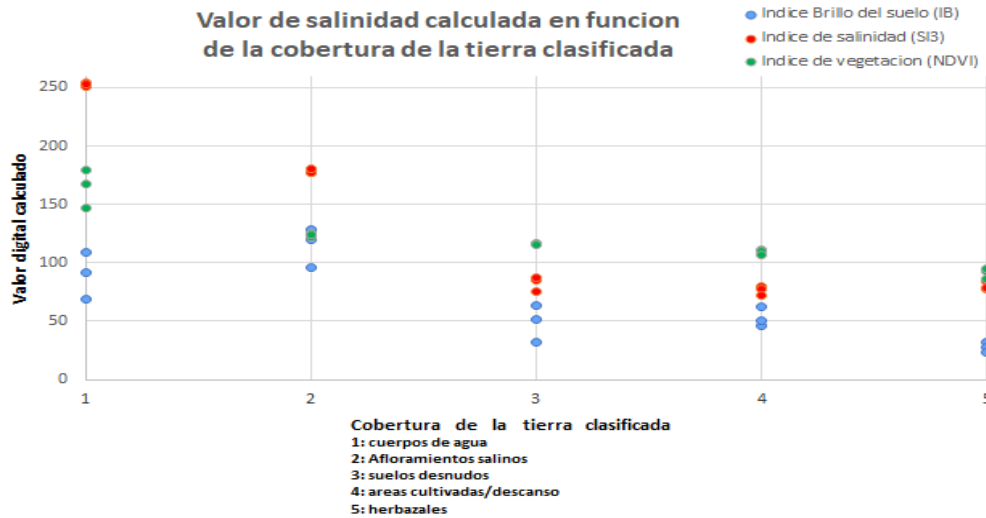


3.4 Verificación de valores de índices espectrales

Con el propósito de examinar la correspondencia entre los índices espectrales calculados y los tipos de cobertura identificados, se realizó una verificación de los valores obtenidos para los índices NDVI, SI3 e IB en puntos de muestreo representativos de cada clase de cobertura.

La Figura 7 muestra la relación entre los valores de los índices calculados y los diferentes tipos de cobertura de la tierra presentes en el área de estudio.

Figura 7: Valores de índices calculados versus cobertura de la tierra

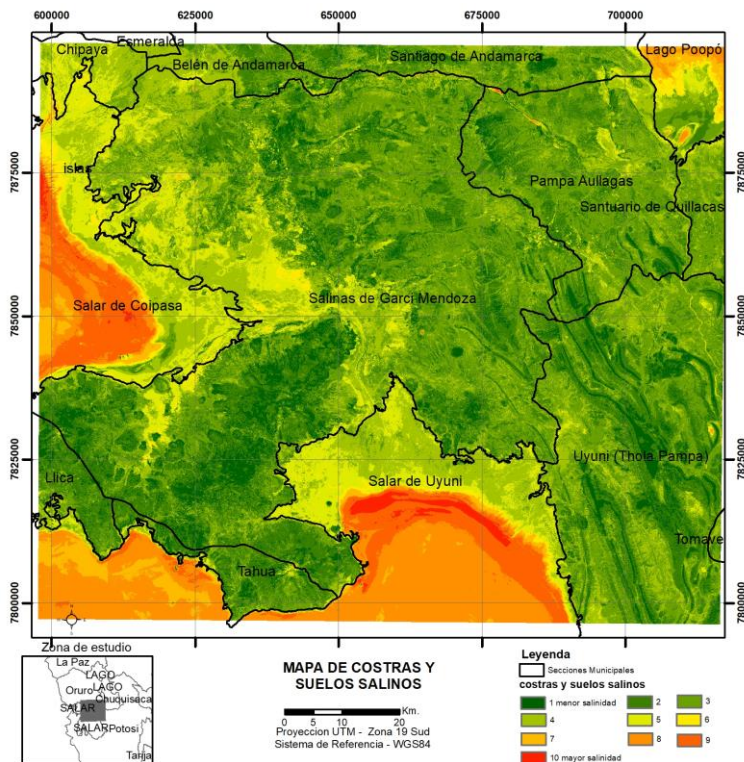


3.5 Mapa de afloramientos salinos y salinidad del suelo

Como resultado de la aplicación del modelo ponderado de análisis espacial se obtuvo el mapa de distribución de afloramientos salinos y presencia potencial de salinidad en la superficie del suelo.

La Figura 8 presenta el mapa final generado a partir de la integración de los índices NDVI, SI3 e IB mediante álgebra de mapas.

Figura 8: Mapa de costras y suelos salinos



4. Discusión

El área definida para la presente investigación corresponde a la región denominada intersalar, ubicada entre los salares de Uyuni y Coipasa en los departamentos de Potosí y Oruro (Figura 3), con una superficie aproximada de 12 001.7 km². Esta región presenta vocación agropecuaria, donde destacan la cría de ganado ovino y camélidos andinos, así como el cultivo de quinua, tubérculos y granos andinos. Desde el punto de vista climático, la zona presenta una temperatura media anual de 8.6 °C, con valores que varían aproximadamente entre 3.5 °C en invierno y 11.5 °C en verano, y una precipitación media anual cercana a 300 mm, con condiciones ligeramente más húmedas hacia el sector sur de la región (Vallejos, 2011).

El balance hídrico para la región evidencia una deficiencia de humedad durante la mayor parte del año, situación que se acentúa en el sector norte del área de estudio (Figura 4). En estas condiciones climáticas, la elevada demanda de evapotranspiración (ETP) favorece el ascenso capilar del agua desde las napas freáticas hacia la superficie del suelo. Debido a que estas aguas presentan generalmente altos contenidos de sales disueltas, este proceso contribuye a la formación de encostramientos salinos y acumulaciones superficiales de sales, fenómeno que afecta significativamente la productividad agrícola y la disponibilidad de pasturas para el ganado.

El mapa de cobertura de la tierra obtenido a partir del análisis del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) (Figuras 5 y 6) refleja de manera consistente las condiciones ambientales predominantes en la región. La distribución espacial de las coberturas identificadas muestra el predominio de suelos desnudos y áreas con vegetación escasa, características propias de ambientes áridos y semiáridos. En este contexto, diversos reportes locales señalan que durante la última década se ha observado una disminución en la producción agropecuaria, incluyendo la reducción de la cría de ganado ovino y una disminución en las poblaciones de camélidos andinos. Asimismo, se ha registrado una reducción en las superficies cultivadas con quinua, asociada tanto a factores ambientales como a variaciones en los precios de mercado.

Las firmas espectrales obtenidas para los diferentes tipos de cobertura (Figura 5) permitieron establecer patrones diferenciados de respuesta espectral entre las distintas superficies presentes en el área de estudio, lo que facilitó la delimitación de las clases de cobertura representadas en el mapa final (Figura 6).

El análisis de los valores de los índices espectrales NDVI, SI3 e IB en relación con los tipos de cobertura de la tierra (Figura 7) muestra una diferenciación consistente entre las superficies analizadas. En particular, se observa que las coberturas asociadas a suelos desnudos y afloramientos salinos presentan valores más altos en los índices relacionados con salinidad y reflectancia del suelo. Asimismo, se evidencia que los índices NDVI y SI3 presentan una mayor capacidad de diferenciación respecto al índice de brillo del suelo (IB). Este comportamiento fue considerado en la construcción del modelo ponderado de detección de salinidad, otorgando mayor peso relativo a los índices NDVI y SI3 dentro del modelo de integración espacial.

A partir de la aplicación del modelo ponderado propuesto (SA, Figura 2), se generó el mapa de afloramientos salinos y presencia potencial de salinidad en la superficie del suelo (Figura 8). Este producto cartográfico expresa la distribución espacial de la salinidad en una escala ordinal de 1 a 10, donde los valores más bajos indican menor probabilidad de presencia de sales y los valores más altos representan áreas con mayor probabilidad de salinidad superficial.

Es importante señalar que el mapa obtenido en esta investigación constituye un producto preliminar, cuya validación y consolidación dependerá de la segunda fase del estudio, en la cual se prevé realizar campañas de muestreo y análisis físico-químico de suelos en campo. Estos datos permitirán contrastar los resultados obtenidos mediante teledetección y ajustar el modelo propuesto, con el objetivo de generar un producto cartográfico final que pueda ser utilizado como herramienta de apoyo para la planificación territorial y la gestión sostenible de los recursos del suelo en la región intersalar.

5. Conclusiones

A partir del análisis realizado mediante técnicas de teledetección y modelización espacial, se pueden establecer las siguientes conclusiones principales:

- Las **imágenes satelitales de observación de la Tierra** constituyen una fuente de información fundamental para estudios relacionados con la evaluación y monitoreo de procesos de degradación del suelo. En particular, las imágenes **Sentinel-2A**, proporcionadas por la Agencia Espacial Europea (ESA), ofrecen productos de alta resolución espacial y espectral que permiten desarrollar análisis confiables para la identificación de patrones ambientales asociados a la salinidad superficial del suelo.
- La aplicación de **técnicas de análisis espacial y álgebra de mapas** permitió integrar diferentes índices espectrales derivados de imágenes satelitales, facilitando la construcción de un modelo de detección de salinidad basado en la combinación de los índices NDVI, SI3 e IB. Este enfoque permitió generar un producto cartográfico que representa la distribución espacial potencial de afloramientos salinos en la superficie del suelo.
- El **mapa de salinidad obtenido** muestra una distribución espacial coherente con las condiciones ambientales y el conocimiento previo de la región intersalar comprendida entre los salares de Uyuni y Coipasa, lo que sugiere que el modelo propuesto constituye una herramienta útil para la identificación preliminar de áreas afectadas por procesos de salinización y degradación del suelo.
- No obstante, los resultados obtenidos deben considerarse **de carácter preliminar**, ya que su validación requiere la realización de campañas de campo orientadas al muestreo y análisis físico-químico de suelos. Esta segunda fase permitirá contrastar los resultados obtenidos mediante teledetección con datos empíricos, así como ajustar o perfeccionar el modelo propuesto.
- Finalmente, se considera necesario continuar investigando la aplicación de **otros índices espectrales y métodos de análisis**, con el fin de mejorar la precisión de los modelos de

detección de salinidad del suelo. La integración de información satelital con datos de campo y análisis de laboratorio permitirá fortalecer la confiabilidad de los productos cartográficos generados y su aplicación en procesos de **planificación territorial y gestión sostenible de los recursos del suelo**.

Referencias

- Aguirre, M. E., Elisei, V. R., Commegna, M. A., & Santamaría, R. M. (2011). Evolución de la salinidad en un suelo irrigado del sudoeste bonaerense. <https://core.ac.uk/download/153564173.pdf>
- Arceda Delgado, U., & Martin Salmeron Chavarria, G. (2014). Evaluación de la potencialidad de los suelos en sistemas productivos en la parte alta y media, Río Cállico, San Dionisio. <https://core.ac.uk/download/129439030.pdf>
- Fenco Chavesta, A. (2018). Observaciones satelitales de salinidad superficial en el Océano Atlántico Sudoccidental: Intercambios entre plataforma y talud. [PDF]. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/162128092.pdf>
- Fernández Fierro, A. (2019). Evaluación multitemporal del cambio de cobertura y uso del suelo en la cuenca baja del Río Chambo. <https://core.ac.uk/download/234588743.pdf>
- Fox Llerena, C. (2013). Evaluación de pérdida de suelo por salinización en la parte baja de la Cuenca del Jequetepeque: San Pedro de Lloc (1980-2003). <https://core.ac.uk/download/196535557.pdf>
- García Rodríguez, M. P., & Pérez González, M. E. (2010). Cartografía mediante imágenes Landsat de suelos salinos en la tierra de Medina, <https://core.ac.uk/download/234052744.pdf>
- Gutiérrez, M. (2020). Impacto de la salinidad en la producción agrícola en regiones secas. *Revista de Ciencias Agrarias*, 25(2), 145-160.
- Ines Fernandez Gallo, B. (2019). Producción de cartografía agrícola mediante análisis multitemporal de imágenes satélite (Sentinel 2) y cartografía catastral. https://riunet.upv.es/bitstream/10251/114801/1/memoria_26662986.pdf
- Jesús Pasapera Gonzales, J. (2016). Validación de la emisividad y temperatura de la superficie del suelo usando datos del satélite LANDSAT 8. [PDF]. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/154179122.pdf>
- Lino Suárez, L. (2019). Comportamiento espacial y temporal de la salinidad de suelos y aguas del centro de apoyo Manglaralto UPSE. <https://core.ac.uk/download/234168327.pdf>
- Risacher, F., & Fritz, B. (2009). Origin of salts and brine evolution of Bolivian and Chilean salars. *Aquatic Geochemistry*, 15, 123–157.
- Toapanta Moreno, Z. (2019). Estudio multitemporal de la cobertura vegetal de los ecosistemas de la zona sur de la provincia de Chimborazo a través de imágenes satelitales “Landsat 8”. <https://core.ac.uk/download/234578477.pdf>

Vallejos P, Navarro Z, Ayaviri D, (2011). Medio ambiente y producción de quinua, estrategias de adaptación a los impactos del cambio climático, PIEB – Danida.

Vélez Alvarado, D. (2019). Análisis multitemporal de una serie de imágenes Sentinel-1 y detección de cambios del uso de suelo para la evaluación de la reserva ecológica Manglares Churute y sus alrededores en Guayas - Ecuador

<https://core.ac.uk/download/223241398.pdf>