

AUTOCORRELACIÓN ESPACIAL DE LA COBERTURA DEL SUELO Y EL FENÓMENO DE EL NIÑO OSCILACIÓN DEL SUR EN SU FASE EXTREMA EL NIÑO, AÑOS 2015-2016

Spatial Autocorrelation of Land Cover and El Niño Southern Oscillation on its extreme El Niño phase of years 2015-2016

Alfredo Salvador Gálvez Sinibaldi

Dr. en Geomquímica
alfredog0707@gmail.com

Mayra Virginia Castillo Montes

Dra. en Educación
mayracastillom@yahoo.com

Jose Luis Argueta Mayorga

Dr. en Ciudad Territorio y Sostenibilidad
jlam.argueta@gmail.com

Walter Arnoldo Bardales Espinoza

Mtr. en Recursos Hidráulicos
bardaleswa@gmail.com

Eugenio Miguel Polanco Sotoj

Estudiante de Ingeniería Industrial
eugenio.polanco.ing@gmail.com

Recibido: 9 de mayo de 2024 | Revisado: 17 de junio de 2024 | Aprobado: 15 de julio de 2024

Resumen

El estudio de la autocorrelación espacial de la cobertura del suelo y el fenómeno El Niño Oscilación del Sur – ENSO, pone de manifiesto la influencia de este fenómeno sobre el territorio de Guatemala. Se determinó que existe una correlación espacial positiva para las tierras agrícolas en la fase de La Niña del ENSO, y de la misma manera una correlación positiva para pastizales en la fase El Niño del ENSO. El análisis del agrupamiento de LISA permite establecer regiones del territorio que comparten similitudes en los valores de correlación espacial. Los pastizales, en la región oriental del país, se extienden durante los años El Niño. Mientras las tierras agrícolas disminuyen en el mismo período. En el caso de las tierras forestales, los valores de autocorrelación y agrupamiento no son estadísticamente significantes y se muestran dispersos en las regiones tradicionalmente consideradas bosques naturales.

Palabras clave

El Niño Oscilación del Sur, ENSO, El Niño, La Niña, autocorrelación espacial, LISA, Moran I, Corredor seco de Guatemala.

Abstract

The study of the spatial autocorrelation of land cover and the El Niño Southern Oscillation – ENSO phenomenon, reveals the influence of this phenomenon on the national territory. It was determined that there is a positive spatial correlation for agricultural lands in the La Niña phase of ENSO, and in the same way a positive correlation for grasslands in the Niño phase of ENSO. The LISA cluster analysis allows to establish regions of the territory that share similarities in the spatial correlation values. Grasslands, in the eastern region of the country, extend during El Niño years, while agricultural lands decrease in the same period. In the case of forest lands, the autocorrelation and clustering values are not statistically significant and are dispersed in the regions traditionally considered natural forests.

Keywords

El Niño Southern Oscillation, ENSO, El Niño, La Niña, , spatial autocorrelation, LISA, Moran I, Guatemala's Dry Corridor.

Introducción

Los parámetros estadísticos como el índice de Morán (Moran I) o el Índice de Geary (Geary C), son ampliamente utilizados en el análisis de autocorrelación espacial (Chen, 2020). El índice de Moran I, ha sido adoptado para caracterizar los patrones espaciales en datos de cobertura del suelo (Su, et al., 2011; Das & Ghosh, 2017), o para medir perturbaciones del paisaje (Pierre, et al., 2015). Cambios en la cobertura del suelo, como la deforestación o el aumento de las áreas urbanas, pueden detectarse desde el espacio por los satélites que recogen datos constantemente de la superficie terrestre.

El período 2015-2016 se caracteriza por sus condiciones extremas en el fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENSO) en su fase El Niño, al presentar un índice ONI3-4, que mide la anomalía de temperatura sobre la superficie del océano Pacífico, de 1.52, un valor muy por encima del 0.5 que indica el inicio de condiciones El Niño.

Los resultados que se presentan en este artículo forman parte de una investigación que utiliza datos de teledetección del satélite Landsat 8, para proporcionar una visión integral de las transformaciones que ocurren dentro de la región conocida como el Corredor Seco de Guatemala. Las imágenes multiespectrales de alta resolución (30 m/píxel) del satélite ofrecen información fidedigna sobre el uso del suelo y los cambios en el uso del suelo a lo largo del tiempo.

Al aprovechar esta tecnología, este estudio tuvo como objetivo analizar la interacción entre los fenómenos climáticos naturales, como el fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENSO), y las actividades humanas, incluida la agricultura y la deforestación, en la configuración del paisaje del Corredor Seco de Guatemala.

Desarrollo del estudio

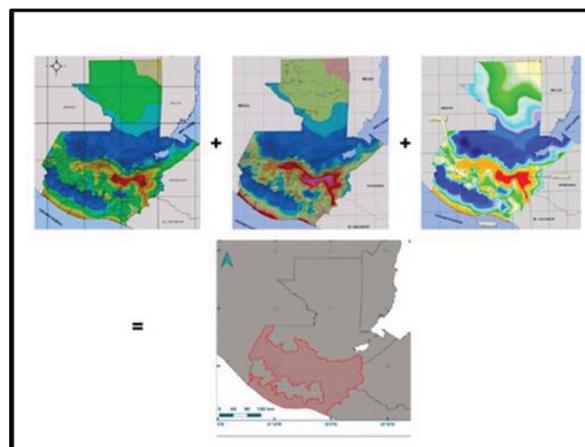
1. Delimitación del área de estudio

Para determinar el área de estudio se combinan los datos de los mapas de Amenaza de Sequía (MAGA, 2005; INSIVUMEH, 2014), el mapa de Probabilidad de Ocurrencia de Sequías

(Rainforest, 2020) y el mapa de Aridez (Pons, et al., 2018). Estos datos se conjugan con el análisis de precipitación y temperatura de Thornthwaite y se calcula el índice estandarizado de precipitación (SPI). Como resultado de esa combinación de datos y mapas se establecen los límites del área de estudio, la cual difiere considerablemente con el área definida por las entidades gubernamentales (SEGEPLAN, MAGA) como Corredor Seco de Guatemala. El área así definida comprende 199 municipios, una superficie de más de 50,000 Km² y afecta potencialmente a una población de aproximadamente 11 millones de habitantes. La Figura 1 muestra el área de estudio.

Figura 1.

Mapa del área de estudio



Nota. Mapa del área de estudio. Elaboración propia.

2. Correlación de Pearson

El índice de correlación de Pearson es una medida estadística que cuantifica la relación lineal entre dos variables cuantitativas. En este caso se calcula el índice de correlación de Pearson para cada una de las clases con el Índice del Niño Oceánico publicado en el portal de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos de América (NOAA).

Para los propósitos de la correlación espacial, se utilizan los datos de cobertura del suelo que incluyen los años 1999, 2003, 2010 obtenidos por interpretación de las bases de datos del MAGA y del período 2013 a 2022 derivados de la interpretación de las imágenes del satélite Landsat 8 y se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1.

Valores anuales de cobertura del suelo, por clase (Km²), y valor del Índice ONI

Años	T. Forestales	T. Agrícolas	Pastizales	Humedales	Infraestructuras	Otras Tierras	ONI 3.4
1999	10364.9	22009.2	6443.2	480.2	402.1	110.3	-1.23
2003	9169.1	12845.6	16878.3	1180.4	21.8	61.8	0.267
2010	8739.3	14548.8	15307.5	450.8	763.4	348	-0.43
2013	13525.5	11068.7	14471.8	203.8	602.6	77.2	-0.263
2014	8218.9	13806.6	17388.8	180.1	521.1	69.8	0.17
2015	9961.8	13904.2	15624	185.7	478.3	52.6	1.52
2016	8038.6	11510.5	19837.4	164	586.6	68.8	0.391
2017	8275.1	11248.2	19520.3	156.6	892.6	115.3	-0.143
2018	9575.1	12885.9	16960.4	168.5	564.9	51.7	0.071
2019	8689.8	13174.8	17497.2	157.8	640.5	47.6	0.475
2020	8287	12781.9	18304.1	158.4	627.9	48.7	-0.367
2021	11160.3	10559.3	17463.2	174.5	732.8	76.8	-0.725
2022	9519.1	12336	17317.3	175	750	51.9	-0.942

Nota. Elaboración propia.

3. Autocorrelación Espacial

Índice de Correlación de Moran I

El índice de Moran I, es una medida estadística que se utiliza para evaluar la autocorrelación espacial, es decir, la similitud de valores para una variable determinada en ubicaciones vecinas del espacio geográfico bajo estudio. El índice de Moran evalúa si los valores de una variable están agrupados, dispersos o distribuidos aleatoriamente en el espacio geográfico.

Se calcula mediante la fórmula:

$$I = \frac{N}{W} \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

donde:

N: número total de puntos analizados,

w_{ij}: es la matriz de pesos espaciales (contigüidad)

x_i y x_j son los valores de la variable de interés en las ubicaciones i y j respectivamente.

\bar{x} : es el promedio de la variable de interés en todos los puntos.

W: es la suma de todos pesos espaciales w_{ij}, es decir, $\sum_i \sum_j w_{ij}$.

En el presente estudio la matriz de pesos w_{ij} se calcula utilizando el criterio de contigüidad, el cual se basa en los vecinos más cercanos para explicar cómo la proximidad inmediata entre unidades afecta la relación espacial.

El criterio de contigüidad, en el análisis de correlación espacial, se refiere a cómo se determinan las relaciones o conexiones espaciales entre las diferentes unidades geográficas o puntos en el espacio. Este criterio es fundamental para definir la matriz de pesos espaciales w_{ij}, que es crucial en el cálculo de medidas de autocorrelación espacial, como el Índice de Moran.

Cuando se utiliza el método de vecinos más cercanos k=4, el criterio de contigüidad se basa en identificar las cuatro unidades geográficas o puntos más cercanos a cada unidad o punto de interés. Es decir, para cada punto o área en el análisis, se determinan sus cuatro vecinos más cercanos, y estas conexiones se utilizan para definir la matriz de pesos espaciales.

Gráfico de dispersión de Moran

El índice de Moran I, y el gráfico de dispersión de Moran son herramientas utilizadas para determinar la dependencia espacial de las

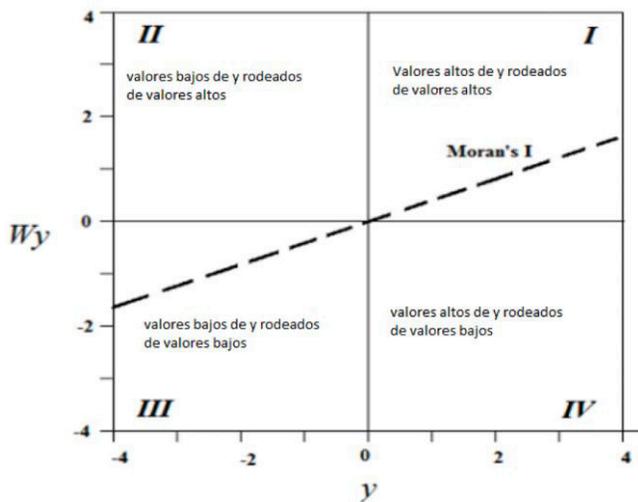
variables estudiadas. El valor-p del índice de Moran, se calcula para determinar la presencia de dependencia espacial. El eje “X” del diagrama de dispersión muestra el valor estandarizado de la variable evaluada, mientras el eje “Y” muestra el valor del rezago espacial estandarizado de la misma variable. Esto produce un diagrama dividido en 4 cuadrantes, donde:

- Cuadrante I: valores altos de “y” rodeados de valores altos.
- Cuadrante II: valores bajos de “y” rodeados de valores altos.
- Cuadrante III: valores bajos de “y” rodeados de valores bajos.
- Cuadrante IV: valores altos de “y” rodeados de valores bajos.

El gráfico de dispersión del índice de Morán se explica en la Figura 2 que se presenta a continuación.

Figura 2.

Explicación del gráfico de dispersión de Moran



Nota. La pendiente de la línea corresponde al Índice de Moran.

Agrupamiento de LISA

El agrupamiento de LISA, (Local Indicators of Spatial Association, por sus siglas en inglés), se refiere a una técnica en análisis espacial que busca identificar patrones de agrupación espacial a nivel local. En contraste con las medidas globales de autocorrelación espacial, como el Índice de Moran, los indicadores LISA permiten detectar

áreas donde existe una concentración significativa de valores similares (altos o bajos), revelando así la presencia de clusters espaciales o la existencia de patrones espaciales aleatorios.

Para cada ubicación i , se calcula un indicador LISA, que típicamente es una versión local del Índice de Moran. Este indicador local de Moran I_i se calcula de acuerdo con la expresión 2:

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{S^2} \sum_{j=1}^n w_{ij}(x_j - \bar{x}) \quad (2)$$

donde:

x_i : es el valor de la variable de interés en la ubicación i .

\bar{x} : es el valor promedio de la variable de interés en todas las ubicaciones.

S^2 : es la varianza de los valores de la variable de interés.

w_{ij} : es un elemento en la matriz de pesos espaciales que define la relación espacial entre las ubicaciones i y j .

n : es el número total de ubicaciones.

Resultados obtenidos

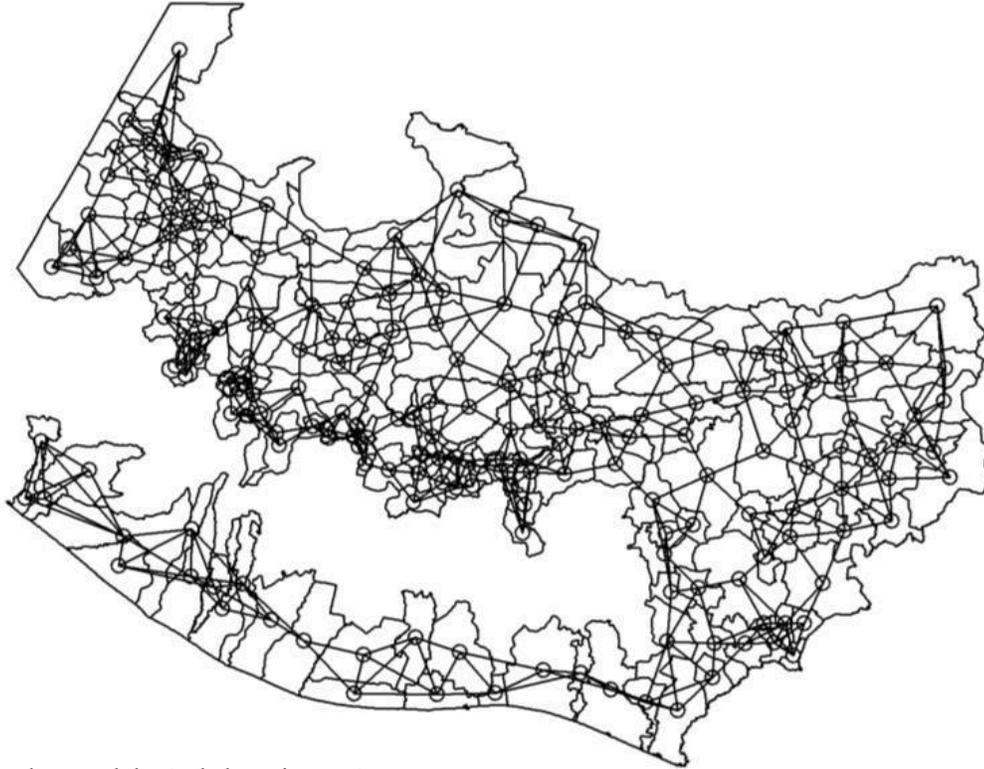
El análisis espacial de las imágenes satelitales permite establecer el tipo de cobertura del suelo a todo lo largo del área de estudio. Se generan mapas de cobertura para cada año del período estudiado, detectándose cambios en la cobertura del suelo que podrían estar relacionados con las condiciones climáticas imperantes en los años comprendidos en el período de estudio que abarca del 1999 al 2022, principalmente relacionadas con las fases extremas del Fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENSO).

Correlación Espacial

Se determina la contigüidad de los datos utilizando el método de k vecinos más cercanos (kNN) con un criterio de $k=4$. Este procedimiento brinda, al mismo tiempo, la matriz de pesos espaciales utilizada posteriormente en el cálculo del Índice de Moran y el agrupamiento de LISA (Anselin, 1995). Como resultado se observa, en la Figura 3, que existe contigüidad en los datos del área de estudio.

Figura 3.

Patrón espacial de la contigüidad de los datos

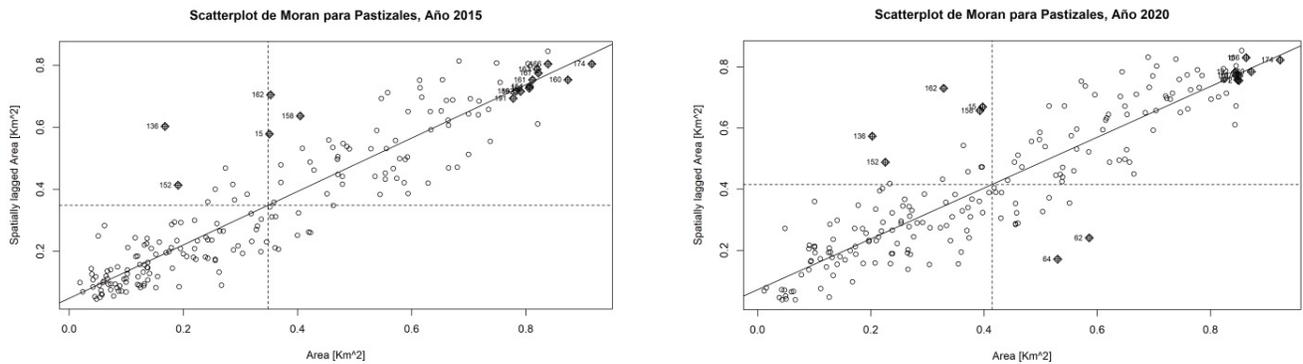


Nota. Se utiliza la metodología de k vecinos más cercanos.

Se calcula el índice de Moran I, para las clases Tierras Forestales, Tierras Agrícolas y Pastizales, y posteriormente, se construye el diagrama de dispersión correspondiente para cada clase y año del período de estudio. En la Figura 4, se presenta el diagrama de dispersión para el año 2015 (Niño) y para el año 2020 (Niña) para la cobertura del suelo perteneciente a la clase Pastizales.

Figura 4.

Diagrama de dispersión de Moran para la clase pastizales



Nota. La representación corresponde al evento Niño (2015) y el inicio de un evento Niña (2020). Elaboración propia.

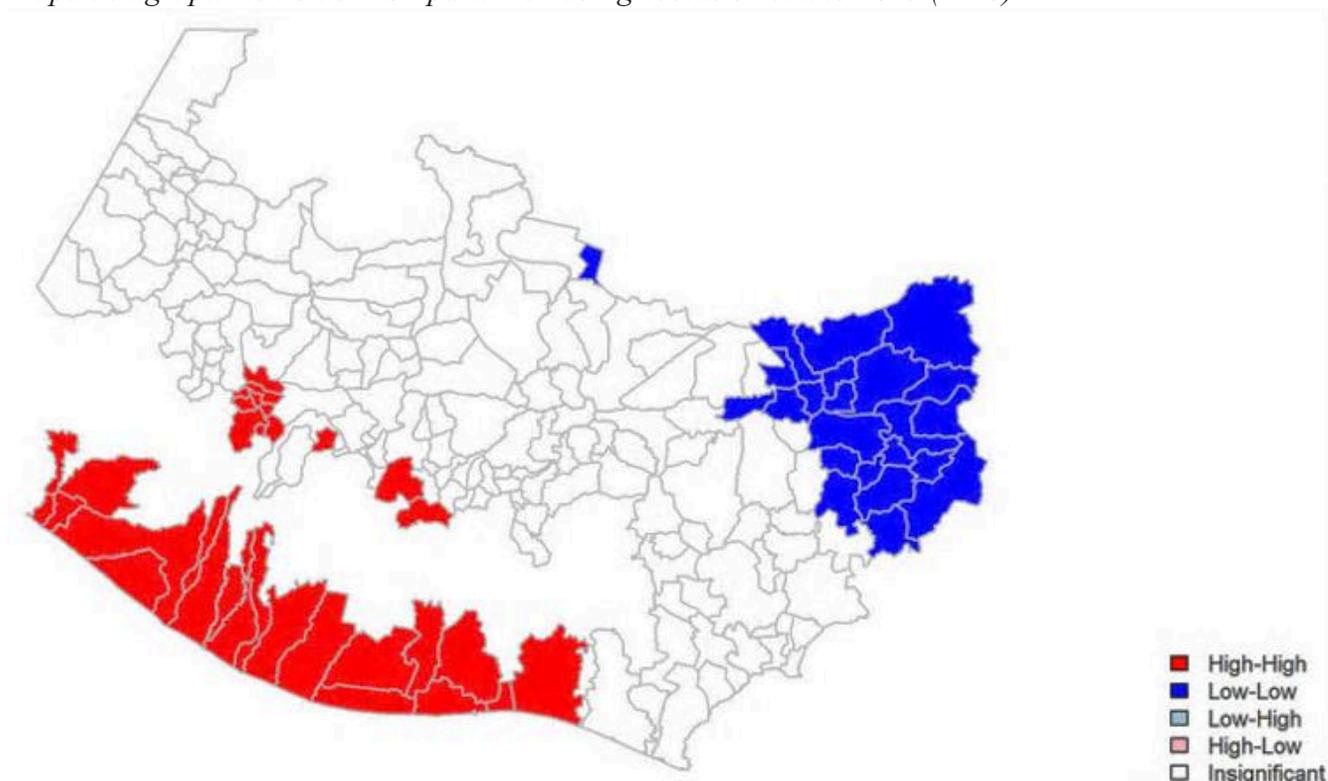
Una vez realizada la autocorrelación espacial (cálculo del índice de Moran y diagrama de dispersión), se procede a elaborar los mapas de agrupamiento de LISA. Esta metodología permite visualizar, de una mejor manera, el agrupamiento de los datos y su relación con los eventos del fenómeno ENSO.

Para el año 2015 (Niño), en la clase de Tierras

Agrícolas, se distinguen dos regiones de agrupamiento focalizado: por un lado la costa sur del país que es una región eminentemente agrícola con relaciones de Cuadrante I: valores altos de “y” rodeado de valores altos y de Cuadrante III, valores bajos de “y” rodeado de valores bajos en la región oriental del país donde abundan los pastizales. Lo cual puede observarse en la Figura 5.

Figura 5.

Mapa de agrupamiento de LISA para Tierras Agrícolas en el año 2015 (Niño)



Nota. Elaboración propia.

Para interpretar el agrupamiento de LISA, se atribuyen los puntos (en este caso los municipios) de valores altos rodeados de valores altos (en rojo), a aquellos lugares donde la correlación entre la cobertura espacial y la fase del fenómeno de El Niño tiene valores altos.

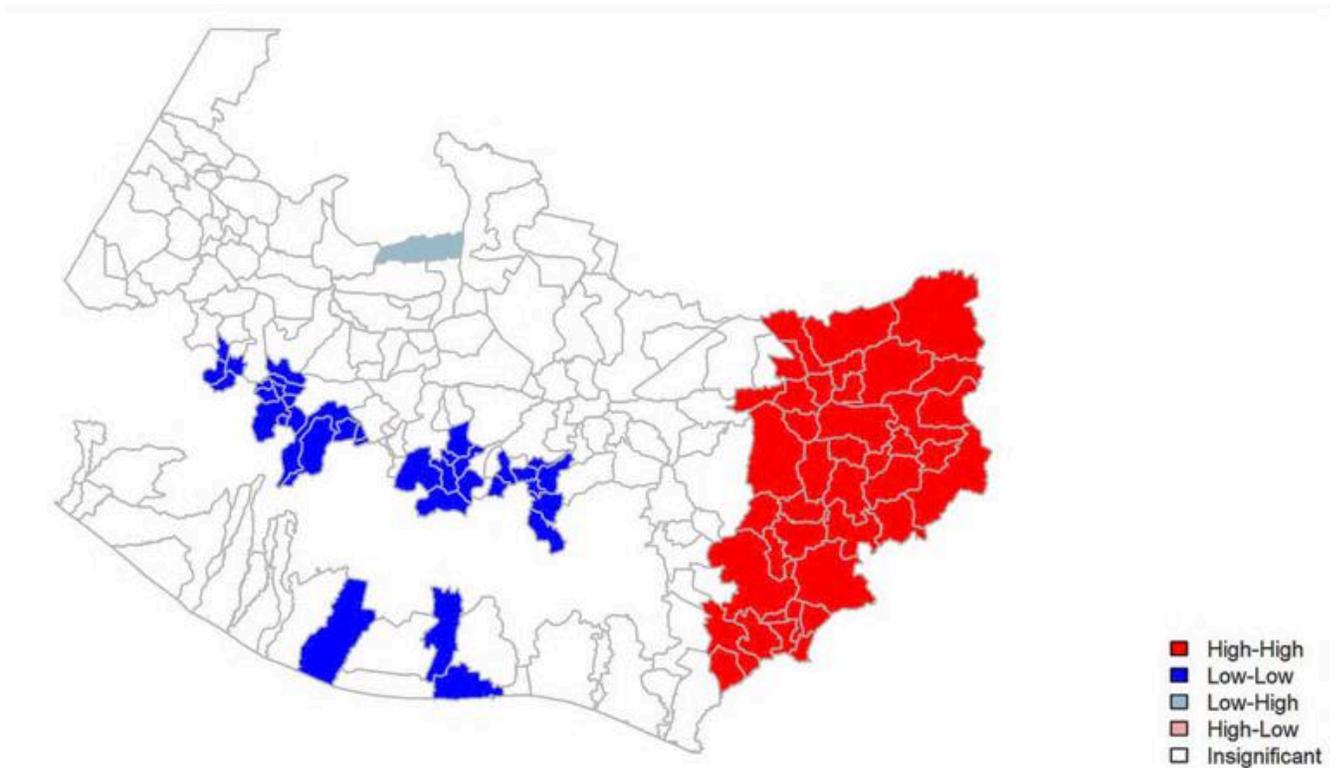
En el caso de las tierras agrícolas la correlación es negativa, pero con valores altos. El área cubierta por pastizales presenta valores bajos cuando se evalúa la cobertura de tierras agrícolas,

y sobresale por lugares con valores bajos rodeados de valores bajos.

Alternativamente, en la Figura 6, se presenta el mapa correspondiente al agrupamiento espacial de LISA para la cobertura del suelo perteneciente a la clase pastizales para el mismo año. Este gráfico muestra una correlación alta-alta para la zona oriental y baja-baja para las regiones predominantemente forestales del altiplano y las agrícolas de la costa sur.

Figura 6.

Mapa de agrupamiento de LISA para Pastizales en el año 2015 (Niño)



Nota. Elaboración propia.

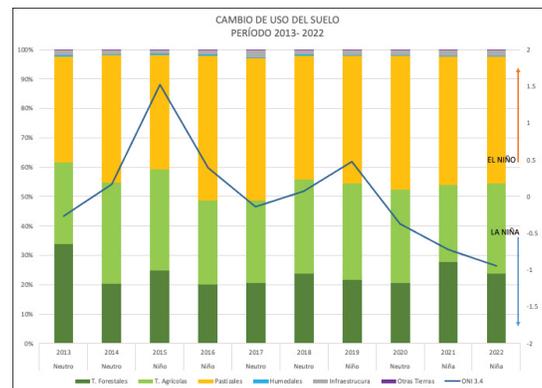
Discusión de resultados

Se identifican cambios a nivel anual en las clases de interés tomando como línea base la interpretación de la imagen satelital representativa del año 2013. La Figura 7 muestra un resumen de los datos de cobertura del suelo generados por la interpretación de las imágenes satelitales que corresponden al período 2013 a 2022.

Se atribuye el cambio, en parte, al impacto del fenómeno El Niño Oscilación del Sur – ENSO. Esto se comprueba al correlacionar las clases de cobertura del suelo con la fase correspondiente al fenómeno ENSO en cada año, como se demostró en los resultados y se muestra en la Figura 7.

Figura 7.

Influencia de la fase del fenómeno El Niño sobre la cobertura del suelo en el área de estudio



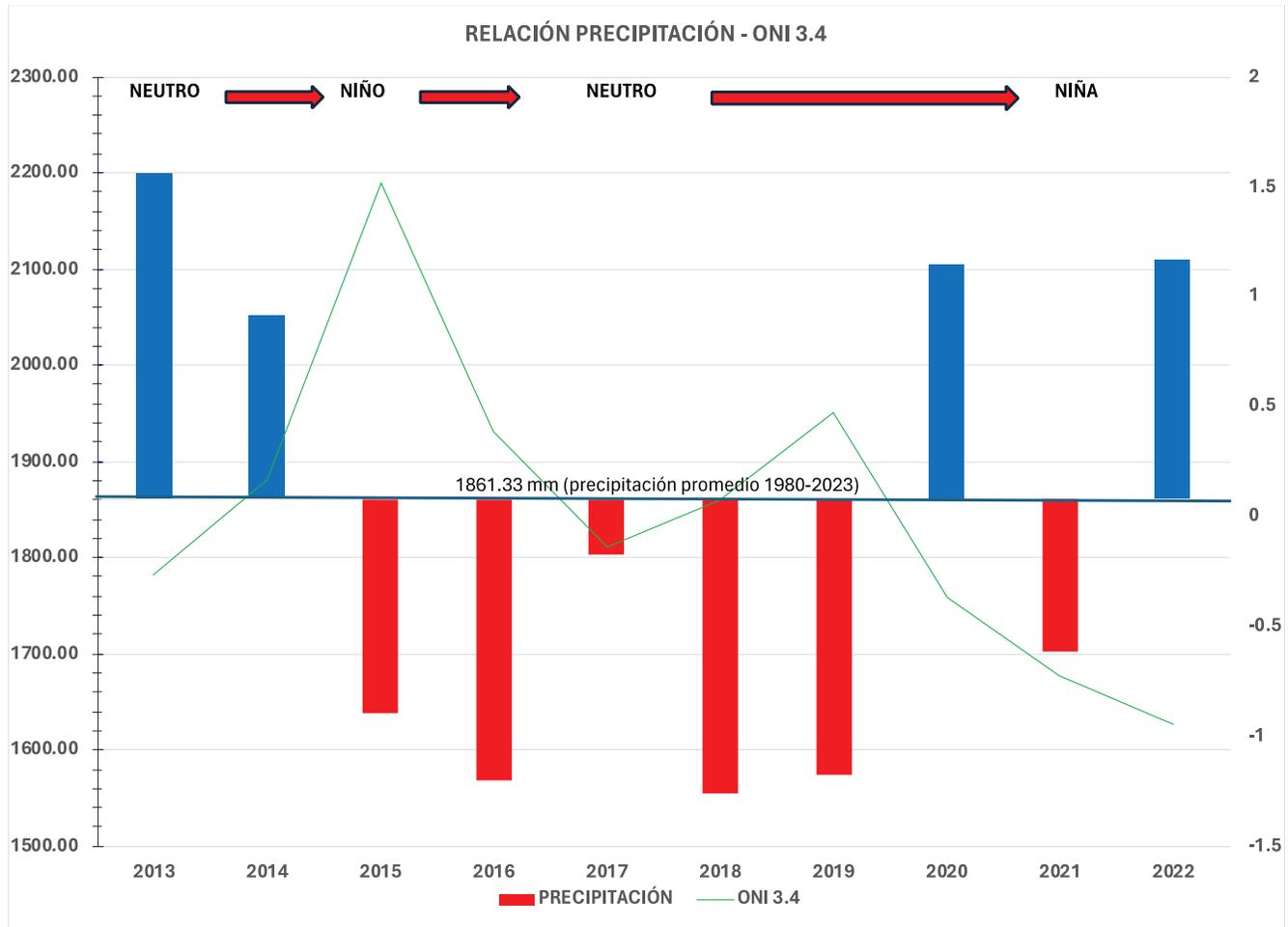
Nota. Elaboración propia.

Como se aprecia en la Figura 8, la fase del ENSO influye en los patrones de precipitación y por lo tanto en la cantidad de lluvia que recibe el país en un año determinado. De especial atención es el

período 2015 a 2019, en el cual el país recibe cantidades de lluvia por debajo del promedio establecido para el período 1980-2023, el cual es de 1861 mm de lluvia anualmente.

Figura 8.

Relación de la precipitación anual (mm) y el valor promedio anual del Índice Oceánico El Niño (ONI)



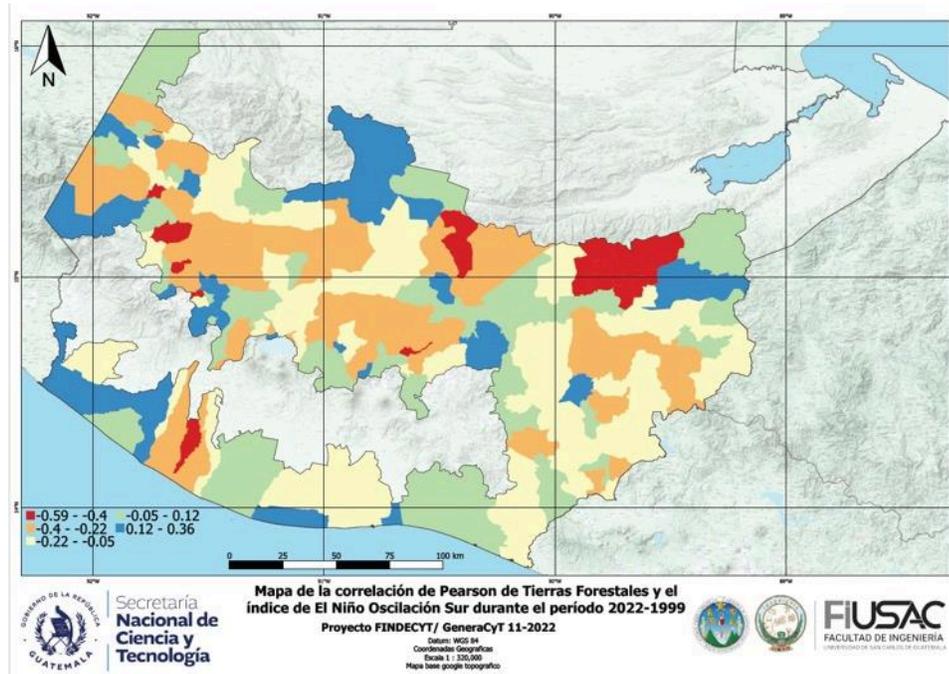
Nota. Periodo de 2013 a 2022. Elaboración propia.

Existe un grado de correlación entre la fase del ENSO (El Niño/La Niña) y las diferentes coberturas que se analizan en esta investigación. En el caso de las tierras forestales, el índice de correlación de Pearson tiene un valor negativo al considerar el período de estudio. Sin embargo, al relacionar el valor del índice con la ubicación geográfica de la distribución de tierras forestales,

ver la Figura 9, se observan regiones cercanas con valores disímiles tanto en el altiplano como en el oriente del país. Así como regiones con valores homogéneos, lo cual sugiere que existe cierto grado de correlación espacial en los datos. Ese patrón se repite, con diferente distribución espacial, para las clases Tierras Agrícolas y Pastizales.

Figura 9.

Distribución espacial de los valores del índice de Pearson



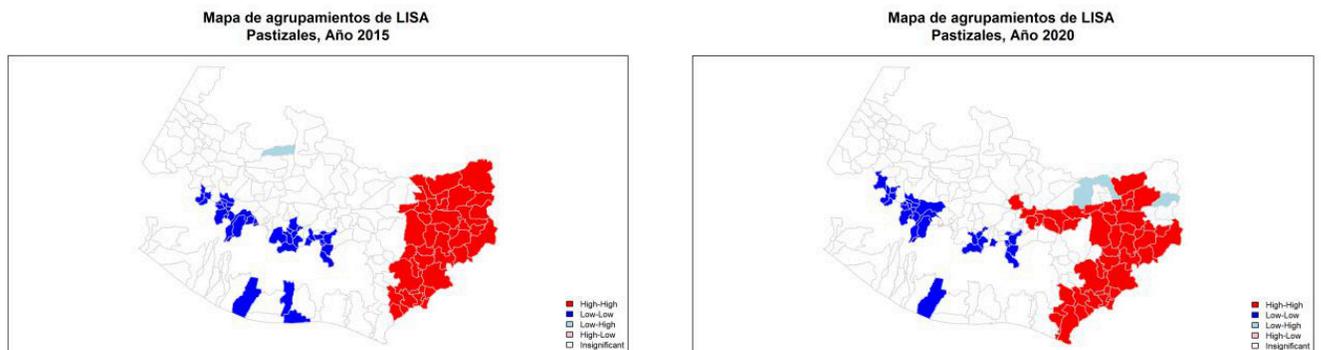
Nota. La figura muestra la correlación entre la cobertura de Tierras Forestales y la fase del fenómeno ENSO durante el período 1999-2022. Elaboración propia.

Al realizar el análisis de autocorrelación espacial, utilizando los índices de Pearson, Geary C y Getis para cada una de las clases, en cada uno de los años del período de estudio, se obtienen los gráficos de dispersión de Moran y se puede luego elaborar el mapa de agrupamiento espacial de LISA.

En la Figura 4 se muestra, como ejemplo, los gráficos de dispersión de Morán para la cobertura de pastizales durante los años 2015 (fase El Niño) y 2020 (inicio de La Niña). A continuación, en la Figura 10, se presentan los mapas que comparan la distribución del agrupamiento espacial de LISA para la cobertura de Pastizales en los años 2015 y 2020.

Figura 10.

Agrupamiento espacial de Lisa para valores del índice de correlación de Pearson



Nota. La representación muestra la relación entre la cobertura de Pastizales y la fase del ENSO correspondiente (valor ONI3.4). Elaboración propia.

Conclusiones

El Corredor Seco de Guatemala, tal y como es definido en este estudio, es una región que puede abarcar hasta el 40% del territorio nacional, expandiéndose desde el altiplano en Huehuetenango hasta la frontera con Honduras en el departamento de Chiquimula, continuando hacia la costa sur a través del graben de Ipala, hasta alcanzar la frontera con México en el departamento de San Marcos. A lo largo de este territorio viven alrededor de 11 millones de personas, según el último Censo de Población (INE, 2019).

Esta investigación representa el primer esfuerzo en el estudio de la dinámica espacial del corredor seco a nivel de Guatemala. Estudios anteriores (por ejemplo: Hidalgo, et al., 2019; Gotlieb y García Giron, 2020) se han enfocado en las causas climáticas por un lado y en la deforestación como consecuencia del avance de la frontera agrícola para explicar la extensión del corredor seco a nivel centroamericano.

De allí la importancia de este estudio y que concluye con los siguientes enunciados:

1. La superficie del Corredor Seco de Guatemala no es estática. Su dinámica responde a las variaciones climáticas tanto estacionales como regionales afectando principalmente los medios de producción en la agricultura de subsistencia.
2. El corredor seco de Guatemala, definido en función de los parámetros utilizados en este estudio, abarca 199 municipios distribuidos en 19 departamentos de la República donde habitan aproximadamente 11.19 millones de habitantes, según la proyección del INE (INE, 2018)
3. En este estudio se evalúa la influencia del fenómeno El Niño Oscilación del Sur sobre la extensión del corredor seco, estableciéndose que existe correlación espacial entre las fases del fenómeno y la extensión territorial de ciertas clases de cobertura del suelo.
4. Los pastizales presentan la mayor correlación espacial positiva con la fase Niño del

fenómeno ENSO. Mientras las tierras agrícolas manifiestan una correlación espacial negativa para la misma fase en cuestión.

Recomendaciones

1. Extender el estudio del cambio de cobertura y cambio de uso del suelo a todo el territorio nacional con el objeto de medir la dinámica forestal ante los efectos del cambio climático, en virtud que esta investigación determina que las tierras forestales presentan la mayor pérdida de cobertura en el período de estudio.
2. Utilizar los datos del análisis de correlación espacial para identificar los municipios mas afectados por el impacto de las condiciones de sequía asociados al fenómeno ENSO en su fase Niño.
3. Estudiar si existe relación entre el fenómeno de migración y los episodios de sequía que acompañan a la fase Niño del fenómeno ENSO y su posible impacto a la transición de Niño a condiciones neutras que son las más abundantes en el período estudiado.

Referencias

- Anselin, L. (1995). Local indicators of spatial association LISA. *Geographical Analysis*, 27(2) 93-115.
- Chen, Das, M & Ghosh, S.K. (2017). Measuring Moran's I in a Cost-Efficient manner to describe a land cover change pattern in large scale remote sensing imagery. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(6), 2631-2639. DOI:10.1109/jstars.2017.266076
- Depsky, N. and Pons, D. (2021). Meteorological droughts are projected to worsen in Central America's dry corridor throughout the 21st century. *Environmental Research Letters*, 16(1).
- Instituto Nacional de Estadística (2019). *Estimaciones y proyecciones de población a largo plazo. 1950-2050*. https://www.ine.gov.gt/ine/wp-content/uploads/2020/08/Estimaciones_y_proyecciones_de_

poblacion-1950-2050.xlsx

Instituto Nacional, de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (2014). *Mapa de Amenaza a Sequias de Guatemala*. 1:50,000, Guatemala.

Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación. (2005). *Mapa de amenaza a sequias*, 1:250,000, Guatemala.

Pierre, J.P., Abolt, C.J., and Young, M.H. (2015). Impacts from above-ground activities in the eagle ford shale plan on landscapes and hydrologic flows. *La Salle County, Texas. Environ. Manage*,55(6),1262-1275.

Rainforest (2020). *Mapa de probabilidad de ocurrencia de sequias*. Guatemala.

Rivera S., Pedraza, D. and Perez Briceño, P.M., (2019). *Climate migration in the dry corridor of Central America Integrating a gender perspective (Report)*. https://www.christianaid.org.uk/sites/default/files/2020-03/2019_migration_gender_climate_change_Central_America.pdf

Su, S., Jiang, Z., Zhang, Q., and Zhang, Y. (2011). Transformation of agricultural landscapes under rapid urbanization: A threat to sustainability in Han Jia-Hu region, China. *Appl. Geography*, 3(2), 439-449.

Información los autores

Dr. Alfredo Gálvez Sinibaldi, Escuela de Estudios de Postgrado, Facultad de Ingeniería, USAC.

Dra. Mayra Castillo Montes, Escuela de Estudios de Postgrado, Facultad de Ingeniería, USAC.

Dr. José Luis Argueta, Escuela de Estudios de Postgrado, Facultad de Ingeniería, USAC.

M.Sc. Walter Bardales Espinoza, Escuela de Estudios de Postgrado, Facultad de Ingeniería, USAC.

Br. Eugenio Polanco Sotoj, Estudiante de Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, Facultad de Ingeniería, USAC.