

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**“ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO -TEMPORAL DEL
ÍNDICE DE VEGETACIÓN MEJORADO (EVI) Y SU RELACIÓN CON
ÍNDICES ATMOSFÉRICOS GLOBALES EN EL PÁRAMO
ECUATORIANO”**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA
AMBIENTAL**

CARLA DOMENICA BORJA ESCOBAR
carla.borja@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. XAVIER EDUARDO ZAPATA RÍOS., MSc., PhD
xavier.zapata@epn.edu.ec

Quito, junio 2020

DECLARACIÓN

Yo, Carla Domenica Borja Escobar, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por su normativa institucional vigente.

Carla Domenica Borja Escobar

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Carla Domenica Borja Escobar, bajo mi supervisión.

ING. XAVIER EDUARDO ZAPATA RÍOS
DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTO

A mis padres, mami Clari y papi Hernán, por su apoyo incondicional, su cariño, y por los valores y principios que me han impartido.

A mi hermana Nathali, que, aparte de ser mi hermana, y mi amiga, es mi segunda mamá, por todo su apoyo y por estar a mi lado cuando más la necesito.

A mis hermanos Diego y Felipe y a mi sobrina Francheska, que de igual manera han estado siempre conmigo.

A Dios, La Virgen y mi hermana Naticita, por cuidarme, protegerme y darme fuerzas para seguir.

A Erick, y a todos los amigos que he tenido la oportunidad de conocer en mi paso por la universidad, en especial a Michelle, Jonathan y Pauli por su apoyo y porque de alguna manera siempre contribuyeron para que cumpla esta meta.

Y finalmente, quiero agradecer a todas las personas que colaboraron con sus conocimientos y tiempo para que se pueda cristalizar el presente proyecto de titulación el cual se encuentra enmarcado dentro del proyecto de investigación PIJ17_05, en especial al Ing. Xavier Zapata y al Ing. Jhon Villarreal, miembros que se encontraron a la cabeza de dicho proyecto y que supieron abrirme sus puertas ante cualquier duda o inquietud.

Carla Domenica Borja Escobar

DEDICATORIA

A todos aquellos que persiguen sus sueños, sigan adelante y nunca se rindan.

Carla Domenica Borja Escobar

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN	I
CERTIFICACIÓN	II
AGRADECIMIENTO	III
DEDICATORIA	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
ÍNDICE DE GRÁFICOS	IX
ÍNDICE DE MAPAS	X
RESUMEN.....	XI
ABSTRACT.....	XII
PRESENTACIÓN.....	XIII
CAPÍTULO 1	1
GENERALIDADES.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.3 ALCANCE	3
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	3
1.5 HIPÓTESIS.....	4
CAPÍTULO 2	5
MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	5
2.1 MARCO TEÓRICO	5
2.1.1 PATRONES CLIMATOLÓGICOS	5

2.1.2	PÁRAMO ECUATORIANO	5
2.1.3	SENSOR REMOTO MODIS	7
2.1.3.1	MOD13Q1	9
2.1.4	INTERPOLACION Y SUAVIZADO DE SERIES DE TIEMPO	11
2.1.4.1	INTERPOLACIÓN ESPACIAL.....	11
2.1.4.2	INTERPOLACIÓN TEMPORAL Y SUAVIZADO	14
2.1.5	ÍNDICES ATMOSFÉRICOS GLOBALES	15
2.2	INFLUENCIA DE LOS ÍNDICES ATMOSFÉRICOS GLOBALES EN EL ECUADOR	21
2.3	ESTADO DEL ARTE	23
CAPÍTULO 3.....		28
METODOLOGÍA		28
3.1	ESQUEMA DE TRABAJO.....	28
3.2	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN	29
3.3	PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES.....	29
3.3.1	GENERACIÓN DE MOSAICOS.....	29
3.3.2	DELIMITACIÓN DEL PÁRAMO	30
3.3.3	ANÁLISIS DE CALIDAD DE EVI.....	32
3.3.4	DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	32
3.3.5	INTERPOLACIÓN DE DATOS PERDIDOS	34
3.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	36
3.4.1	ANÁLISIS DE VARIABILIDAD EVI EN EL ÁREA DE ESTUDIO	36
3.4.2	ANÁLISIS DE CORRELACIÓN EVI E ÍNDICES ATMOSFÉRICOS GLOBALES.....	43
CAPÍTULO 4.....		45
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		45
4.1	ANÁLISIS DE VARIABILIDAD DE EVI EN EL ÁREA DE ESTUDIO.....	45

4.1.1	ANÁLISIS TEMPORAL.....	45
4.1.2	ANÁLISIS ESPACIAL.....	49
4.1.3	ANÁLISIS POR ECOSISTEMA	54
4.1.4	ANÁLISIS DE TENDENCIAS.....	57
4.2	ANÁLISIS DE CORRELACIÓN EVI E ÍNDICES ATMOSFÉRICOS GLOBALES	61
4.2.1	CORRELACIÓN EVI E ÍNDICE DE OSCILACIÓN ANTÁRTICA (AAO)	61
4.2.2	CORRELACIÓN EVI E ÍNDICE MULTIVARIADO ENOS (MEI)	62
4.2.3	CORRELACIÓN EVI E ÍNDICE DE OSCILACIÓN DEL ATLÁNTICO NORTE (NAO).....	64
4.2.4	CORRELACIÓN EVI E ÍNDICE DE OSCILACIÓN MADDEN- JULIAN (MJO).....	65
4.2.5	CORRELACIÓN EVI E ÍNDICE DE OSCILACIÓN DECADAL DEL PACÍFICO (PDO).....	66
	CAPÍTULO 5.....	73
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	73
5.1	CONCLUSIONES	73
5.2	RECOMENDACIONES	75
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.1. Producto MOD13Q1: 16-días 250/500m VI	9
Tabla 2.1.2. MOD13Q1 Pixel Reliability	10
Tabla 2.3.1. Documentos revisados	23
Tabla 3.3.1. Porcentaje de datos en cada serie de tiempo	32
Tabla 3.4.1. Ecosistemas predominantes en el área de estudio.....	38
Tabla 4.2.1. Coeficiente de determinación (R^2) entre EVI y AAO.....	61
Tabla 4.2.2. Coeficiente de determinación (R^2) entre EVI y MEI.....	63
Tabla 4.2.3. Coeficiente de determinación (R^2) entre EVI y NAO.....	65
Tabla 4.2.4. Coeficiente de determinación (R^2) entre EVI y MJO.....	66
Tabla 4.2.5. Coeficiente de determinación (R^2) entre EVI y PDO.....	67

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Figura 2.1.1 Organización de los productos Modland por mosaicos.....	8
Figura 2.1.2. Ejemplo de variograma que incluye sus principales parámetros.	13
Figura 2.1.3. Índice de Oscilación Antártica (2001-2018)	16
Figura 2.1.4. Índice Multivariado ENOS Versión 2 (2001-2018)	17
Figura 2.1.5. Índice de Oscilación del Atlántico Norte (2001-2018)	18
Figura 2.1.6. Índice de Oscilación Madden-Julian (2001-2018).....	20
Figura 2.1.7. Índice de Oscilación Decadal del Pacífico (2001-2018).....	21
Figura 3.1.1. Esquema de Trabajo	28
Figura 3.3.1. Mosaico MOD13Q1 EVI, día 1 año 2001	30
Figura 3.3.2. Ejemplo, delimitación de páramo, día 1 año 2001	31
Figura 3.3.3. Área de estudio del páramo ecuatoriano	33
Figura 3.3.4. Modelo de variograma de tipo exponencial para el día 17 /11 /2001	34
Figura 3.3.5. Interfaz de TIMESAT en la serie de tiempo 21, sin aplicación del método de suavizado	36
Figura 3.3.6. Interfaz de TIMESAT en la serie de tiempo 21, con aplicación del método de suavizado	36
Figura 3.4.1. Representación del Área bajo la curva de una serie de tiempo EVI (2001-2018)	38
Figura 4.1.1 Valores máximos, mínimos, media y CV mensuales de EVI periodo 2001-2018.....	45
Figura 4.1.2. Comportamiento de EVI durante los meses de mayor y menor coeficiente de variación.....	46
Figura 4.1.3 Patrones mensuales y anuales de la variabilidad EVI (2001-2018) ..	48
Figura 4.1.4. Variabilidad del Índice de Vegetación Mejorado por ecosistemas específicos	56

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 3.4.1. Mapa de ecosistemas de páramo del área de estudio.....	41
Mapa 3.4.2. Mapa de ubicación de puntos de muestra de ecosistemas.....	42
Mapa 4.1.1. Mapa del Área bajo la curva de EVI periodo 2001-2018.....	52
Mapa 4.1.2. Mapa de Desviación Estándar de EVI periodo 2001-2018.....	53
Mapa 4.1.3. Mapa de Tendencias de EVI periodo 2001-2018.....	59
Mapa 4.1.4. Mapa de Tendencias de EVI significativas periodo 2001-2018.....	60
Mapa 4.2.1. Mapa de correlación entre EVI y AAO	68
Mapa 4.2.2. Mapa de correlación entre EVI y MEI	69
Mapa 4.2.3. Mapa de correlación entre EVI y NAO	70
Mapa 4.2.4. Mapa de correlación entre EVI y MJO	71
Mapa 4.2.5. Mapa de correlación entre EVI y PDO	72

RESUMEN

El principal objetivo del presente proyecto de investigación fue analizar la variabilidad espacio- temporal de EVI y su correlación con Índices Atmosféricos Globales en el páramo ecuatoriano durante el periodo 2001-2018. Este objetivo se planteó para desarrollar nuevos conocimientos sobre la dinámica que maneja este importante ecosistema con el fin de contribuir a la gestión sostenible del mismo. En el estudio se incluyeron algunas etapas como la revisión bibliográfica, la recopilación de información base y su tratamiento. Los resultados obtenidos comprendieron el análisis de la variación espacial, temporal y tendencias de EVI dentro de ecosistemas de páramo específicos. En cuanto al análisis temporal de EVI en el área de estudio se observaron patrones que coincidían con las temporadas de lluvia o sequía de la región, en el análisis espacial se observó que la Cordillera Oriental de los Andes presentaba los valores de EVI más altos que otras regiones, los análisis por ecosistemas específicos demostraron que a pesar de ser distintos tipos de ecosistemas de páramo presentaron patrones estacionales similares y el análisis de tendencias demostró que el 13,4% del área de estudio presentó tendencias a disminuir los valores de EVI y éstos se encontraban principalmente en la laderas orientales de los Andes. La evaluación de las correlaciones entre EVI y los Índices Atmosféricos Globales indicaron que la respuesta espectral de la vegetación responde a varios factores climáticos y no a un solo índice atmosférico. Finalmente, los resultados obtenidos mostraron un acercamiento al comportamiento de la vegetación del páramo y se espera que los mismos puedan contribuir a la gestión sostenible del mismo, así como levantar inquietudes para desarrollar futuras investigaciones en áreas de estudio más pequeñas.

ABSTRACT

The main objective of this research project was to analyze the spatial-temporal variability of EVI and its correlation with Global Atmospheric Index in the Ecuadorian moorland during the period 2001-2018. This objective was set to develop new knowledge about the dynamics that manage this important ecosystem to contribute to the sustainable management of this. The study included some stages such as literature review, collection of baseline information and its treatment. The results obtained included the analysis of temporal and spatial variation and EVI trends in the specific moorland ecosystems. In the temporal analysis of EVI in the study area, patterns were observed that coincided with the rainy or dry seasons of the region. In the spatial analysis it was observed that the regions of the Eastern Cordillera of the Andes presented higher EVI values than in other regions, the analysis by specific ecosystems showed that despite being different types of moor ecosystems they presented similar seasonal patterns and the trend analysis showed that 13.4% of the study area presented tendencies to decrease EVI values and these were mainly found in the eastern slopes of the Andes. The evaluation of the correlations between EVI and Global Atmospheric Index showed that the spectral response of vegetation responds to several climatic factors and not to a single atmospheric index. Finally, the results obtained showed an approach to the behavior of the moorland vegetation and it is expected that they can contribute to the sustainable management of the moorland, as well as raise concerns for developing future research in smaller study areas.

PRESENTACIÓN

El presente estudio abarca el análisis de la variabilidad espacio- temporal de EVI en un área determinada del Páramo Ecuatoriano, además incluye la cuantificación de la correlación entre EVI y cinco índices atmosféricos globales. Para cumplir con los objetivos del estudio, se ha dividido su estructura en cinco capítulos los cuales describen las actividades realizadas durante cada etapa. El primer capítulo señala la problemática actual respecto al monitoreo de los páramos y la importancia del estudio de este ecosistema, además se señalan los objetivos y el alcance de este proyecto. En el segundo capítulo se presenta toda la base teórica en la que se fundamenta esta investigación además de los artículos científicos y documentos revisados referentes al tema. El tercer capítulo presenta los métodos utilizados en la investigación, en donde se describen detalladamente las actividades realizadas durante cada etapa. El cuarto capítulo contiene los resultados obtenidos y su respectivo análisis, se presentan gráficas descriptivas de la variabilidad de EVI a nivel de toda la extensión de estudio y por ecosistemas específicos, además se presentan mapas temáticos de la distribución espacial del comportamiento de EVI y su correlación con índices atmosféricos globales. El capítulo cinco incluye las conclusiones obtenidas en base a los objetivos del proyecto y sus recomendaciones. Para finalizar se muestran las Referencias Bibliográficas utilizadas en el desarrollo de este trabajo.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

Los patrones espaciales y temporales de las variables climatológicas como la precipitación, la temperatura o los vientos son el resultado de diferentes factores planetarios tales como la circulación atmosférica global o las corrientes oceánicas. Estos factores inducen características particulares a los ecosistemas y su ambiente en diferentes partes del mundo (IDEAM-UNAL, 2018; Pourrut et al., 1995).

El Ecuador se caracteriza por tener una variabilidad climatológica importante a lo largo de toda su extensión. Esta variabilidad se da principalmente por la influencia de factores planetarios como el desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (CZIT), El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), el efecto de la Cordillera de los Andes, entre otros (Pourrut et al., 1995). Dichos factores determinan en conjunto el clima, la disponibilidad de agua, así como también definen los diferentes ecosistemas presentes en el país.

El estudio del clima en el Ecuador se ha realizado fundamentalmente en base a la información registrada en estaciones meteorológicas y en modelos computacionales que tienen una resolución espacial gruesa (Insel et al., 2010; Pourrut et al., 1995). Estos estudios no han permitido analizar la influencia de los patrones globales de circulación atmosférica o corrientes oceánicas sobre espacios territoriales más pequeños como divisiones políticas, cuencas hidrográficas o ecosistemas específicos, como el páramo, bosque nublado, entre otros. Sin embargo, la llegada del monitoreo por satélite en 1972 (Williams et al., 2006) permitió un gran avance en la comprensión de la dinámica que manejan los diferentes ecosistemas terrestres a escalas espaciales más finas.

Las evaluaciones de la condición, cobertura, cambio y procesos de la vegetación son componentes principales de los programas de investigación del cambio global y son temas de considerable relevancia social. Los índices de vegetación espectral se encuentran entre los productos satelitales más empleados, que proporcionan mediciones clave para estudios climáticos, hidrológicos y biogeoquímicos (Huete et

al., 2011a). Por ello, el estudio de los ecosistemas a través del uso de los índices espectrales de vegetación puede convertirse en un poderoso indicador de los cambios climáticos de una región (IPCC, 2007). Además, Van Leeuwen et al. (2013) indica que estos índices pueden ser usados para determinar y comprender la influencia de los patrones climáticos sobre un área geográfica específica.

En este contexto, la presente investigación se enfoca en el páramo ecuatoriano como área de estudio ya que este se reconoce como un ecosistema que juega un importante papel en la regulación hídrica y el suministro de agua para la población, así como también provee de otra gran variedad de servicios ambientales asociados (Hofstede et al., 2014). Por este motivo es de gran importancia comprender la dinámica climática que maneja este ecosistema y si esta dinámica se ve alterada por la presencia de distintos patrones climáticos como los fenómenos de El Niño o La Niña.

El presente estudio se realiza bajo el marco del proyecto PIJ 17_05 “Los patrones climáticos globales y su influencia en la respuesta temporal y espacial de índices espectrales de la vegetación del páramo en el Ecuador” y tiene el objetivo de desarrollar nuevos conocimientos sobre la dinámica del páramo ecuatoriano con el fin de contribuir a la gestión sostenible de este ecosistema. Además, el análisis de la variabilidad espacio- temporal de la vegetación de gran altura permitirá fortalecer la investigación basada en la evidencia sobre la restauración y conservación de los suelos del páramo, y sobre su función de regulación hidrológica vital de este ecosistema

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar la variabilidad espacial y temporal del Índice de Vegetación Mejorado (EVI) y su correlación con Índices Atmosféricos Globales en el páramo ecuatoriano durante el periodo 2001-2018, para entender el comportamiento de este ecosistema a cambios en el clima.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener información acerca del uso de los índices espectrales de vegetación por medio de recopilación bibliográfica.

- Determinar las tendencias de la variabilidad estacional e interanual del EVI en el páramo del Ecuador para conocer a menor escala cómo funciona dicho ecosistema.
- Determinar la correlación entre EVI e Índices Atmosféricos Globales seleccionados.

1.3 ALCANCE

Este proyecto contempla el análisis de la variabilidad espacial y temporal de EVI proveniente del producto MOD13Q1 del sensor MODIS. El periodo de estudio abarca 18 años (2001-2018) y se limita a una fracción determinada del páramo ecuatoriano. Además, contempla la cuantificación de la correlación entre EVI y cinco índices atmosféricos globales como una estimación de la respuesta espectral de la vegetación ante cambios en el clima.

1.4 JUSTIFICACIÓN

El conocimiento actual que se tiene acerca del comportamiento de las variables climatológicas en el país, se ha desarrollado principalmente en base a datos de redes de estaciones meteorológicas y en modelos computacionales que poseen una resolución espacial gruesa (Insel et al., 2010; Pourrut et al., 1995). En el Ecuador existen zonas que no cuentan con suficiente cobertura de datos meteorológicos, en especial aquellas áreas por sobre los 3500 msnm, debido principalmente a la carencia de equipamiento disponible (Córdova, 2017). Además, la mala distribución espacial de estas estaciones hace que se encuentren separadas por grandes distancias. Debido a la necesidad de proyectar datos meteorológicos de la estación más próxima para el estudio de la dinámica de cualquier espacio territorial, se han desarrollado modelos de funcionamiento de ecosistemas muy alejados de la realidad (Pourrut et al., 1995). Por tanto, el establecimiento de medidas de manejo de recursos naturales y estrategias ante el cambio climático en unidades territoriales pequeñas como divisiones políticas, cuencas hidrográficas o ecosistemas específicos, es complicado e impreciso en el Ecuador. Dichas dificultades responden a la escasez de información disponible y de buena calidad que permita una evaluación eficaz de los patrones generales de las unidades espaciales pequeñas (Pfeifer et al., 2012).

La búsqueda del conocimiento de la dinámica de cualquier espacio territorial ha llevado a que se creen medidas alternativas para el monitorio de la cobertura terrestre, tal es el caso de los índices de vegetación que son indicadores del verdor o vigor de la vegetación dentro un área que está representada por un píxel de una imagen satelital. Las estrategias de evaluación de recursos naturales globales han incorporado cada vez más el uso de imágenes satelitales para monitorear la dinámica de la vegetación, además el uso de estos recursos constituye una alternativa accesible cuyos costos de procesamiento y de datos son menores. Por tanto, los índices espectrales de vegetación pueden ser usados para comprender la dinámica de un área geográfica complementando a los modelos generados a partir de datos de estaciones meteorológicas (Van Leeuwen et al., 2006).

Dadas estas características, varias investigaciones referentes al estudio de la dinámica que manejan los ecosistemas han tomado como base el uso de datos EVI (Potter et al., 2008). En tal sentido, el desarrollo de la presente investigación espera generar nuevos conocimientos sobre la variabilidad en el espacio y el tiempo de uno de los ecosistemas más importantes del Ecuador: el páramo. De ser así, la información generada en esta investigación que actualmente no ha sido desarrollada en el país servirá de base para definir estrategias fundamentales para el adecuado manejo de los páramos ecuatorianos.

1.5 HIPÓTESIS

Los índices espectrales de la vegetación del páramo responden fundamentalmente a cambios en el clima y a índices atmosféricos globales, por tanto, estos constituyen un buen indicador de la disponibilidad temporal de agua en el suelo y la vegetación.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1 MARCO TEÓRICO

2.1.1 PATRONES CLIMATOLÓGICOS

Las condiciones atmosféricas de La Tierra están controladas por la radiación solar que entra en el planeta. Debido a la forma esférica de la tierra, la energía (calor) proporcionada por la radiación solar, se acumula en mayor proporción en los trópicos que en las zonas polares. Esto conlleva a una diferencia en la distribución espacial de la presión atmosférica que a su vez produce la circulación del aire. De esta manera se forman los grandes sistemas de circulación atmosférica global que, además, dan impulso a las corrientes oceánicas. Debido a que la Tierra es un sistema en rotación, los patrones de la circulación planetaria atmosférica y oceánica se ven influenciados por una fuerza inercial denominada Fuerza de Coriolis, la cual actúa desviando las masas de aire y las corrientes oceánicas hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur. Los procesos meteorológicos mencionados, son factores planetarios que determinan los patrones espaciales y temporales de las variables climatológicas como la precipitación, la temperatura o los vientos. Además, inducen características particulares a los ecosistemas y su ambiente en diferentes partes del mundo (IDEAM-UNAL, 2018; Pourrut et al., 1995). La distribución espacial y temporal de estas variables son denominadas patrones climatológicos globales.

2.1.2 PÁRAMO ECUATORIANO

El páramo es un ecosistema neotropical de altura que se distribuye en los Andes entre Venezuela, Colombia, Ecuador y Perú (León Yáñez, 2011). Consiste en valles y llanuras accidentados, con una gran variedad de lagos, turberas y praderas húmedas entremezcladas con matorrales y parches de bosque de baja estatura (Buytaert et al., 2006). Se localiza a lo largo de la Cordillera de los Andes a altitudes comprendidas entre los 3.000 y los 5.000 m aproximadamente (León Yáñez, 2011).

En el Ecuador, el páramo se ubica en las Cordilleras Occidental y Oriental de los Andes. Se extiende desde el norte del país en el límite con Colombia hasta el sur en el límite con Perú. La Cordillera Occidental en el país es un poco fragmentada,

sin embargo, forma un gran complejo entre la provincia del Cotopaxi hasta la provincia del Chimborazo. En cambio, la Cordillera Oriental forma un complejo casi sin interrupción desde la provincia del Carchi hasta la provincia del Cañar, siendo ésta la cordillera con mayor extensión de páramo. La altura en la que se ubican los páramos en el norte y centro del país es generalmente por encima de los 3500 msnm. En cambio, los páramos en el sur del país como en las provincias del Azuay y Loja se ubican alrededor de los 3000 msnm debido a que la altura de la Cordillera de los Andes en esta zona es más baja (Hofstede et al., 2014).

En general, el páramo presenta un clima frío y húmedo con alta nubosidad y radiación. Dada su ubicación en el Ecuador, la radiación solar que recibe durante el año es muy constante lo cual se traduce en una baja variación de la temperatura media mensual, sin embargo, la variación térmica entre el día y la noche es considerablemente alta, se podría decir en base a la variabilidad diaria térmica que en el páramo durante el día es verano mientras que en la noche es invierno (Hofstede et al., 2014). En contraste con la temperatura, la precipitación anual en este ecosistema es muy variable, desde 700 mm hasta 3000 mm (Buytaert et al., 2006).

La variabilidad de la lluvia a una escala pequeña se define principalmente por las fluctuaciones en la velocidad y dirección del viento, que están controladas principalmente por la topografía accidentada característica de la zona. A mayor escala, los patrones de la lluvia están influenciados por el Océano Pacífico en el oeste y por la cuenca del Amazonas en el este. En las laderas orientales prevalecen los vientos húmedos que se originan en la cuenca del Amazonas por lo que en la zona se tienen principalmente climas húmedos a hiperhúmedos (Buytaert et al., 2006). Las laderas occidentales del norte del país se ven influenciadas por la zona de convergencia intertropical (ITCZ) por lo que en esta región se tiene una humedad continua con lluvia y niebla. Por último, las laderas occidentales del sur del país están influenciados por masas de aire seco y fresco proveniente de la corriente de Humboldt por ello estas zonas tienen características secas, excepto cuando se presentan fenómenos como El Niño. Las complejas interacciones mencionadas en combinación con la topografía accidentada y las diferencias en pendiente,

exposición y elevación, dan como resultado a escala local patrones climáticos muy variables (Buytaert et al., 2006).

De otra parte, el páramo, es conocido por ser un ecosistema que juega un importante papel en la regulación hídrica y en el suministro de agua para la población. También provee otra gran variedad de servicios ambientales asociados entre ellos el almacenamiento de carbono y la biodiversidad. Su importancia hidrológica radica en las peculiares características de sus suelos en complemento con la vegetación. La combinación del suelo volcánico de los páramos, con la baja temperatura característica de este ecosistema que hace que la descomposición de la materia orgánica se lleve a cabo de forma lenta, conducen a la formación de una estructura edáfica bastante peculiar que se asemeja al funcionamiento de una esponja. Cuando esta esponja no ha sufrido alteraciones negativas, tiene la capacidad de capturar agua de diferentes fuentes como las precipitaciones, y de liberarla constantemente incluso durante temporadas de sequía. La función de la vegetación en este sistema es de proporcionar materia orgánica al suelo, también cumple con la función de aportarle soporte y protección contra la compactación y otras consecuencias que conlleva el mal uso del ecosistema (Mena, 2009).

2.1.3 SENSOR REMOTO MODIS

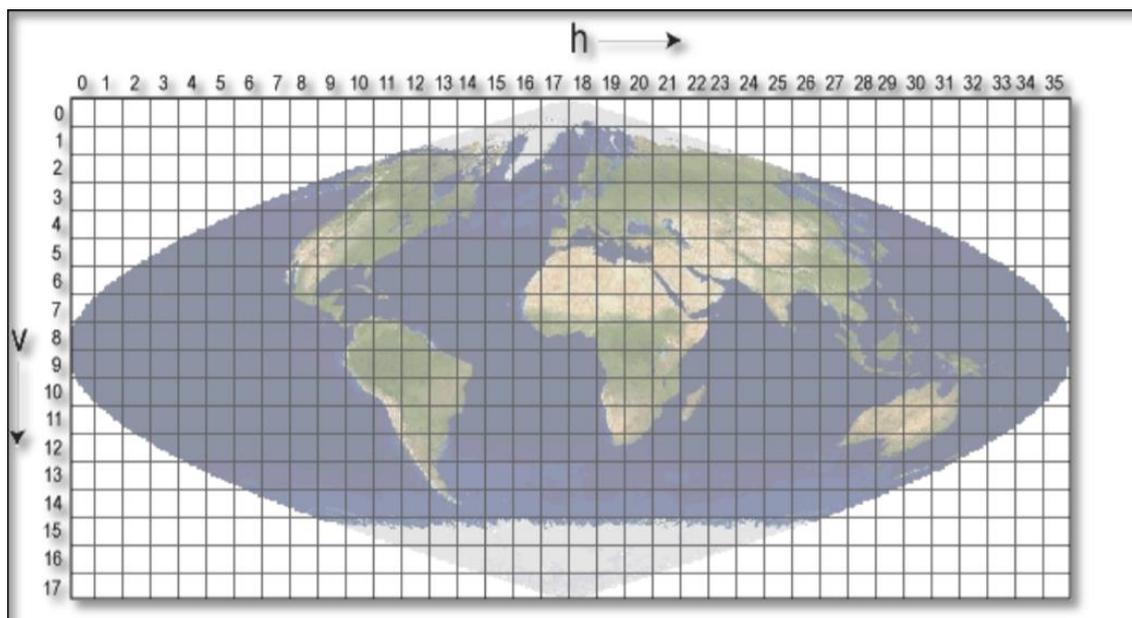
Las aplicaciones de monitoreo espacial se han desarrollado óptimamente a lo largo de las últimas décadas gracias a los variados proyectos de observación terrestre puestos en órbita (Chuvienco, 1992). Las estrategias de evaluación de recursos naturales globales, regionales y locales están incorporando cada vez más imágenes de sensores remotos para el monitoreo de la cobertura terrestre. Aunque ahora hay una gran variedad de sensores satelitales disponibles, las consideraciones prácticas (es decir, costos de procesamiento de datos, distribución gratuita, el equilibrio inherente entre la resolución espacial y temporal y la influencia de la cobertura de nubes) favorecen las plataformas que proporcionan imágenes frecuentes que se procesan sistemáticamente en útiles productos para la evaluación de los recursos naturales (Van Leeuwen et al., 2006).

El Espectroradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS por sus siglas en inglés), cumple con los criterios mencionados, viaja a bordo de los satélites TERRA y AQUA. Las dos plataformas realizan un completo monitoreo de

la superficie de la tierra cada 1 o 2 días dependiendo de la latitud. Este instrumento cuenta con una sensibilidad radiométrica muy alta (12 bits) en 36 bandas espectrales, con un rango de longitud de onda entre los 0.4 μm a los 14.4 μm . Dos de las bandas espectrales poseen una resolución espacial nominal de 250 m al nadir, cinco bandas a 500 m y las 29 bandas restantes a 1 km. El sensor MODIS es un explorador de barrido que posee un espejo rotatorio de doble cara que proporciona un FOV (Field Of View) de $\pm 55^\circ$ (García-Mora & Mas, 2011b).

MODIS, posee una amplia variedad de productos que se enfocan en el estudio de los océanos (Mocean), la atmósfera (MODIS Atmosphere), la criosfera y las cubiertas terrestres (MODLAND) (García-Mora & Mas, 2011a), éstos se definen en una cuadrícula en proyección Sinusoidal donde la resolución espacial viene dada por cada producto individual. Las cuadrículas se dividen en mosaicos de área fija de $10^\circ \times 10^\circ$ (aproximadamente 1,200 km \times 1,200 km en el ecuador). Cada mosaico tiene una coordenada horizontal (h) y vertical (v) (Figura 2.1.1) (Boschetti et al., 2013). Los mosaicos correspondientes al área geográfica de Ecuador son (h9v8), (h10v8), (h9v9) y (h10v9).

Figura 2.1.1 Organización de los productos Modland por mosaicos



Fuente:(Boschetti et al., 2013)

2.1.3.1 MOD13Q1

MOD13Q1, se encuentra dentro de los productos que alberga MODLAND, está diseñado para proporcionar comparaciones de series de tiempo consistentes, espaciales y temporales de las condiciones de la vegetación global. La Tabla 2.1.1. presenta las principales características de las 12 bandas que contiene el producto MOD13Q1, entre las cuales se encuentran, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Vegetación Mejorado (EVI), ambos índices se producen globalmente sobre la tierra cada 16 días y tienen una resolución espacial moderada de 250/500 m (Huete et al., 2002). El factor de escala presente en la tabla en mención es un factor usado para corregir el rango válido de las diferentes capas, dentro de este estudio se usará para corregir el rango de los valores de EVI.

Tabla 2.1.1. Producto MOD13Q1: 16-días 250/500m VI

Conjunto de Datos Científicos	Unidades	Tipo de Dato	Rango Válido	Factor de Escala
250/500m 16 días NDVI	NDVI	int16	-2000, 10000	0,0001
250/500m 16 días EVI	EVI	int16	-2000, 10000	0,0001
250/500m 16 días Detalle de Calidad QA de Índices de Vegetación	Bits	Uint16	0,65534	NA
250/500m 16 días reflectancia roja (Banda 1)	Reflectancia	int16	0,10000	0,0001
250/500m 16 días reflectancia NIR (Banda 2)	Reflectancia	int16	0,10000	0,0001
250/500m 16 días reflectancia azul (Banda 3)	Reflectancia	int16	0,10000	0,0001
250/500m 16 días reflectancia MIR (Banda 7)	Reflectancia	int16	0,10000	0,0001
250/500m 16 días vista de ángulo cenital	Grados	int16	-9000, 9000	0,01
250/500m 16 días ángulo cenital del sol	Grados	int16	-9000, 9000	0,01
250/500m 16 días ángulo cenital relativo	Grados	int16	-18000, 18000	0,01
250/500m 16 días composición del día del año	Día del año	int16	1,366	NA
250/500m 16 días resumen de fiabilidad de píxeles QA	Rango	int8	0,3	NA

Fuente: (Didan et al., 2015)

Dentro de las bandas del producto MOD13Q1 se incluye indicadores de garantía de calidad (AQ) con información sobre la calidad de los índices de vegetación. Esta información permite al usuario eliminar aquellos datos que puedan conducir a errores ya que estos podrían estar sujetos a una alteración debido principalmente a la presencia de nubes, nieve, aerosoles o sombras (Reyes-Díez et al., 2015). Uno de los indicadores disponibles es el Pixel Reliability Index (índice de fiabilidad de píxeles), el cual contiene una clasificación simplificada que describe la calidad general de los píxeles (Tabla 2.1.2) (Didan et al., 2015).

Tabla 2.1.2. MOD13Q1 Pixel Reliability

Clave de Rango	Resumen QA	Descripción
-1	Relleno/Sin datos	No procesar
0	Buenos Datos	Usar con confianza
1	Datos Marginales	Útil, pero mirar otra información QA
2	Nieve/Hielo	Objeto cubierto con nieve/hielo
3	Nubes	Objeto no visible, cubierto con nubes

Fuente: (Didan et al., 2015)

ÍNDICE DE VEGETACIÓN MEJORADO

Los índices de vegetación son medidas robustas y empíricas de la actividad de la vegetación en la superficie de la tierra, en otras palabras, son un indicador del verdor o vigor de la vegetación dentro de un píxel de una imagen satelital (Didan et al., 2015; Huete et al., 2011b). Están diseñados para mejorar la señal reflejada de la vegetación de las respuestas espectrales medidas combinando dos (o más) bandas de onda, a menudo en las regiones de longitud de onda roja (0.6 – 0.7 μm) y NIR (Radiación Infrarroja Cercana) (0.7 – 1.1 μm) (Didan et al., 2015).

El índice de vegetación mejorado (EVI), comparado con otros índices como el NDVI, cuenta con una sensibilidad mejorada sobre regiones de alta biomasa. Además cuenta con una capacidad mejorada de monitoreo de la vegetación a través de un desacoplamiento de la señal del fondo del dosel y una reducción en las influencias de la atmósfera (Didan et al., 2015). La ecuación utilizada para obtener EVI se indica a continuación:

$$EVI = G \frac{NIR - Red}{NIR + C_1 Red - C_2 Blue + L}$$

Donde *NIR*, *Red* y *Blue* son las reflectancias superficiales total o parcialmente corregidas por la atmósfera (Absorción de ozono y Rayleigh); *L* es el ajuste del fondo del dosel que toma en cuenta la transferencia radiante diferencial del infrarrojo cercano y el rojo a través del dosel; *C₁* y *C₂* son los coeficientes de resistencia al aerosol; y *G* es un factor de ganancia o escala. Los valores de los coeficientes son, *L* = 1, *C₁* = 6, *C₂* = 7.5 y *G* = 2.5 (Didan et al., 2015). EVI al igual que NDVI, tiene valores entre -1 y +1, dicho rango es obtenido a partir de la multiplicación entre los valores brutos arrojados por MOD13Q1 y el factor de escala.

Los valores positivos de EVI están asociados a la presencia de vegetación, mientras mayor sea dicho valor más robusta y vigorosa será la vegetación.

2.1.4 INTERPOLACION Y SUAVIZADO DE SERIES DE TIEMPO

Una de las dificultades relacionadas con el uso de series de tiempo basadas en MODIS es la posibilidad de un gran número de píxeles con baja calidad radiométrica. Un píxel MODIS puede contener una fuerte interferencia por nubes o un alto ángulo de visión fuera del nadir, reduciendo así su calidad. Específicamente, para los índices de vegetación MODIS, la calidad radiométrica se puede analizar utilizando los indicadores de garantía de calidad (QA) (Borges et al., 2014). David Roy, citado por (Colditz et al., 2008) recomienda a los usuarios de MODIS evaluar los datos de calidad ya que estos son particularmente importantes para la generación constante de series temporales. También Reyes-Díez et al. (2015) afirma que: “El filtrado por calidad de las series temporales de EVI es imprescindible para realizar caracterizaciones de referencia y evaluar tendencias de largo plazo en el funcionamiento de los ecosistemas” (p.25).

La aplicación del filtrado usando los datos de calidad se ha traducido en considerables pérdidas de información en las series de tiempo de los índices de vegetación. Dichas pérdidas se dan principalmente en regiones de alta montaña, sin embargo, estas, no limitan el posterior uso del producto MOD13Q1 (Reyes-Díez et al., 2015). Para solventar la problemática a las series de tiempo incompletas, se puede aplicar numerosos enfoques de relleno de huecos. Estos enfoques se pueden dividir aproximadamente en las siguientes categorías: (1) métodos que se basan en información espacial, (2) métodos basados en información temporal disponible dentro de una serie temporal de imágenes, y (3) métodos que incluyen información tanto espacial como temporal en el proceso de llenar huecos (Weiss et al., 2014).

2.1.4.1 INTERPOLACIÓN ESPACIAL

Cuando se tiene por objetivo realizar una predicción espacial, la geoestadística opera en dos etapas. La primera etapa es el modelado de variogramas y la segunda etapa es la predicción de sitios de una región no muestreados por medio de la técnica de interpolación Kriging (Giraldo, 2014).

MODELADO DE VARIOGRAMAS

El grado de dependencia espacial generalmente se expresa mediante un modelo de variograma en Kriging. Un variograma es una función matemática de la distancia y la dirección que separa dos ubicaciones utilizadas para cuantificar la autocorrelación espacial en variables regionalizadas $Z(x)$. Una $Z(x)$ es una variable que puede tomar valores de acuerdo con su ubicación espacial. El modelado de variogramas es un proceso de desarrollo de relaciones entre ubicaciones de muestreo para cuantificar la variabilidad asociada con $Z(x)$ (Adhikary et al., 2015).

La función de variograma es una herramienta clave para el método de kriging y se emplea con frecuencia en ejercicios que implican estimar los valores deseados en nuevas ubicaciones no muestreadas en función de los valores observados en ubicaciones vecinas (Adhikary et al., 2015). El método de kriging requiere una función de variograma teórico que debe ajustarse con un variograma experimental de los datos observados. El variograma experimental, $\gamma(h)$, se calcula a partir de los datos observados en función de la distancia de separación, h , y está dado por:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2$$

Donde, $N(h)$ es el número de puntos de datos de muestra separados por una distancia h ; x_i y $(x_i + h)$ representan ubicaciones de muestreo separadas por una distancia h ; $Z(x_i)$ y $Z(x_i + h)$ indican valores de la variable Z observada, medida en las ubicaciones correspondientes x_i y $(x_i + h)$, respectivamente. La función teórica del variograma $\gamma^*(h)$, permite la estimación analítica de los valores de variograma para cualquier distancia y proporciona la solución única para los pesos necesarios para la interpolación de Kriging (Adhikary et al., 2015).

Existen varios modelos de variograma que se aplican dependiendo de la forma de la función, sin embargo, los modelos exponenciales, gaussianos y esféricos son los más usados, sus ecuaciones se muestran a continuación:

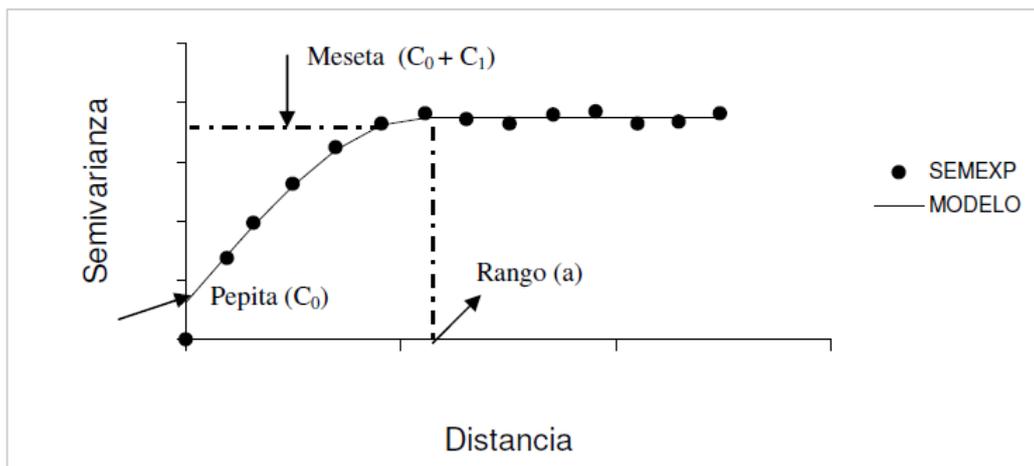
$$\gamma^*(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{3h}{a}\right) \right]_{\text{Exponencial}}$$

$$\gamma^*(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{3h^2}{a^2}\right) \right]_{\text{Gaussiana}}$$

$$\gamma^*(h) = C_0 + C_1 \left[1.5 \left(\frac{h}{a}\right) - 0.5 \left(\frac{h^3}{a^3}\right) \right]_{\text{Esferica}}$$

Donde, C_0 , a y $C_0 + C_1$ representan a Pepita, rango y meseta respectivamente, estos son parámetros del variograma que interfieren en el cálculo de Kriging su ubicación se ilustra en la Figura 2.1.2.

Figura 2.1.2. Ejemplo de variograma que incluye sus principales parámetros.



Fuente: (Giraldo, 2014)

KRIGING

Kriging es una técnica lineal óptima e imparcial para la estimación de datos faltantes. En comparación con los métodos tradicionales de interpolación, proporciona las "mejores" estimaciones posibles de valores desconocidos a partir de datos de muestra. La estimación se obtiene ponderando cada uno de varios datos de muestra que se aproximan a la estimación. Dada la dependencia espacial, los datos más cercanos reciben más peso porque es más probable que sean similares al valor desconocido. Los pesos exactos se determinan a partir de la forma exacta de dependencia espacial representada por el variograma (Yu et al., 2011). El estimador de kriging se expresa como:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n w_i Z(x_i)$$

Donde, $Z^*(x_0)$ se refiere al valor estimado de Z en la ubicación deseada x_0 ; w_i representa los pesos asociados con la observación en la ubicación x_i con respecto a x_0 ; y n indica el número de observaciones dentro del dominio de la vecindad.

2.1.4.2 INTERPOLACIÓN TEMPORAL Y SUAIVIZADO

La segunda categoría de enfoques de relleno de datos faltantes se basa en modelar valores de píxeles faltantes utilizando valores asociados con el píxel faltante desde diferentes puntos en el tiempo (Weiss et al., 2014). Jönsson & Eklundh (2004) hicieron una contribución importante a los enfoques temporales mediante el desarrollo del paquete de software TIMESAT, éste incorpora métodos para suavizar los datos de series temporales como un medio para estimar datos faltantes.

TIMESAT

TIMESAT es un paquete de software gratuito para procesar datos de series de tiempo satelitales con el fin de investigar problemas relacionados con el cambio global y el monitoreo de los recursos vegetales. Las suposiciones detrás de TIMESAT son que los datos del sensor representan la señal de vegetación estacional de una manera significativa, y que la variación de vegetación subyacente es suave. Para transformar las señales ruidosas en curvas estacionales suaves, TIMESAT proporciona funciones de suavizado que permiten una adaptación a los datos de las series temporales (Eklundh & Jönsson, 2015).

Las funciones de suavizado que proporciona TIMESAT son: Gaussiano asimétrico (AG); doble logística (DL); y el filtro adaptativo Savitzky-Golay (SG). El enfoque adaptativo de filtrado SG utiliza funciones polinómicas locales en el ajuste, puede capturar cambios sutiles y rápidos en la serie temporal, pero también es sensible al ruido. Tanto los enfoque AG como DL utilizan métodos semilocales, son menos sensibles al ruido y pueden dar una mejor descripción de los comienzos y finales de las estaciones (Gao et al., 2008b). TIMESAT puede adaptarse a la envolvente superior de los datos, teniendo en cuenta el ruido sesgado negativamente, y puede tener en cuenta los datos faltantes y los indicadores de calidad. Además, el software permite la extracción de parámetros como el inicio y el final de la temporada de crecimiento, su duración, valores integrados, etc. (Eklundh & Jönsson, 2015; Jönsson & Eklundh, 2004).

FILTRO ADAPTATIVO SAVITZKY-GOLAY

El filtro Savitzky-Golay es una convolución simplificada de mínimos cuadrados para extraer derivados y suavizar un espectro de valores consecutivos. Es esencialmente un filtro de media móvil ponderada basado en un polinomio donde el orden polinómico dicta la convolución. El polinomio se ajusta a puntos de datos dentro de una ventana móvil de cierto ancho, y este ancho afecta tanto el grado de suavizado como la capacidad de seguir cambios rápidos. Dicho procedimiento está destinado a mantener los tiempos pico dentro de los datos y reducir el ruido de sesgo introducido de los datos. Su objetivo es preservar el área y la posición media de un pico estacional, pero sin alterar tanto el ancho como la altura. Este método es sensible a las variaciones locales en los valores del índice de vegetación, lo que resulta útil cuando se compara con diferentes regiones. El resultado final es una curva suavizada adaptada a la envoltura superior de los valores en una serie de tiempo (Mbow et al., 2013; Rae, 2014).

2.1.5 ÍNDICES ATMOSFÉRICOS GLOBALES

Los valores registrados en diferentes años de las variables climatológicas como la precipitación o la temperatura oscilan por encima o por debajo de lo normal. La secuencia de estas oscilaciones alrededor de los valores normales se conoce como variabilidad climática y su valoración se obtiene a través de la determinación de anomalías. Dentro de la variabilidad climática se han identificado a diferentes escalas de tiempo algunos ciclos importantes: los ciclos intraestacionales (oscilaciones atmosféricas-oceánicas con periodos de meses), interanuales (periodos de años) e interdecadales (periodos de decenios). El clima registrado en determinada época sobre una región puede deberse a la superposición de los patrones normales con los patrones de uno o varias de estas oscilaciones atmosféricas-oceánicas (Montealegre & Pabón, 2000).

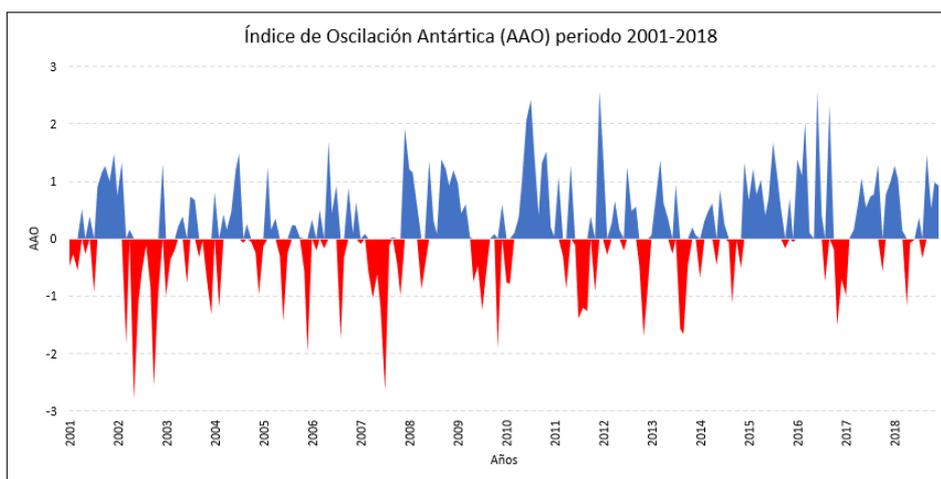
Varias investigaciones han determinado la influencia de las oscilaciones atmosféricas-oceánicas sobre la precipitación y otras variables climatológicas de una determinada región (Montealegre & Pabón, 2000). Por tal motivo, en este estudio se determinará la correlación existente entre cinco índices atmosféricos globales y EVI para conocer el comportamiento de la vegetación ante la variabilidad climática. Estos índices fueron seleccionados debido al respaldo bibliográfico de

estudios anteriores realizados dentro del territorio ecuatoriano, así como en general dentro del páramo Andino, en el presente trabajo no se utilizaron índices oceánicos, sin embargo, estos pueden ser considerados para futuras investigaciones.

ÍNDICE DE OSCILACIÓN ANTÁRTICA (AAO)

La Oscilación Antártica (AAO), también llamada modo anular meridional (SAM), es el principal modo de variabilidad atmosférica de baja frecuencia en el hemisferio sur, 20° S. Consiste en un sube y baja en la presión atmosférica entre la región Antártica y las latitudes medias del sur. En la fase positiva de AAO se produce una presión baja anómala sobre la Antártida. Los vientos del oeste de latitud media y el chorro subtropical de nivel superior tienden a desplazarse hacia el polo durante la fase positiva. En la fase negativa, se produce lo contrario, la presión alta circula sobre la Antártida y los vientos del oeste y el chorro subtropical se desplazan hacia el ecuador. Estas señales se pueden encontrar durante todo el año, con un posible pico estacional en diciembre (Pohl et al., 2010). Las fases positivas y negativas de AAO correspondientes al periodo de estudio del presente proyecto pueden observarse dentro de la Figura 2.1.3.

Figura 2.1.3. Índice de Oscilación Antártica (2001-2018)



Fuente: (National Oceanic and Atmospheric Administration, s.f.-c)

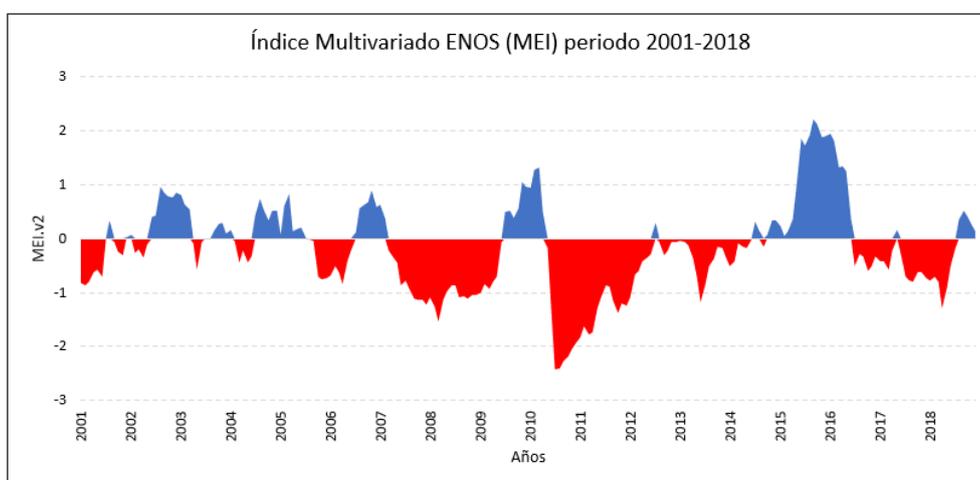
ÍNDICE MULTIVARIADO ENOS (MEI)

El Niño, Oscilación del Sur (ENOS) se caracteriza por ser la fluctuación climática más prominente en el planeta en escalas de tiempo estacionales e interanuales que tiene importantes impactos a nivel global. Durante la fase cálida de ENOS, también conocida como El Niño se produce un incremento en la Temperatura Superficial del

Mar (TSM) y una disminución en la intensidad de los vientos alisos en el este del océano Pacífico. Como resultado se producen variaciones importantes en el clima que se evidencian principalmente en el aumento de las precipitaciones. Por otro lado, durante la fase fría, también conocida como La Niña, se produce una disminución atípica en la TSM y un incremento en la intensidad de los vientos alisos generando periodos de sequía (Maturana et al., 2004; Mazzarella et al., 2013).

Se han desarrollado varios índices puntuales para describir ENOS, pero el Índice Multivariado ENOS (MEI) se considera el más representativo (Mazzarella et al., 2013) ya que vincula 5 parámetros meteorológicos diferentes medidos en el Pacífico tropical, estos son: presión del nivel del mar (SLP), temperatura de la superficie del mar (SST), vientos zonales de la superficie (U), vientos meridionales de la superficie (V) y onda larga saliente de radiación (OLR). Los valores positivos del MEI representan la fase cálida de ENOS, mientras que los valores negativos representan la fase fría. Para ambas fases se consideran eventos de intensidad débil cuando los valores se encuentran entre 0,5 a 0,9; intensidad moderada de 1,0 a 1,4; intensidad fuerte de 1,5 a 1,9 y de intensidad muy fuerte aquellos valores mayores o iguales a 2 (National Oceanic and Atmospheric Administration, n.d.-a). Las valoraciones mencionadas pueden observarse en la Figura 2.1.4 que corresponden al periodo de estudio del presente proyecto.

Figura 2.1.4. Índice Multivariado ENOS Versión 2 (2001-2018)

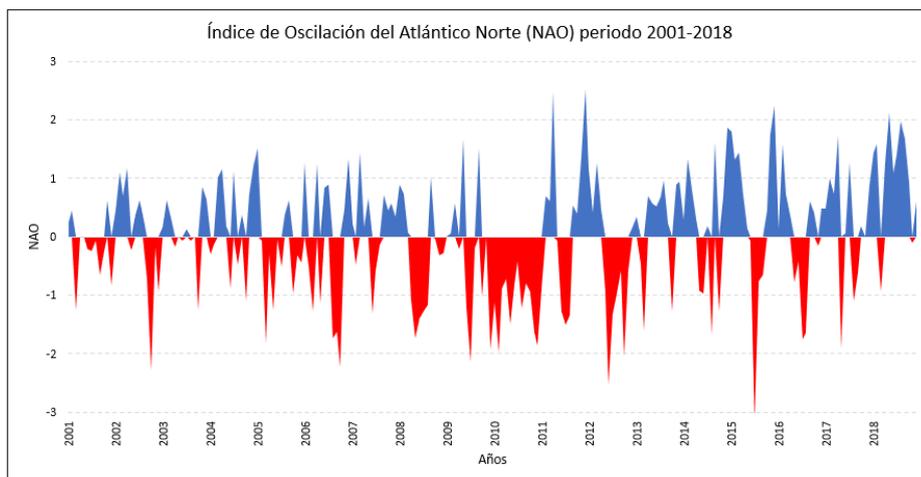


Fuente: (National Oceanic and Atmospheric Administration, s.f.-c)

ÍNDICE DE OSCILACIÓN DEL ATLÁNTICO NORTE (NAO)

La Oscilación del Atlántico Norte es uno de los patrones más importantes y frecuentes de variabilidad de la circulación atmosférica en el hemisferio norte (Hurrell et al., 2003), se basa en la diferencia de presión del nivel del mar en la superficie entre Islandia y Azores. La fase positiva (negativa) de la NAO se caracteriza por presentar alturas y presiones por debajo (encima) de lo normal en las altas latitudes del Atlántico norte y por presentar alturas y presiones por encima (debajo) de lo normal sobre el Atlántico norte central, el este de los Estados Unidos y Europa occidental. Cuando la NAO presenta una fase positiva de intensidad fuerte, esta suele relacionarse con temperaturas por encima de lo normal principalmente en el este de Estados Unidos y el norte de Europa, en cambio en el sur de Europa la temperatura se presenta con valores por debajo de lo normal. Esta fase también se relaciona con el incremento de las precipitaciones el norte de Europa y con la disminución de las precipitaciones en el centro y sur de Europa. Los patrones descritos se invierten cuando la NAO presenta una fase negativa de intensidad fuerte. (National Oceanic and Atmospheric Administration, n.d.-b). Las fases presentadas por la NAO en el periodo de estudio del presente proyecto se ilustran en la Figura 2.1.5.

Figura 2.1.5. Índice de Oscilación del Atlántico Norte (2001-2018)



Fuente: (National Oceanic and Atmospheric Administration, s.f.-c)

ÍNDICE DE OSCILACIÓN MADDEN-JULIAN (MJO)

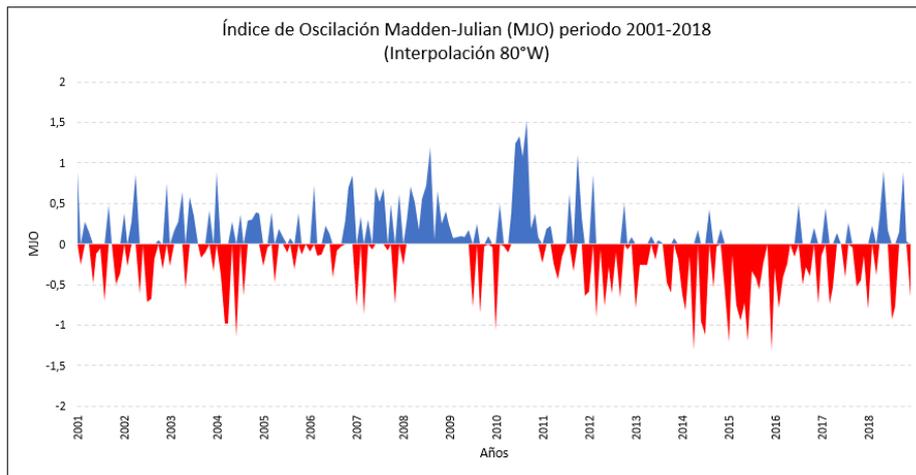
La Oscilación de Madden-Julian es una fluctuación que ocurre en los trópicos, está caracterizada por anomalías en convección y vientos tropicales a escalas de tiempo

intraestacionales entre treinta y sesenta días. El MJO es responsable de la variabilidad del clima en estas regiones. Produce variaciones en varios parámetros atmosféricos y oceánicos que incluyen la velocidad y dirección del viento en los niveles inferior y superior, nubosidad, lluvia, temperatura de la superficie del mar y evaporación de la superficie del océano.

La convección de lluvias tropical (fase activa) del MJO acompañada también por anomalías de vientos, se desarrolla sobre el Océano Índico y viaja por el Océano Pacífico en dirección este. Este patrón tiende a perder su identidad a medida que se mueve sobre las aguas más frías del Pacífico Oriental, antes de reaparecer en algún momento sobre el Océano Índico nuevamente. Al oeste y al este de la fase activa de convección tropical (lluvias) se presenta la fase suprimida o inactiva (sequía), donde se suprime la actividad de la tormenta y pueden presentarse en estas regiones sequias fuera de lo habitual. Este patrón acoplado se propaga a una velocidad promedio de 5 m / s (G. Poveda et al., 2002; Zhang, 2005). La Figura 2.1.6 muestra los valores de MJO interpolados para la región 80°W correspondiente al territorio ecuatoriano en donde los valores positivos representan la fase activa y los valores negativos la fase suprimida de MJO.

Algunas investigaciones han determinado que el MJO influye en la variabilidad de la lluvia sobre las islas del Pacífico, en las regiones monzónicas de Asia y Australia, en las áreas costeras del oeste de América de Norte y Sur y también en África. Además, Modula la génesis de los ciclones tropicales en el Océano Pacífico y el Mar Caribe y afecta los vientos de la superficie ecuatorial en el Océano Atlántico. También, la MJO interactúa con el océano y, por lo tanto, puede influir en la evolución de El Niño-Oscilación del Sur (Zhang, 2005).

Figura 2.1.6. Índice de Oscilación Madden-Julian (2001-2018)

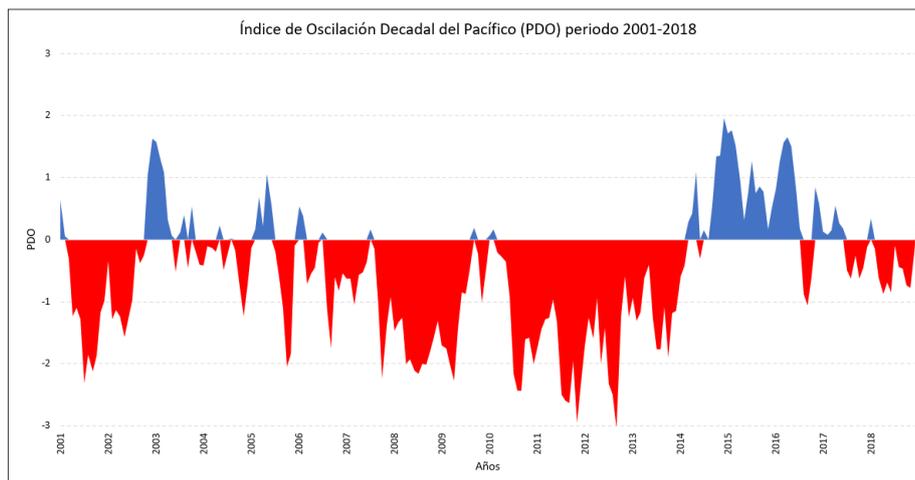


Elaborado por: (Borja, 2020)

ÍNDICE DE OSCILACIÓN DECADAL DEL PACÍFICO (PDO)

La Oscilación Decadal del Pacífico es un índice de variabilidad en el clima del Océano Pacífico Norte con frecuencias bajas de 40 a 60 años. En la fase positiva de PDO se presenta una temperatura atípicamente cálida en las costas entre Norteamérica y el ecuador. Esta fase suele relacionarse con inviernos más secos y cálidos, mientras que en la fase negativa se invierte esta distribución y se asocia con inviernos más fríos y húmedos (Hessl et al., 2004). Un creciente cuerpo de evidencia resalta una fuerte tendencia a los impactos del PDO en el hemisferio sur, con importantes anomalías climáticas en la superficie sobre el océano Pacífico Sur, Australia y América del Sur en latitudes medias (Mantua & Hare, 2002). Los periodos cálidos (positivos) y fríos (negativos) de PDO durante el periodo de estudio de este proyecto se ilustran en la Figura 2.1.7.

Figura 2.1.7. Índice de Oscilación Decadal del Pacífico (2001-2018)



Fuente: (National Oceanic and Atmospheric Administration, s.f.-c)

2.2 INFLUENCIA DE LOS ÍNDICES ATMOSFÉRICOS GLOBALES EN EL ECUADOR

Dentro de Ecuador se han realizado varias investigaciones de la influencia de los Índices Atmosféricos Globales sobre la variabilidad climática del país. Estas investigaciones se han enfocado principalmente en los efectos de ENOS. Por ejemplo, Morán-Tejeda et al. (2016) encontraron que los eventos de El Niño están fuertemente correlacionados con la precipitación en las costas ecuatorianas, pero este evento no habría explicado la precipitación en los Andes ya que, según el autor existen otras fuentes de variabilidad que afectan la precipitación en dicha región. También, Vuille et al. (2000) en su estudio sobre la precipitación y temperatura sobre los Andes ecuatorianos encontraron que los años donde se presentaron eventos El Niño se asociaron con precipitaciones por debajo del promedio, mientras que los años donde se presentaron eventos La Niña se asociaron con precipitaciones por encima del promedio. En el mismo estudio, Vuille et al. (2000) también encontraron que, durante la mayor parte del año, la variabilidad de las precipitaciones en los Andes orientales estaba relacionada con una estructura de correlación tipo dipolo en el Atlántico tropical. El mecanismo propuesto involucraba correlaciones positivas con las anomalías de temperatura de la superficie del mar (SSTAs) en el Atlántico Sur tropical y negativas en el Atlántico Norte tropical, lo que resultaba en un aumento de precipitaciones sobre la Cordillera Oriental.

En cuanto a la Oscilación Decadal del Pacífico, Veettil et al. (2014) en su estudio sobre la dinámica glacial del volcán Cotopaxi encontraron que las fluctuaciones glaciares indicaban una tendencia negativa en el balance de masa y esta se relacionaba con la fase cálida del PDO. También Campozano et al. (2020) en su estudio sobre la PDO y su modulación en la relación de ENOS con la variabilidad de la lluvia en la costa de Ecuador encontraron que cuando la PDO de fase cálida coincide con un evento El Niño, se producen altas precipitaciones en la costa ecuatoriana y cuando coincide con un evento La Niña se producen condiciones de sequía. En cuanto a los periodos fríos de PDO, los autores encontraron que las sequías son más probables en condiciones neutras y en eventos La Niña.

La influencia del MJO sobre la variabilidad climática en el Ecuador y en general sobre el oeste de Sudamérica tropical ha sido poco estudiada. La mayor parte de los estudios realizados se han enfocado en regiones extratropicales, y el resto han examinado la cuenca del Amazonas y Brasil. Las limitadas investigaciones en esta región se debe a que el núcleo convectivo de MJO se vuelve indescriptible a medida que se propaga por el Pacífico Oriental, de modo que su influencia en la costa del Pacífico de América del Sur tropical no es obvia en los análisis globales (Recalde-Coronel et al., 2020). A pesar de estas características Recalde-Coronel et al. (2020) realizaron un estudio sobre la influencia de MJO en la variabilidad de la precipitación en el oeste de América del Sur, el área de estudio comprendía tanto las costas del Pacífico como las montañas de los Andes de Perú, Ecuador y Colombia. Los autores encontraron que la modulación del núcleo convectivo MJO de los patrones de circulación regional pueden explicar gran parte de la influencia observada en la precipitación. Otro hallazgo notable del estudio fue la relación entre las anomalías de la TSM ecuatorial costera y la propagación de la MJO, los autores sugirieron que las condiciones más cálidas y la evaporación mejorada podrían contribuir a la influencia total de la MJO en la región.

Hasta la elaboración del presente proyecto no se ha encontrado evidencia científica sobre la influencia de AAO en la variabilidad climática de Ecuador. Las investigaciones se han centrado principalmente en los países de latitudes bajas aproximadamente en los 20°S. Por ejemplo, Silvestri & Vera (2003) realizaron un estudio sobre la señal de AAO en anomalías de precipitación en el sureste de

Sudamérica. Los autores encontraron que la señal de AAO es significativamente fuerte tanto en invierno como a fines de primavera, pero débil durante otoño. Además, indicaron que la relación de AAO con la precipitación contribuye a explicar la fracción de variación de precipitación no relacionada con ENOS. También Van Leeuwen et al. (2013) realizaron un estudio sobre las tendencias y variabilidad impulsada por ENOS/AAO en la productividad de la vegetación a lo largo de las montañas de los Andes en donde encontraron que los valores de AAO en los meses de verano tenían un impacto significativo, presentándose una mayor productividad en la vegetación .

2.3 ESTADO DEL ARTE

Esta sección presenta la información revisada en fuentes bibliográficas acerca del empleo de índices espectrales de vegetación para la caracterización y monitoreo de la cubierta terrestre. La tabla 2.3.1 expone los documentos revisados para el desarrollo de la presente investigación.

Tabla 2.3.1. Documentos revisados

AUTOR	METODOLOGÍA Y CONCLUSIONES
(Barbosa et al., 2006)	En el estudio se buscó examinar la heterogeneidad espacial y la dinámica temporal de la Región Noroeste de Brasil para lo cual se usó una serie temporal de 20 años de observaciones de NDVI, derivadas del Radiómetro Avanzado de Alta Resolución. Se analizó un conjunto de 12000 valores de NDVI distribuidos espacialmente para investigar desviaciones significativas de los valores medios mensuales del período base (1982-2001) en el área de estudio. Se aplicaron varios análisis estadísticos que implican valores mínimos, medios y máximos, coeficiente de variación (CV). Como resultado se encontró que los valores máximos de NDVI se presentaban durante la temporada de lluvia y los valores mínimos durante la temporada de sequía de la región, también se encontraron fuertes variaciones estacionales, expresadas por el CV, que variaban entre el 14% al 32%. Los resultados de este estudio sugirieron que los patrones en la variabilidad de la vegetación pueden atribuirse a los impactos espaciales y temporales de la variabilidad climática extrema en la región (Barbosa et al., 2006).
(Clark et al., 2010)	El objetivo del estudio fue mapear el uso y cobertura del suelo (LULC) anual de la ecorregión Dry Chaco en Argentina, Bolivia y Paraguay. Para alcanzar este objetivo se utilizaron datos de referencia con interpretación humana de imágenes de Google Earth y se utilizó los índices EVI y NDVI derivados del

	<p>sensor MODIS en un periodo del 2001 a 2007. Los datos de EVI y NDVI fueron procesados en el software TIMESAT aplicando el parámetro de ajuste Savitzky-Golay y además se extrajeron métricas fenológicas. Como resultados obtuvieron mapas desde el año 2001 en adelante con una precisión general del 79,3 %. Los mapas obtenidos fueron usados además para evaluar el cambio de la vegetación leñosa en el Chaco seco de 2002 a 2006 encontrándose una rápida deforestación relacionada con la expansión de la soja y los pastos plantados (Clark et al., 2010).</p>
(Germán Poveda et al., 2011)	<p>El estudio tuvo como objetivo determinar la variabilidad climática impulsada por ENOS en los Andes tropicales de Colombia a escalas de tiempo interanuales. Dicha influencia fue cuantificada a través de la precipitación, las descargas fluviales medias y extremas, la humedad del suelo y a partir del NDVI. Para cuantificar la influencia de ENOS sobre NDVI, se emplearon datos de ENOS y datos de AVHRR GIMMS NDVI durante el periodo de 1981 a 2002 con una resolución espacial de 8km. Como resultado obtuvieron que durante los eventos El Niño el NDVI es fuertemente reducido, mientras que durante los eventos La Niña el NDVI se mejora. Además, encontraron que los efectos de ENOS aparecen antes (más tarde) y más fuertes (más débiles) sobre los Andes occidentales (orientales) (Germán Poveda et al., 2011).</p>
(Van Leeuwen et al., 2013)	<p>El objetivo de la investigación fue explorar como los índices MEI y AAO afectan la respuesta de la vegetación en las zonas áridas y semihúmedas del cono sur de América del Sur. Para el desarrollo se utilizó un registro de 30 años de datos AVHRR GIMMS NDVI, se realizaron análisis de tendencias del NDVI medio anual, análisis de tendencias del inicio (SOS) y duración de temporada (LOS), correlación entre NDVI medio anual y los índices MEI y AAO, y correlación entre (SOS y LOS) y (MEI y AAO). Los análisis se realizaron tomando en cuenta los tipos de vegetación del área de estudio. Como resultado se observaron tendencias negativas en la productividad en los tipos de vegetación árida, semiárida y subhúmeda en la Patagonia-Argentina, Desierto de Atacama en Chile y la región del Chaco. Se observaron tendencias positivas en las áreas subhúmedas en Brasil, Bolivia y Perú. Finalmente, los índices MEI y AAO explicaron la variabilidad en la productividad anual y la fenología para algunas zonas que se ven afectadas por la precipitación y la variabilidad de la temperatura asociada con estos patrones de circulación (Van Leeuwen et al., 2013).</p>
(Carilla et al., 2013)	<p>Uno de los objetivos de este estudio fue relacionar la vegetación con la variabilidad de algunos lagos de los ecosistemas subtropicales de alta elevación en el norte de Argentina y el sur de Bolivia. Para cuantificar las fluctuaciones interanuales en los tamaños de los lagos se usó imágenes Landsat y se</p>

	<p>seleccionaron nueve lagos entre los 4400 y 4600 msnm. Se utilizó EVI derivado de MODIS del 2000 a 2010. Las series temporales de EVI fueron evaluadas utilizando el software TIMESAT determinando cuatro variables fenológicas. Para explorar las asociaciones entre la vegetación y los lagos se usó el coeficiente de correlación de Pearson. Como resultado se encontró que las cuatro variables fenológicas mostraron una tendencia decreciente en los 10 años de estudio. Las fluctuaciones interanuales del tamaño de los lagos fueron coherentes con las variaciones interanuales de las variables de EVI por lo que los autores indican que la metodología aplicada puede ser un enfoque útil para explorar las tendencias ambientales en ecosistemas andinos de alta elevación (Carilla et al., 2013).</p>
(Gaitán et al., 2015)	<p>El objetivo del estudio fue analizar las tendencias del NDVI como un indicador de monitoreo de la degradación de la tierra en Argentina durante el periodo 2000-2014, para lo cual se utilizaron series temporales NDVI derivados del sensor MODIS. Para cada año se realizó el cálculo de la integral anual NDVI y se calculó la tendencia temporal de la integral. Como resultado se obtuvieron áreas con tendencias negativas en un 37,9% del total del área de estudio, y áreas con tendencias positivas en el 5,0% del área de estudio, el resto de área no presentó tendencias. Las tendencias negativas se presentaron principalmente en la Patagonia Norte asociadas con causas naturales, y en el Chaco Seco asociadas a causas antrópicas. Por otro lado, las tendencias positivas se presentaron en el noroeste del país asociadas de igual forma a causas naturales (Gaitán et al., 2015).</p>
(Maita, 2015)	<p>El objetivo del estudio fue analizar el comportamiento temporal del producto EVI derivado de MODIS en los ecosistemas de las Zonas de planificación 6 y 7 del Ecuador en el periodo 2000-2014. Para lo cual se hizo uso combinado de los datos EVI de los satélites Terra y Aqua. Los datos fueron procesados en el software TiSeG, en donde se evaluó la calidad de los datos con la banda "pixel reliability", eliminando los píxeles de EVI con valores 2 y 3. El mismo software permitió el relleno de datos faltantes a través de una interpolación temporal lineal. Además, se realizó una corrección de correlación serial usando el método de pre-blanqueamiento para la posterior aplicación de la prueba de tendencias de Mann-Kendall. Como resultado el autor encontró que la aplicación de la evaluación de calidad de los datos mostró una predominancia de píxeles inválidos en el flanco occidental y oriental de la Cordillera de los Andes debido a la nubosidad persistente. Se identificaron dos patrones temporales con mayor actividad fotosintética en enero-junio y agosto-diciembre. El mayor valor de la media de EVI se presentó en la provincia de Morona Santiago y el menor valor en Azuay. En cuanto a las tendencias, se presentaron tendencias negativas en</p>

	<p>las laderas orientales de los Andes específicamente en la provincia de Morona Santiago, tomando en cuenta a los ecosistemas, el ecosistema Arbustal siempre verde y Herbazal del páramo presento tendencias negativas en el 75% de su superficie. Además, se encontró un comportamiento similar en los picos y bajos de EVI con datos ENSO sugiriendo que los eventos El Niño y La Niña ejercen un fuerte impacto en los datos EVI (Maita, 2015).</p>
(Reyes-Díez et al., 2015)	<p>El objetivo del estudio fue evaluar las consecuencias que tiene el empleo del filtrado de calidad sobre los datos EVI derivados del sensor MODIS (producto MOD13Q1) durante el periodo 2001-2010 en el SE Ibérico, cuya región se caracteriza por ubicarse en un gran rango altitudinal (0-3482 msnm). Los datos fueron filtrados con el empleo de los bits referidos a: nubes, hielo, sombras y aerosoles. Como resultado del estudio, la cantidad de píxeles de baja calidad que se eliminaron varió significativamente según el filtro aplicado. La altitud fue un factor determinante, ya que la mayor pérdida de datos se presentó a altas latitudes de forma general para todos los filtros principalmente para los filtros de nieve y sombras siendo mayor en el invierno que en el verano. Los filtros aplicados no ocasionaron pérdidas que imposibiliten el posterior uso del producto MOD13Q1 (Reyes-Díez et al., 2015).</p>
(Muñoz et al., 2017)	<p>El objetivo del estudio fue determinar las tendencias de la vegetación en la Isla Grande de Tierra del Fuego, a través del análisis de parámetros de estacionalidad como el inicio, duración y término de la temporada de crecimiento. Se utilizaron datos de EVI derivado del sensor MODIS (MOD13Q1) del periodo 2002-2015 los cuales fueron tratados en el software MODIS Reprojection Tool y además se usó la banda Pixel Reliability para analizar de calidad de los píxeles. Se utilizó el software TIMESAT para el tratamiento de los datos y se aplicó la función de ajuste Savitzky-Golay el cual permite estimar los parámetros de estacionalidad. Como resultados se obtuvo que la temporada de crecimiento se da entre los meses de septiembre y noviembre y la temporada de término de crecimiento se da en los meses de marzo a mayo. En cuanto a las tendencias se observó una relación con la elevación del terreno. En elevación menos pronunciadas el inicio de la temporada se dio en fechas más temprana (Muñoz et al., 2017).</p>
(Ramírez & Vallejo, 2018)	<p>El objetivo del estudio fue analizar la influencia de los fenómenos climáticos El Niño y La Niña en la dinámica del páramo en el norte del Ecuador usando EVI durante el periodo 2000-2016. El desarrollo implicó el análisis de EVI a partir de mapas y estadística descriptiva, además se determinó el coeficiente de correlación de Pearson entre EVI y MEI. Cabe destacar que en el estudio no se mencionó la aplicación del filtro de calidad de píxeles de EVI. Como resultado los autores identificaron patrones temporales que inciden en la respuesta de la</p>

	<p>vegetación, siendo estos las estaciones lluviosas y secas de la región. En cuanto a la respuesta de EVI ante los fenómenos climáticos El Niño y La Niña, se encontró que no influyen directamente en el área de estudio cuando hay una intensidad débil o moderada. Cuando se presentó un evento El Niño de intensidad fuerte la vegetación se mostró débil y en los eventos La Niña la vegetación tuvo una respuesta de mayor vigorosidad. En cuanto a los ecosistemas de páramo los autores encontraron que la respuesta de la vegetación varía dependiendo el tipo de ecosistema. La mejor respuesta espectral la tuvo el ecosistema Herbazal húmedo montano superior del páramo mientras que el ecosistema Herbazal ultrahúmedo subnival del páramo tuvo una baja respuesta espectral con los valores más bajos con respecto a los demás (Ramírez & Vallejo, 2018).</p>
--	--

Elaborado por: (Borja, 2020)

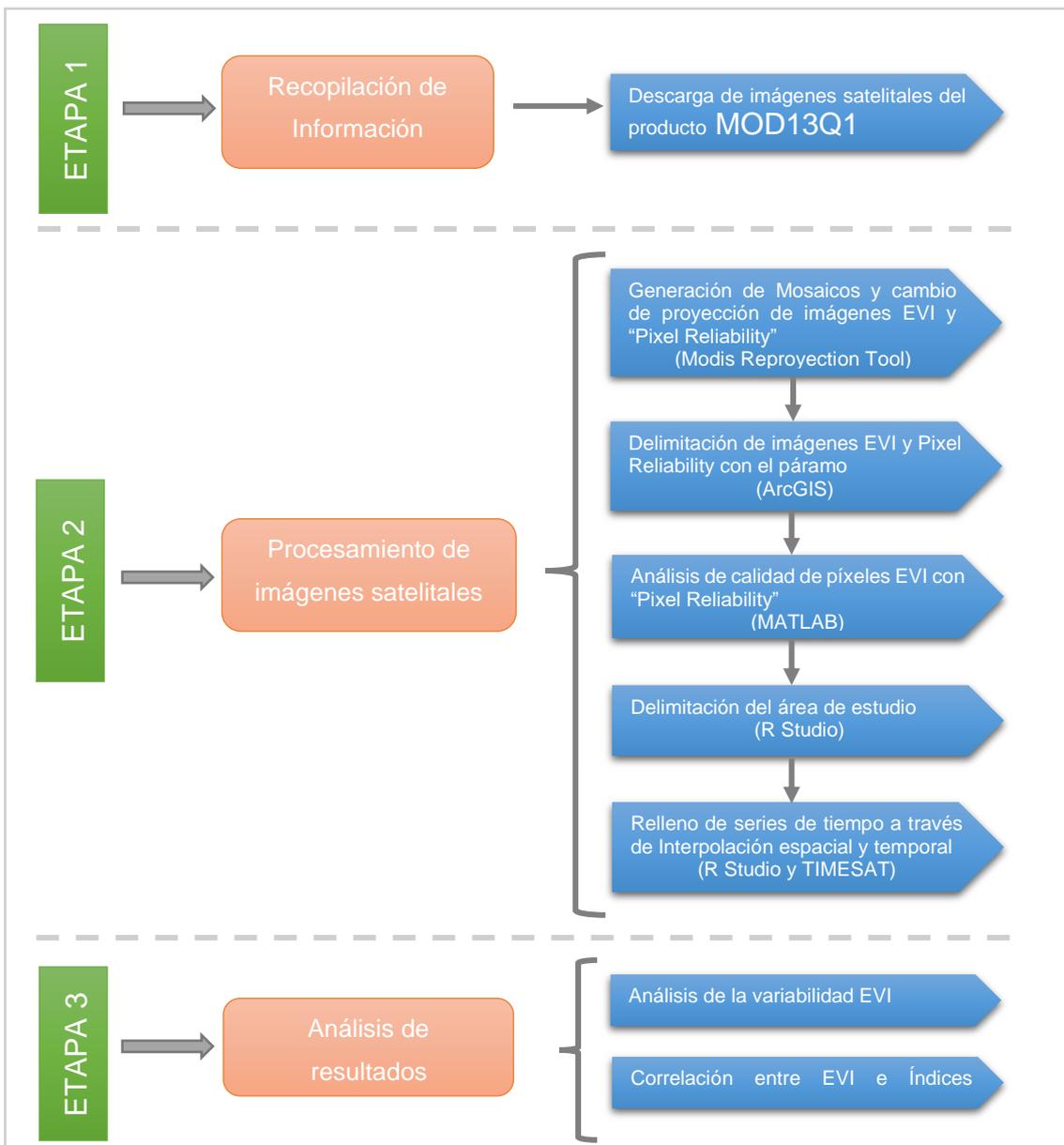
CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

3.1 ESQUEMA DE TRABAJO

La figura 3.1.1 detalla el procedimiento establecido para la realización del presente estudio. Dicha figura muestra las actividades realizadas en forma secuencial para alcanzar los objetivos del estudio.

Figura 3.1.1. Esquema de Trabajo



Elaborado por: (Borja, 2020)

3.2 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

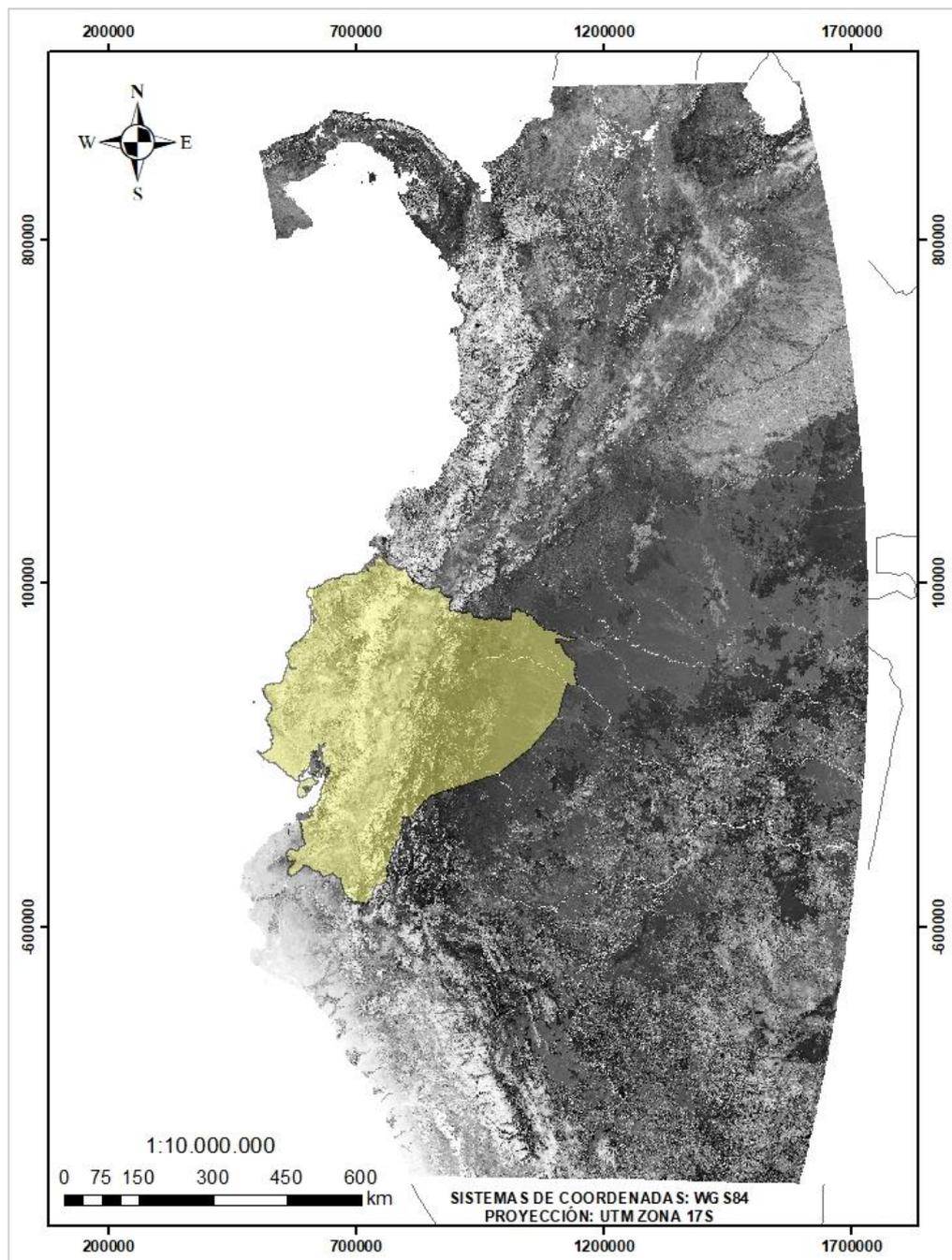
Se descargó el producto satelital MOD13Q1 con una resolución espacial de 250m, a través de la base de datos pública de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio Estadounidense (NASA) en la página web <https://lpdaac.usgs.gov/>. Para asegurarnos de cubrir la totalidad del páramo ecuatoriano se requirió utilizar tres mosaicos o perfiles los cuales fueron: h9v9, h10v8 y h10v9. Ya que MOD13Q1 nos ofrece imágenes cada 16 días, lo que conlleva a 23 imágenes por año, se registró un total de 1242 imágenes satelitales en formato HDF-EOS en el periodo de estudio de 2001 al 2018.

3.3 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES

3.3.1 GENERACIÓN DE MOSAICOS

Los perfiles descargados requirieron ser vinculados en un solo mosaico para cada fecha (Muñoz et al., 2017), por lo tanto, se utilizó el software Modis Reprojection Tool, el cual permite crear mosaicos a partir de varios perfiles, seleccionar las bandas de las cuales están conformadas las imágenes satelitales, y realizar un cambio de proyección. Para el presente estudio se seleccionó la banda EVI que corresponde al Índice de Vegetación Mejorado y la banda de confiabilidad Pixel Reliability. Se realizó el cambio de la proyección Sinusoidal a la proyección UTM zona 17S, con Datum WGS84. Como resultado se obtuvo un total de 414 mosaicos en formato GEOTIF para EVI y 414 mosaicos para Pixel Reliability. La Figura 3.3.1 muestra un ejemplo del mosaico obtenido de EVI para el día 1 de enero del 2001.

Figura 3.3.1. Mosaico MOD13Q1 EVI, día 1 año 2001



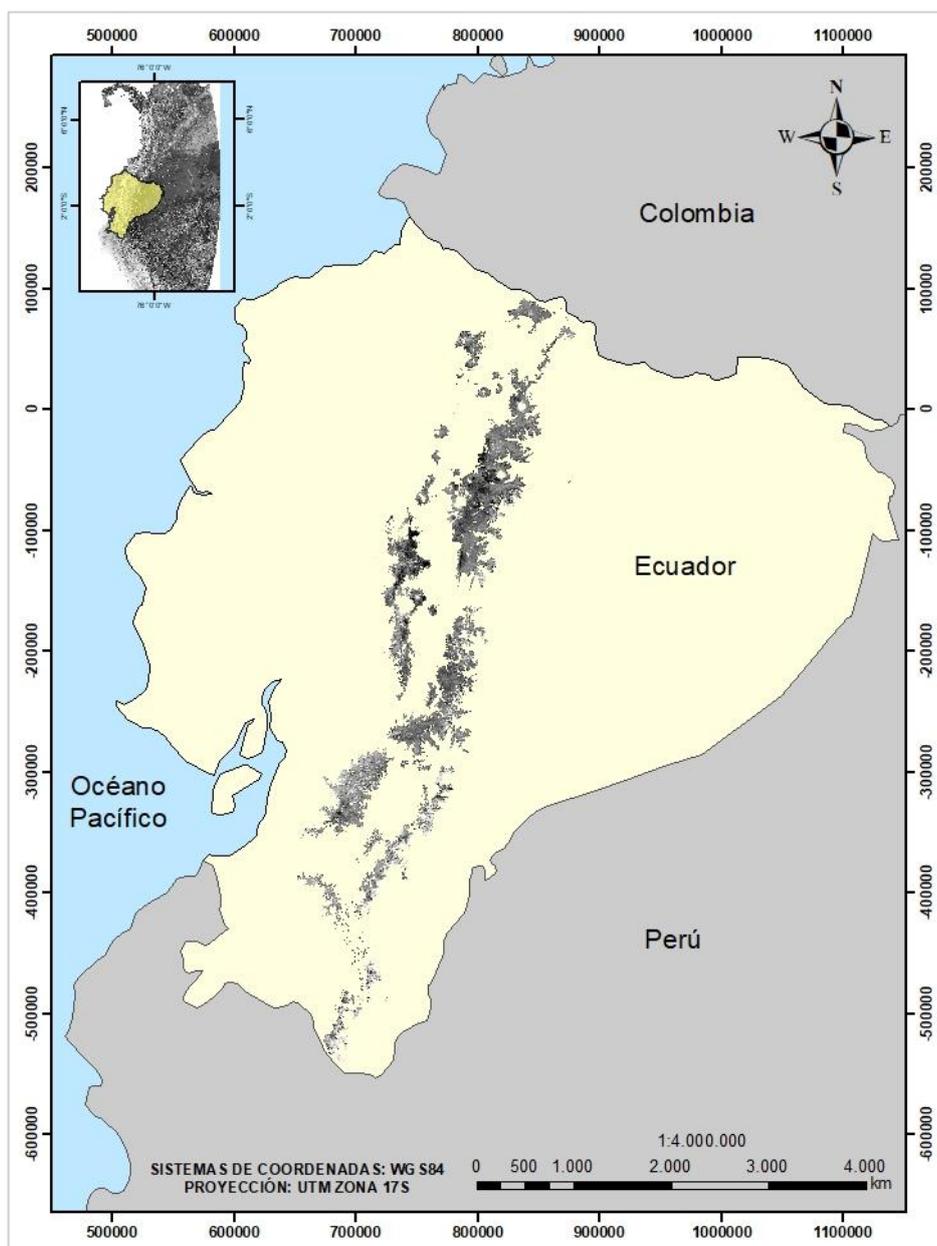
Elaborado por: (Borja, 2020)

3.3.2 DELIMITACIÓN DEL PÁRAMO

Para delimitar el páramo se utilizó el mapa de cobertura de uso del suelo a escala 1:100.000 desarrollado por el Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE) y presentado en el año 2015. La delimitación del páramo se realizó con la ayuda del software ArcGIS usando la herramienta “extraer por máscara” la cual permite recortar imágenes en formato raster o GEOTIF a partir de polígonos. El polígono

usado en nuestro estudio correspondió a la extensión territorial del páramo extraída del mapa de cobertura del uso del suelo. Esta actividad se realizó tanto para los mosaicos EVI como para los mosaicos Pixel Reliability. Como resultado se obtuvo 414 imágenes en formato raster delimitadas para EVI y 414 imágenes para Pixel Reliability. La Figura 3.3.2 muestra un ejemplo de la delimitación del páramo ecuatorial de una imagen EVI del día 1 de enero del 2001.

Figura 3.3.2. Ejemplo, delimitación de páramo, día 1 año 2001



Elaborado por: (Borja, 2020)

3.3.3 ANÁLISIS DE CALIDAD DE EVI

Una vez creadas las imágenes raster EVI y Pixel Reliability del páramo ecuatoriano, se procedió al filtrado de los píxeles de baja confiabilidad relacionando los datos EVI con los datos de Pixel Reliability. Esta tarea se realizó con la ayuda del software MATLAB, el cual a través de un script permitió eliminar aquellos píxeles EVI cuyos valores de Pixel Reliability correspondan a -1, 2 y 3 (ver Tabla 2.1.2) los cuales son píxeles de baja calidad. Como resultado se obtuvo 414 imágenes EVI con datos de alta calidad en formato ASCII.

3.3.4 DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La aplicación del filtrado de píxeles de baja calidad se tradujo a una pérdida significativa de datos dentro de las series de tiempo, Tabla 3.3.1. Una serie de tiempo corresponde a las valoraciones de un píxel durante todo el periodo de estudio (2001-2018). El número de series de tiempo total que abarca la extensión de páramo ecuatoriano fue de 196747, sin embargo, para la presente investigación se estudió 64774 series que corresponden al 32,93% del total del área del páramo, esta decisión se tomó considerando que las series de tiempo a estudiar deberían tener un 50% o más de datos disponibles para que las mismas puedan ser interpoladas posteriormente.

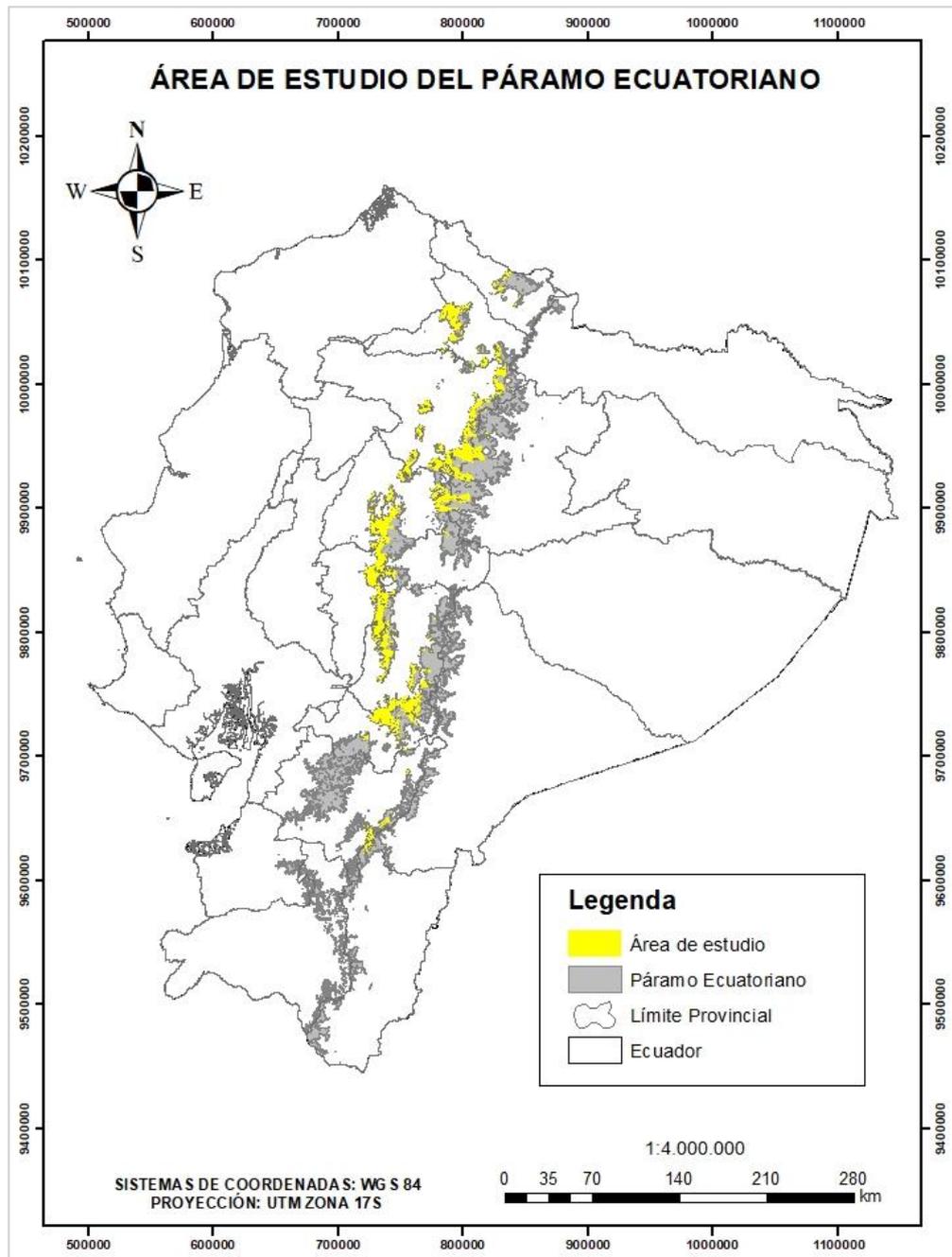
Tabla 3.3.1. Porcentaje de datos en cada serie de tiempo

Porcentaje de datos en cada serie de tiempo	Número de series de tiempo	Porcentaje de series de tiempo	Extensión del terreno que representa las series de tiempo (km ²)
90%	20	0,01%	1,25
85%	773	0,39%	48,3125
80%	4102	2,08%	256,375
75%	10915	5,55%	682,1875
70%	19094	9,70%	1193,375
65%	27423	13,94%	1713,9375
60%	37871	19,25%	2366,9375
55%	50575	25,71%	3160,9375
50%	64774	32,92%	4048,375
45%	80700	41,02%	5043,75
40%	99836	50,74%	6239,75
35%	118406	60,18%	7400,375
30%	134746	68,49%	8421,625
25%	150665	76,58%	9416,5625
20%	166009	84,38%	10375,5625
15%	179702	91,34%	11231,375
10%	192070	97,62%	12004,375
Número de series de tiempo total: 196747			

Elaborado por: (Borja, 2020)

Aplicando la consideración mencionada, el área de estudio se redujo a 4048,375 (km^2) lo que corresponde aproximadamente al 32% del área total del páramo ecuatoriano (Figura 3.3.3).

Figura 3.3.3. Área de estudio del páramo ecuatoriano



Elaborado por: (Borja, 2020)

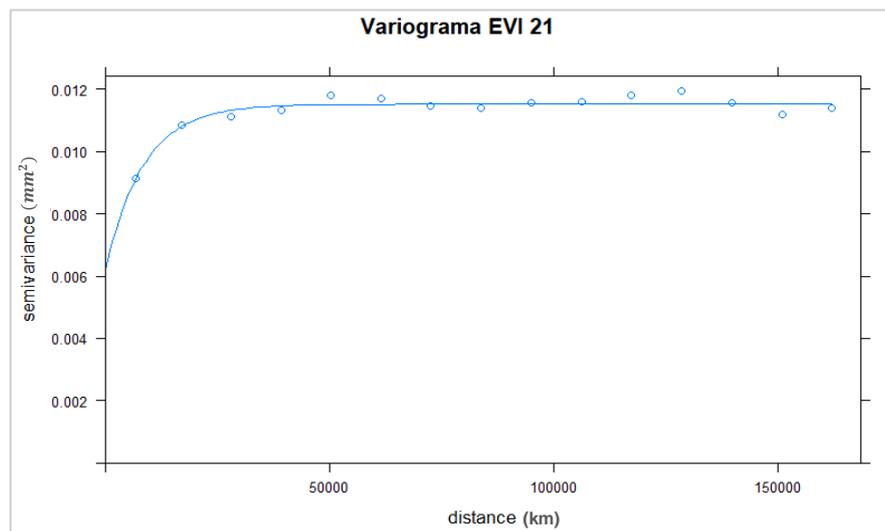
3.3.5 INTERPOLACIÓN DE DATOS PERDIDOS

La interpolación de datos de las series de tiempo se realizó en dos etapas, la primera a través de una interpolación espacial y la segunda a través de una interpolación temporal.

INTERPOLACIÓN ESPACIAL

La interpolación espacial se realizó mediante el método de interpolación Kriging con la ayuda del software R Studio. En primera instancia se realizó un variograma experimental para cada una de las imágenes (414). Posterior, se realizó el modelado de variograma teórico sobre la base del variograma experimental, para ello se tomaron métodos de ajuste manual (visual) para obtener los parámetros mejor ajustados al variograma experimental (Adhikary et al., 2015), se usó principalmente modelos exponenciales, gaussianos y esféricos. La Figura 3.3.4 muestra un ejemplo del modelado de variograma de tipo exponencial para el día 17 de noviembre del 2001.

Figura 3.3.4. Modelo de variograma de tipo exponencial para el día 17 /11 /2001



Elaborado por: (Borja, 2020)

Con el modelado de variograma se obtuvieron los parámetros pepita, rango y meseta, los cuales fueron utilizados para aplicar la interpolación Kriging. Con la aplicación de la interpolación Kriging se obtuvieron 406 imágenes rellenas, esto quiere decir que los 64774 píxeles presentes en cada imagen disponían de datos completos. Las 8 imágenes restantes no pudieron ser interpoladas por kriging ya

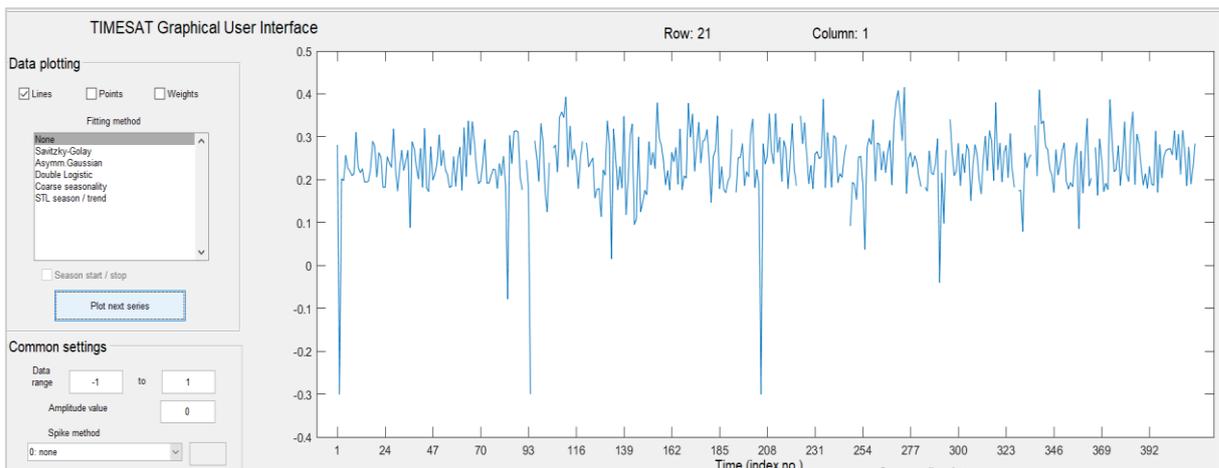
que el modelado de variograma no se realizó satisfactoriamente debido a la naturaleza de los datos.

INTERPOLACIÓN TEMPORAL

La interpolación temporal se realizó a través del software TIMESAT versión 3.3. Se utilizó las series de tiempo interpoladas en el paso anterior ya que el software requiere que exista menos del 25% de datos faltantes en una serie de tiempo para realizar de forma exitosa la interpolación (Gao et al., 2008a). TIMESAT procesa series de tiempo en archivos ASCII (Eklundh & Jönsson, 2017), por lo tanto las series de tiempo requirieron mantener este formato, además TIMESAT requiere que en la primera fila del archivo ASCII se proporcione la información de las series de tiempo a procesar. Por lo tanto, en la primera línea del archivo ASCII se colocó la información sobre el número de años que contiene cada serie de tiempo en este caso 18 años, el número de valores de datos por año (23) y el número de series de tiempo en el archivo (64774).

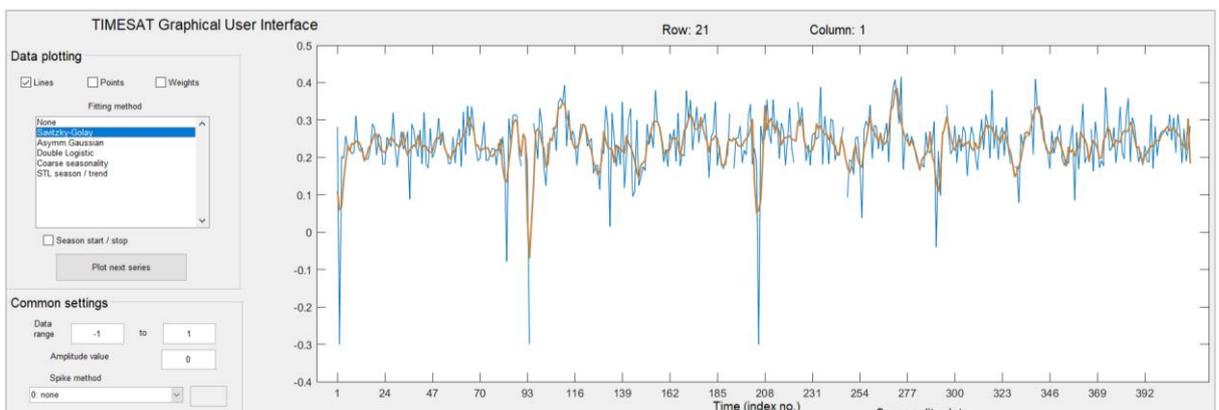
Para realizar el suavizado y relleno de datos se escogió el filtro Savistky-Golay, ya que este demostró el mejor ajuste (visual) con la naturaleza de los datos. Al aplicar el filtro, automáticamente la interfaz del software realiza el relleno de los espacios vacíos y elimina los datos atípicos. En la Figura 3.3.5 se muestra la interfaz de TIMESAT, tomando como ejemplo al píxel número 21, se puede observar que la línea de tiempo del píxel presenta espacios vacíos ya que aún no se ha aplicado el filtro Svistky-Golay. En cambio, en la Figura 3.3.6 ya se ha aplicado el filtro por lo que se muestra una línea de tiempo naranja con datos suavizados y continuos. Una vez concluido este paso, se obtuvieron como resultado 64774 series de tiempo, correspondientes a nuestra área de estudio, rellenas y suavizadas en su totalidad para su posterior análisis.

Figura 3.3.5. Interfaz de TIMESAT en la serie de tiempo 21, sin aplicación del método de suavizado



Elaborado por: (Borja, 2020)

Figura 3.3.6. Interfaz de TIMESAT en la serie de tiempo 21, con aplicación del método de suavizado



Elaborado por: (Borja, 2020)

3.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez realizado el relleno de datos faltantes, se utilizaron técnicas de estadística descriptiva para identificar y caracterizar el comportamiento de los patrones espacio– temporales de EVI y su correlación con Índices Atmosféricos Globales.

3.4.1 ANÁLISIS DE VARIABILIDAD EVI EN EL ÁREA DE ESTUDIO

El análisis de variabilidad de EVI se realizó a partir de las series de tiempo interpoladas en el paso anterior. El análisis se dividió en cuatro partes: análisis temporal, análisis espacial, análisis por ecosistemas y análisis de tendencias.

ANÁLISIS TEMPORAL

Se realizó el cálculo de los valores máximos, promedios, mínimos y coeficiente de variación (CV) de cada uno de los 64774 valores de EVI distribuidos espacialmente, para un solo mes (por ejemplo, enero) durante el periodo de 18 años y repitiendo este proceso para cada uno de los 12 meses. El coeficiente de variación se determinó a partir de la relación entre la desviación estándar y el promedio de los valores. Una vez que se determinaron los cuatro parámetros estadísticos, se calculó un promedio espacial (es decir, un promedio de los 64774 píxeles) de cada uno de los 4 parámetros (máximo, promedio, mínimo y CV) para cada mes. Posterior, se representó gráficamente los valores obtenidos en cuatro curvas estadísticas temporales (Barbosa et al., 2006). Este procedimiento se realizó con la finalidad de capturar y extraer los extremos de EVI (es decir los valores máximos y mínimos) y CV durante el periodo de estudio en el páramo ecuatoriano los cuales no podrían ser evidentes al representar los valores medios.

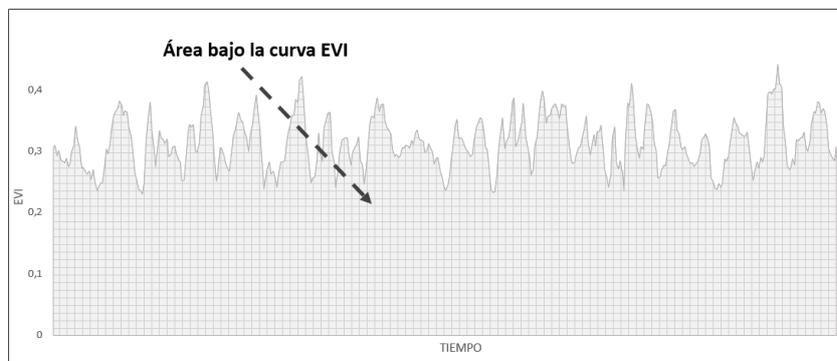
Sin embargo, también se requirió capturar el comportamiento estacional e interanual medio de toda el área de estudio para lo cual se procedió primeramente con el cálculo del promedio espacial (es decir, un promedio de los 64774 píxeles) y posterior se calculó el promedio mensual (12 valores mensuales por cada año). Los valores obtenidos se representaron gráficamente en 18 curvas las cuales indican el comportamiento estacional medio de EVI en los 18 años de estudio.

ANÁLISIS ESPACIAL

Para el desarrollo del análisis espacial se calcularon dos parámetros: la integral de la curva de las 64774 series de tiempo EVI y el coeficiente de variación, de igual modo, de las 64774 series de tiempo. Se hizo uso de la integral de EVI o área bajo la curva (ver Figura 3.4.1), debido a que éste puede ser un buen estimador de la fracción de la actividad fotosintética receptada por la vegetación (Paruelo et al., 1998) en todo el periodo de estudio. El coeficiente de variación fue escogido para determinar el grado de variación que ha experimentado un píxel durante todo el periodo de estudio. Los resultados obtenidos fueron representados en mapas de imágenes raster lo que facilitó la visualización del comportamiento y variabilidad de EVI en el espacio. Para una mejor comprensión de las imágenes, se dividió el área de estudio en tres secciones: A, B y C. La sección A, comprende la zona Norte

Occidental y Oriental del área de estudio, la sección B comprende la zona Centro Occidental y la sección C comprende la zona Centro Sur. Los análisis fueron realizados tomando en cuenta divisiones políticas (límites provinciales, cantonales y parroquiales).

Figura 3.4.1. Representación del Área bajo la curva de una serie de tiempo EVI (2001-2018)



Elaborado por: (Borja, 2020)

ANÁLISIS POR ECOSISTEMAS

El análisis por ecosistemas se llevó a cabo tomando en cuenta los tipos de ecosistemas que predominaban en el área de estudio, esta metodología se escogió a partir del criterio de que las series de tiempo de los índices espectrales de vegetación tiene diversos patrones estacionales dependiendo del tipo de cobertura terrestre (Van Leeuwen et al., 2013). Por lo tanto, en el presente estudio se escogió los ecosistemas mencionados en la Tabla 3.4.1, dichos ecosistemas fueron seleccionados a partir del mapa de cobertura y uso del suelo, tomando en cuenta aquellos que tengan una extensión representativa dentro del área de estudio.

Tabla 3.4.1. Ecosistemas predominantes en el área de estudio

Código	Ecosistema de páramo	Porcentaje en el área de estudio
HsSn02	Herbazal del Páramo	67%
AsSn01	Arbustal siempre verde y Herbazal del Páramo	9,59%
HsSn03	Herbazal húmedo montano alto superior del Páramo	6,19%
Inter01	Intervención	5,29%
HsNn03	Herbazal y Arbustal siempre verde subnival del Páramo	4,85%
RsSn01	Frailejones	1,25%
HsNn01	Herbazal húmedo subnival del Páramo	0,69%

Elaborado por: (Borja, 2020)

El Mapa 3.4.1 muestra la ubicación de los diferentes tipos de ecosistemas de páramo dentro del área de estudio. Se puede apreciar que el ecosistema Herbazal del Páramo (color verde) cubre la mayor extensión del área ocupando un 69% de la misma, situándose en las zonas norte, sur, occidente y oriente, a este le sigue el ecosistema Arbustal siempre verde y Herbazal del Páramo (color morado) con un 9,59% del área el cual se encuentra presente en la zona centro occidental y nororiental. El ecosistema Herbazal húmedo montano alto superior del Páramo (color amarillo) cubre el 6,19% del área y se ubica en la zona centro occidental. Se tomó en cuenta además para este estudio las zonas que presentan algún tipo de intervención antrópica (color gris), estas zonas se encuentran dispersas en toda el área de estudio ocupando alrededor del 5,29% del área. El ecosistema Herbazal y Arbustal siempre verde subnival del Páramo (color naranja) ocupa el 4,85% del área y se ubica en la zona centro occidente. El ecosistema Rosetal caulescente y Herbazal del Páramo más conocido como Frailejos (color rosa), se presenta únicamente en la zona norte y ocupa el 1,25% del área de estudio. Finalmente se tomó en cuenta al ecosistema Herbazal húmedo subnival del Páramo (color rojo) presente en una pequeña sección de la zona noroccidental con un 0,69% del área.

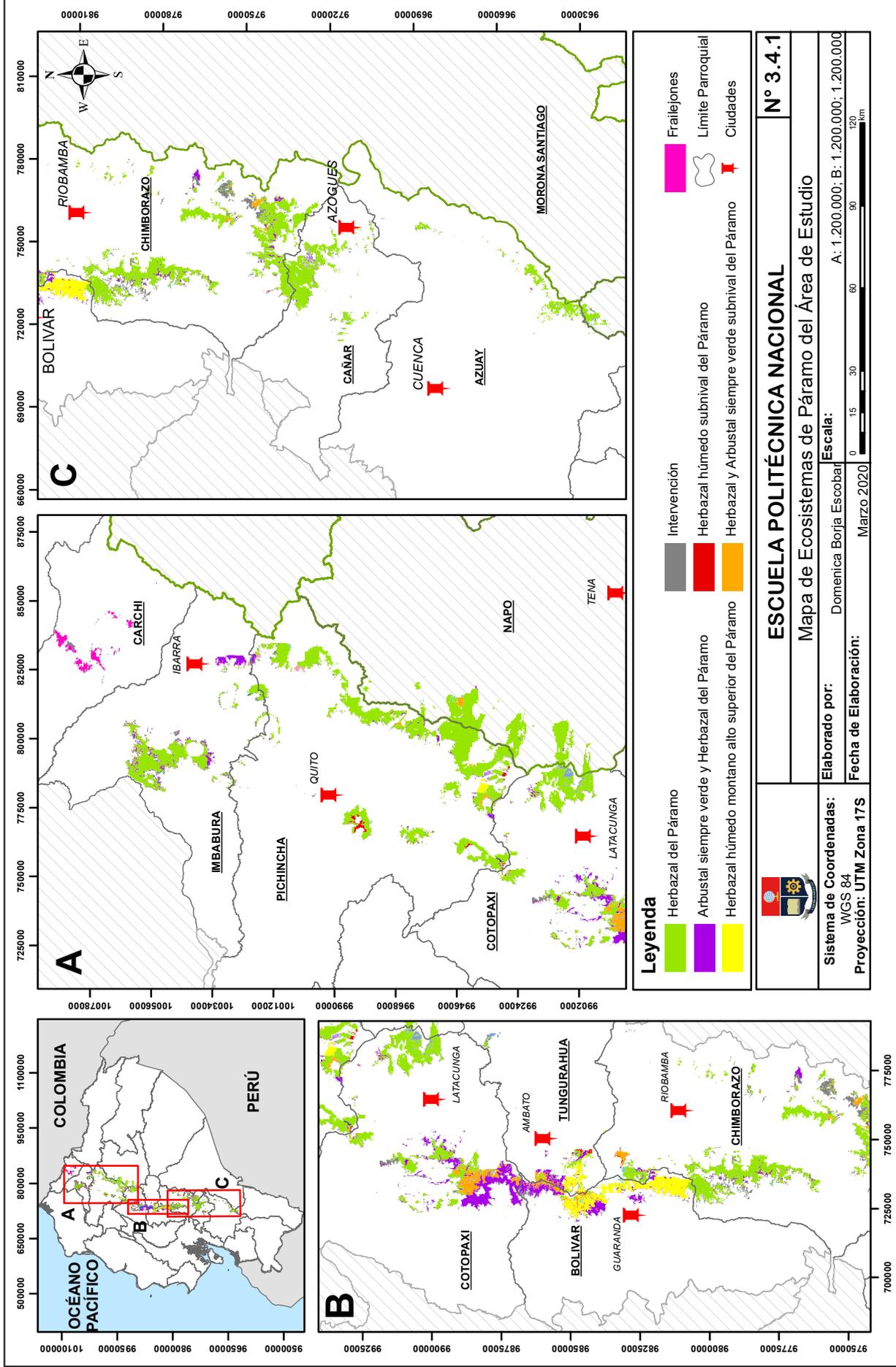
El análisis de los datos se realizó a través de áreas de muestras, se escogió nueve píxeles en cada tipo de ecosistema, estos píxeles conformaron un área de muestra de $0,56 \text{ km}^2$, la ubicación de las áreas se puede observar en el Mapa 3.4.2. Para el ecosistema Herbazal del Páramo se escogió cinco áreas de muestra debido a que este ecosistema se encuentra presente en toda la extensión del área de estudio, por ello las muestras se encuentran distribuidas en la zona norte, una en la parte occidental (Área 1) y otra en el parte oriental (Área 2); en la zona centro occidental (Área 3) y en la zona centro sur, una en el parte occidental (Área 4) y otra en el parte oriental (Área 5). De igual forma para el ecosistema Arbustal siempre verde y Herbazal del Páramo se escogió dos muestras una en la zona norte oriental (Área 6) y otra en la zona centro occidental (Área 7). Para las áreas de intervención antrópica se escogió tres áreas de muestras ubicadas en las zonas norte (Área 9), centro (Área 10) y sur (Área 11) del área de estudio. Para el resto de los ecosistemas se escogió una sola área de muestra dependiendo de la

ubicación del tipo de ecosistema. Para cada área de muestra se calculó el promedio de los nueve píxeles y se representó gráficamente el promedio mensual y las desviaciones estándar de la variabilidad interanual de los 18 años pertenecientes al periodo de estudio.

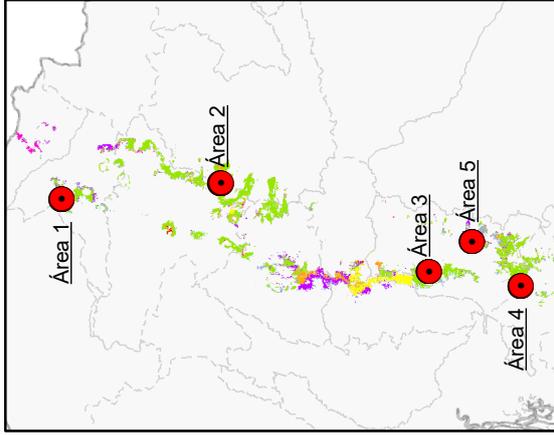
ANÁLISIS DE TENDENCIA TEMPORAL

Para realizar el análisis de las tendencias temporales de EVI se usó la prueba de tendencia de Mann-Kendall la cual ha sido una de las pruebas no paramétricas ampliamente usadas para detectar tendencias significativas en series de tiempo (Hamed, 2008). La prueba de Mann-Kendall permite estudiar la homogeneidad de los datos desde el punto de vista de tendencias positivas o negativas considerando el número de veces en que cada mes, estación o año es mayor o menor que el dato que le precede. Además, se realizó la prueba de Theil -Sen la cual permite evaluar la magnitud de las tendencias, calculando la pendiente entre cada combinación de pares y encontrando el valor medio entre la serie de tiempo (Maita, 2015). Los resultados de las pruebas de tendencias fueron representados gráficamente a través de mapas temáticos.

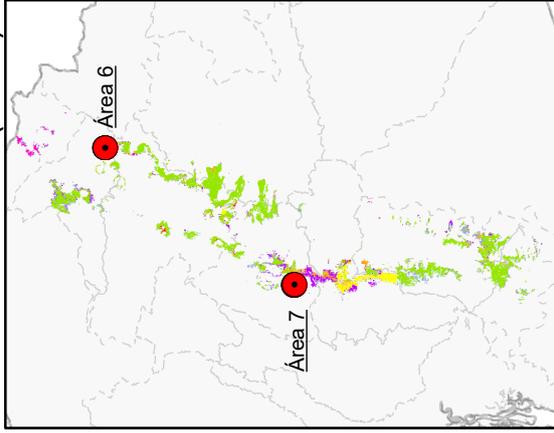
Un requisito común de las pruebas de tendencia paramétricas y no paramétricas es que no exista una correlación serial ya que esta característica podría aumentar la posibilidad de una respuesta significativa, incluso en ausencia de una tendencia. Dicho efecto puede tratarse eliminando la correlación de los datos antes de aplicar la prueba de tendencia (Hamed, 2008). Sin embargo, Yue & Wang (2002) explican que cuando el tamaño de la muestra es suficientemente grande, la correlación en serie no influye significativamente en la prueba de Mann-Kendall, por lo que un tratamiento previo a las series de tiempo distorsionará seriamente la posibilidad de que la prueba detecte la tendencia. Por lo tanto, tomando en cuenta la magnitud del tamaño de la muestra y el interés de detectar la magnitud de la verdadera tendencia de las series de tiempo no se realizó ningún tratamiento previo de los datos de EVI para la aplicación de la prueba de tendencias de Mann-Kendall en el presente estudio.



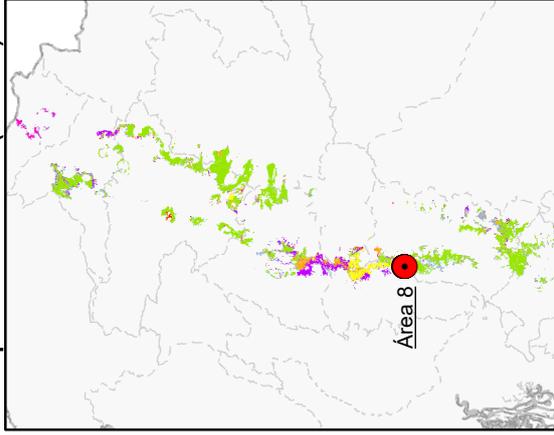
Herbazal del Páramo (HsSn02)



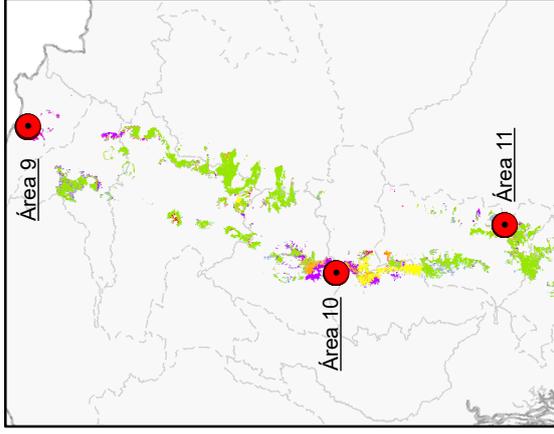
Arbustal siempre verde y Herbazal del Páramo (AsSn01)



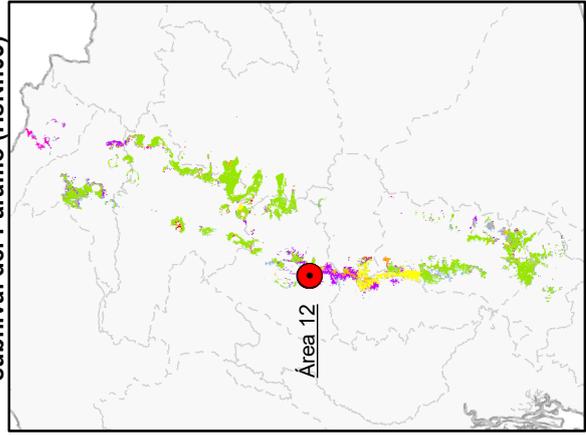
Herbazal húmedo montano alto superior del Páramo (HsSn03)



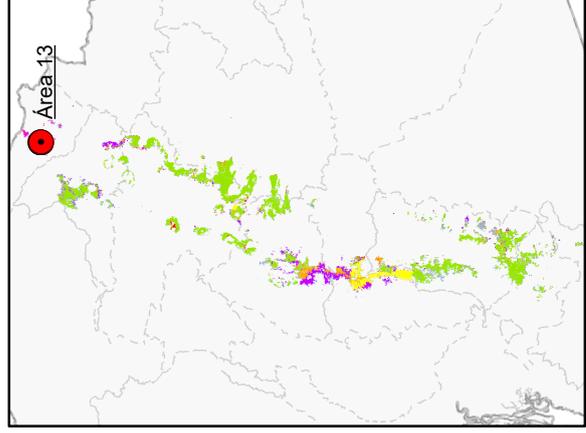
Intervención (Inter01)



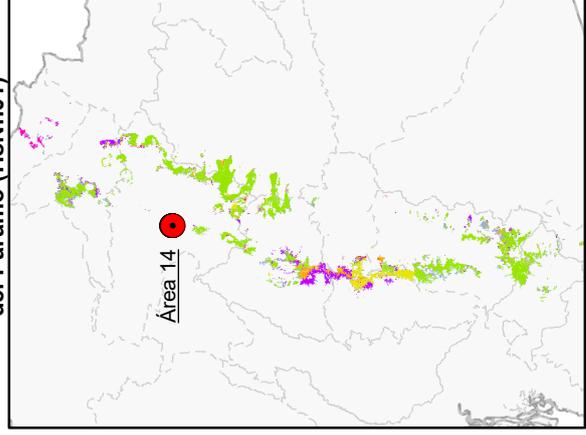
Herbazal y Arbustal siempre verde subnival del Páramo (HsNn03)



Frailejones (RsSn01)



Herbazal húmedo subnival del Páramo (HsNn01)



Legenda

Ubicación de las áreas de muestra en cada ecosistema

Límite Provincial

HsSn02
AsSn01
HsSn03
Inter01
HsNn03

RsSn01
HsNn01

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

Mapa de ubicación de áreas de muestra en cada tipo de ecosistema N° 3.4.2

Elaborado por: Domenica Borja Escobar

Fecha de Elaboración: Marzo 2020

3.4.2 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN EVI E ÍNDICES ATMOSFÉRICOS GLOBALES

Para determinar la correlación entre EVI y los Índices Atmosféricos Globales se usó el Coeficiente de Determinación (R^2). Este método fue escogido ya que dicho coeficiente cuantifica el grado de asociación que existe entre dos variables independientes el cual es uno de los objetivos de la presente investigación. El Coeficiente de Determinación es una medida acotada y sus límites se encuentran entre 0 y 1, donde un $R^2 = 1$ significa un ajuste lineal perfecto (Martínez Rodríguez, 2005). Se escogió cinco índices atmosféricos globales lo cuales fueron: Índice de Oscilación Antártica, Índice Multivariado ENOS, Índice de Oscilación del Atlántico Norte, Índice de Oscilación Madden-Julian y el Índice de Oscilación Decadal del Pacífico. Los datos de los índices mencionados fueron descargados de la página web <https://psl.noaa.gov/data/climateindices/> de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) y se utilizaron aquellos datos correspondientes a la ubicación del territorio ecuatoriano. Para el caso del Índice Multivariado ENOS, la literatura indica que el efecto ENOS en Ecuador puede ser evaluado por las regiones El Niño 1+2 y El Niño 3.4, sin embargo, para el presente trabajo se utilizaron únicamente los datos correspondientes a la región El Niño 1+2, esta decisión se tomó debido a la cercanía de dicha región con el territorio ecuatoriano, a pesar de lo indicado, la región El Niño 3.4 puede ser considerada para futuras investigaciones.

Los datos del Índice de Oscilación Madden-Julian (MJO) fueron descargados de la página [web https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_mjo_index/mjo_index.shtml](https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_mjo_index/mjo_index.shtml). Para determinar la correlación se utilizaron los datos de MJO para 120°W y 40°W. Dado que los datos disponibles no presentan el MJO para la longitud dentro del territorio ecuatoriano, se construyó el MJO para 80°W aplicando una interpolación lineal entre el MJO 120°W y 60°W (Torres-Pineda & Pabón-Caicedo, 2017).

El cálculo del coeficiente de determinación se realizó a partir de los promedios mensuales EVI y los valores mensuales de los índices atmosféricos descargados de la web. Primero se determinaron los R^2 anuales para cada índice, posterior se

escogió el año en el cual se presentó el mayor R^2 y para dicho año se determinó la correlación existente entre cada serie de tiempo (64774) y los índices. Los resultados obtenidos se representaron gráficamente a través de imágenes ráster. Esta actividad se realizó para apreciar la distribución espacial de la correlación entre EVI y los cinco índices atmosféricos durante un periodo representativo.

CAPÍTULO 4

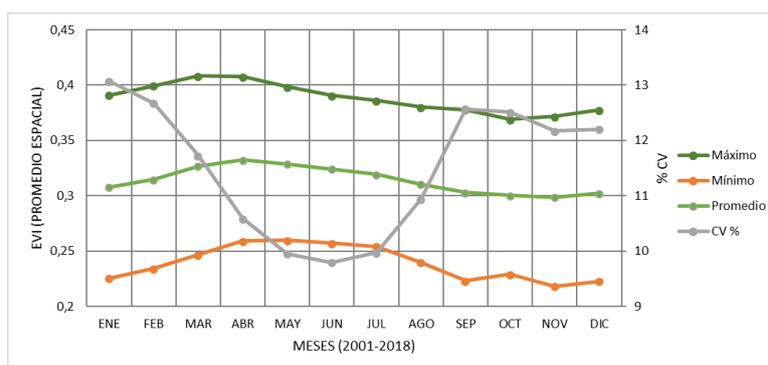
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 ANÁLISIS DE VARIABILIDAD DE EVI EN EL ÁREA DE ESTUDIO

4.1.1 ANÁLISIS TEMPORAL

La Figura 4.1.1 muestra los valores máximos, mínimos, promedio y CV mensuales de EVI en toda el área de estudio durante el periodo 2001-2018. Las tres curvas EVI, siguen variaciones temporales similares, presentando picos (meses de mayor EVI) durante los meses de marzo y abril (0,40 EVI máximo; 0,25 EVI mínimo; 0,33 EVI medio) y valles (meses de menor EVI) en los meses de octubre y noviembre (0,36 EVI máximo; 0,21 EVI mínimo; 0,29 EVI medio). Se puede diferenciar, además, que a partir del mes de noviembre ocurre un ligero incremento en los valores EVI que puede deberse al inicio de la segunda temporada de lluvia en el año y que además denotaría el inicio de la temporada de crecimiento de la vegetación. Por otro lado, la curva del coeficiente de variación nos indica que existe una baja variabilidad de EVI en cada mes del periodo de estudio (de 9,7% a 13%), y se puede observar notoriamente que esta variabilidad disminuye conforme se acerca al mes de junio el cual corresponde al periodo seco en la región. Por lo tanto, la curva de CV nos sugiere que la vegetación no ha sufrido cambios drásticos en cada año del periodo de estudio durante los meses en donde normalmente se presentan bajas precipitaciones.

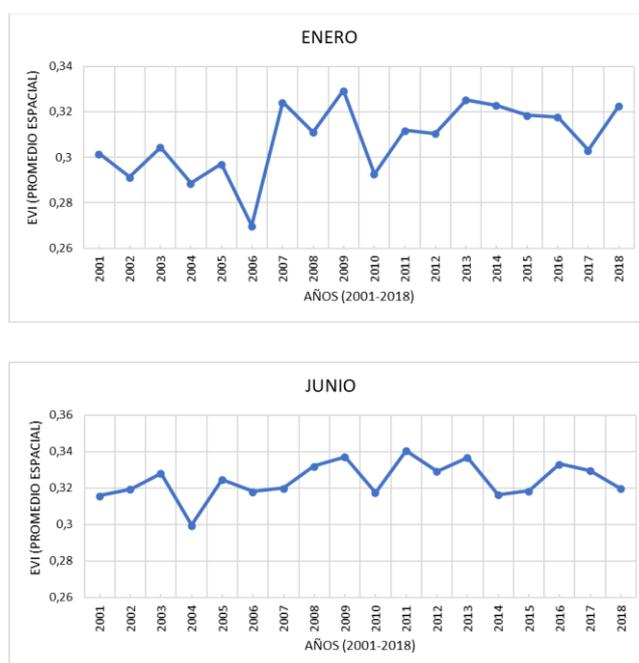
Figura 4.1.1 Valores máximos, mínimos, media y CV mensuales de EVI periodo 2001-2018



Elaborado por: (Borja, 2020)

La Figura 4.1.2 muestra el comportamiento de EVI del mes en donde se evidenció el mayor y menor coeficiente de variación durante el periodo de estudio 2001-2018. Esta figura nos permite visualizar las grandes fluctuaciones producidas en el mes enero de cada año, descartando los años 2006 al 2010. En contraste, la curva del mes de junio si bien si presentan fluctuaciones estas no son tan marcadas como el mes de enero, manteniéndose en un rango de valores de EVI entre 0,3 a 0,34 unidades.

Figura 4.1.2. Comportamiento de EVI durante los meses de mayor y menor coeficiente de variación



Elaborado por: (Borja,2020)

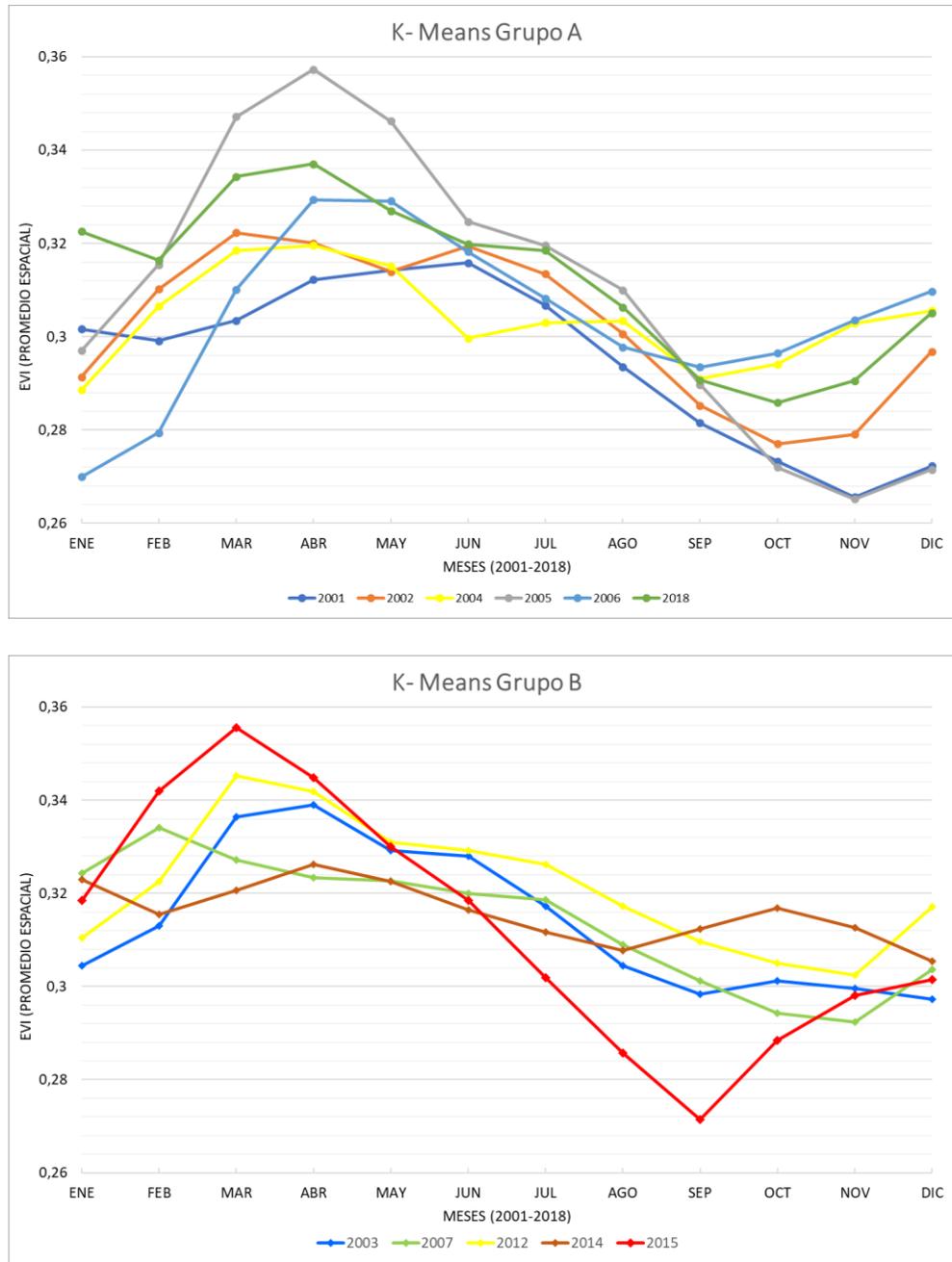
Los patrones mensuales y anuales de la variabilidad de EVI en toda la extensión del área de estudio para el periodo 2001-2018 se muestran en la Figura 4.1.3, estos patrones se basan en los valores mensuales medios de los 64774 píxeles. Se presentan 18 curvas, cada una correspondiente a cada año del periodo de estudio. El comportamiento a escala estacional de la vegetación del páramo visualizado a través de las curvas no presenta un patrón definido para todos los años. Por ello se dividió a las 18 curvas en 3 grupos a partir del método de agrupamiento K-Means. Este método divide un conjunto de n observaciones en k grupos en el que cada observación pertenece al grupo cuyo valor medio es más cercano. Las curvas de los Grupos A y B, siguen variaciones temporales medianamente similares, exhiben

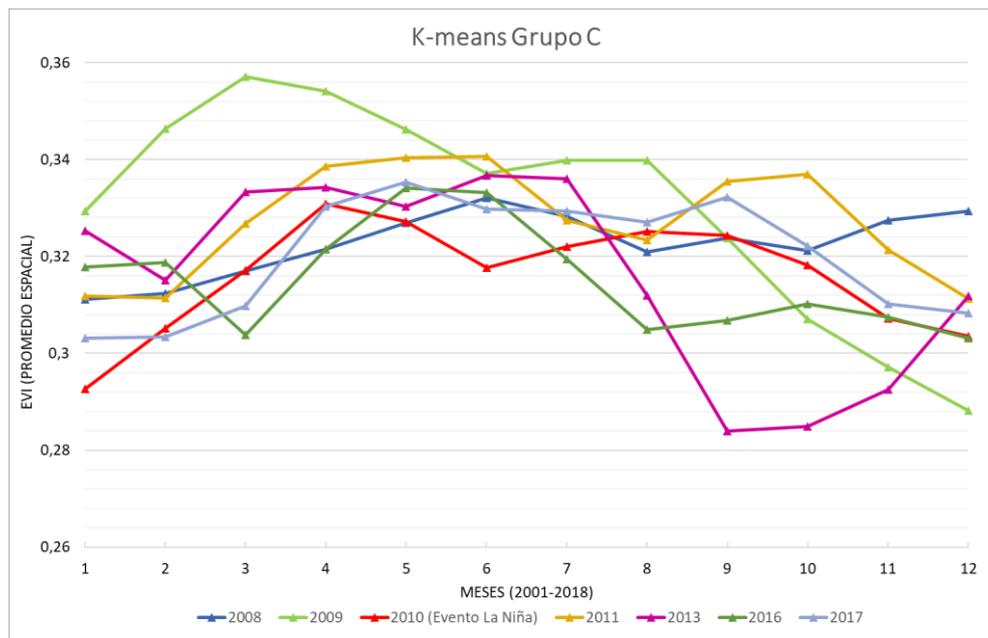
picos y valles importantes, características que coinciden con las estaciones húmedas y secas en la región de estudio. Los picos se presentan en la temporada de lluvias, generalmente durante los meses de marzo y abril (a excepción del año 2001 que presenta una temporada de crecimiento más amplia en comparación al resto de años con un pico en el mes de junio) y los valles ocurrieron durante la estación seca de la región de estudio en los meses de octubre y noviembre, teniendo así en la mayoría de las curvas estaciones de crecimiento unimodales. Estos resultados coinciden ampliamente con los resultados obtenidos en el estudio de Barbosa et al. (2006) y Ramírez & Vallejo, (2018) indicando que existe una fuerte señal de la respuesta de la vegetación ante el régimen de precipitación propio de una región, en este caso, en los años presentados en los grupos A y B, la vegetación del páramo ecuatoriano respondió al régimen de precipitación que presenta la región sierra del país.

En las curvas del Grupo C, es más complejo establecer un patrón de comportamiento, pues se puede observar que los meses en que se presentan los picos y valles varían en cada año sin establecerse un patrón definido, además, se puede notar que dichas curvas presentan más de un periodo de crecimiento, pero estos suelen ser muy cortos de alrededor de un mes. Las variantes expresadas en los años mencionados pueden ser causadas por anomalías en los patrones climáticos del área de estudio. Por ejemplo, durante el año 2010 se presentó un evento La Niña de intensidad muy fuerte (Figura 2.1.4). Vuille et al. (2000) indica que cuando se presenta un evento de esta clase las precipitaciones en los Andes ecuatorianos aumentan por encima del promedio. Por lo tanto, dicha anomalía podría haber influido sobre la vegetación del área de estudio expresándose en un aumento de EVI en meses en los cuales este debería disminuir. Estas particularidades se observan en la curva del año 2010, pues en éste, la intensidad del evento La Niña en los meses de julio-noviembre fue muy fuerte y precisamente en estos meses la curva percibe un incremento de EVI. Sin embargo, el año 2010, fue el único año del periodo de estudio en donde se pudo detectar una relación entre el comportamiento estacional de EVI con los eventos ENOS, sugiriéndonos que la vegetación del área de estudio puede verse afectada directamente solo por eventos ENOS de intensidad muy fuerte. En cuanto al resto de curvas, su variado comportamiento nos sugiere que la respuesta de la vegetación puede ser el

resultado de la combinación de una o varias anomalías en las distintas variables climatológicas de la región estudiada.

Figura 4.1.3 Patrones mensuales y anuales de la variabilidad EVI (2001-2018)





Elaborado por: (Borja, 2020)

4.1.2 ANÁLISIS ESPACIAL

El Mapa 4.1.1 muestra la distribución espacial del área bajo la curva de las series de tiempo EVI durante el periodo 2001-2018. Aquellos píxeles de color más cercano al azul representan a los valores más altos del área de la serie de tiempo EVI, mientras que los píxeles de color más cercano al naranja contienen los valores más bajos. Para una mejor visualización, se dividió el área de estudio en tres secciones, A, B y C. La sección A, muestra la zona norte del páramo, la sección B muestra la zona centro occidental y la sección C muestra la zona sur.

De modo general, se puede observar que se presentan los valores EVI más altos en la Cordillera Oriental, lo que nos indica que en aquellas zonas hay una mayor productividad. Por otro lado, en la Cordillera Occidental se presentan los valores EVI más bajos lo que infiere que en la zona predomina vegetación débil y escasa.

Al visualizar la zona oriental de la Sección A se puede notar que en dicha zona se presentan los valores más altos de EVI de toda la extensión del área estudiada, específicamente en ciertas áreas de las parroquias de Cotundo, Archidona y Pintag, se visualizan pequeñas extensiones de terreno con valores muy altos de EVI. Dadas estas características podemos inferir que dichas zonas han presentado durante el periodo de estudio una vegetación abundante y vigorosa. Buytaert et al. (2006) indican que en las laderas orientales de los páramos predominan los climas

pluviales húmedos a hipérrhúmedos, por lo tanto, el comportamiento de EVI en estas áreas puede deberse a estas características climáticas.

En la sección B, se puede notar claramente que los valores más bajos de EVI se presentan entre los límites de las provincias Bolívar, Tungurahua y Chimborazo. Dichas áreas coinciden con la ubicación de la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo cuyo ecosistema es árido con aspecto desértico (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2013) lo cual puede explicar los valores bajos de dicha zona. En contraste, entre los límites de las parroquias de Pujilí, Guangaje y Chochapamba de la provincia de Cotopaxi se observa claramente una pequeña área con valores extremadamente altos de EVI. Dentro de dicha área se originan varios ríos secundarios lo que podría indicar una gran disponibilidad de agua en el sector y explicar los altos valores de EVI, sin embargo, al no hallarse una explicación más contundente sobre estos valores, dicha área requería especial atención en investigaciones futuras. En las parroquias Pangor y Pallatanga de la provincia de Chimborazo se presenta una extensa área con valores medianamente altos, lo que constituiría a estas áreas como las más productivas o con vegetación más vigorosa de la Cordillera Occidental.

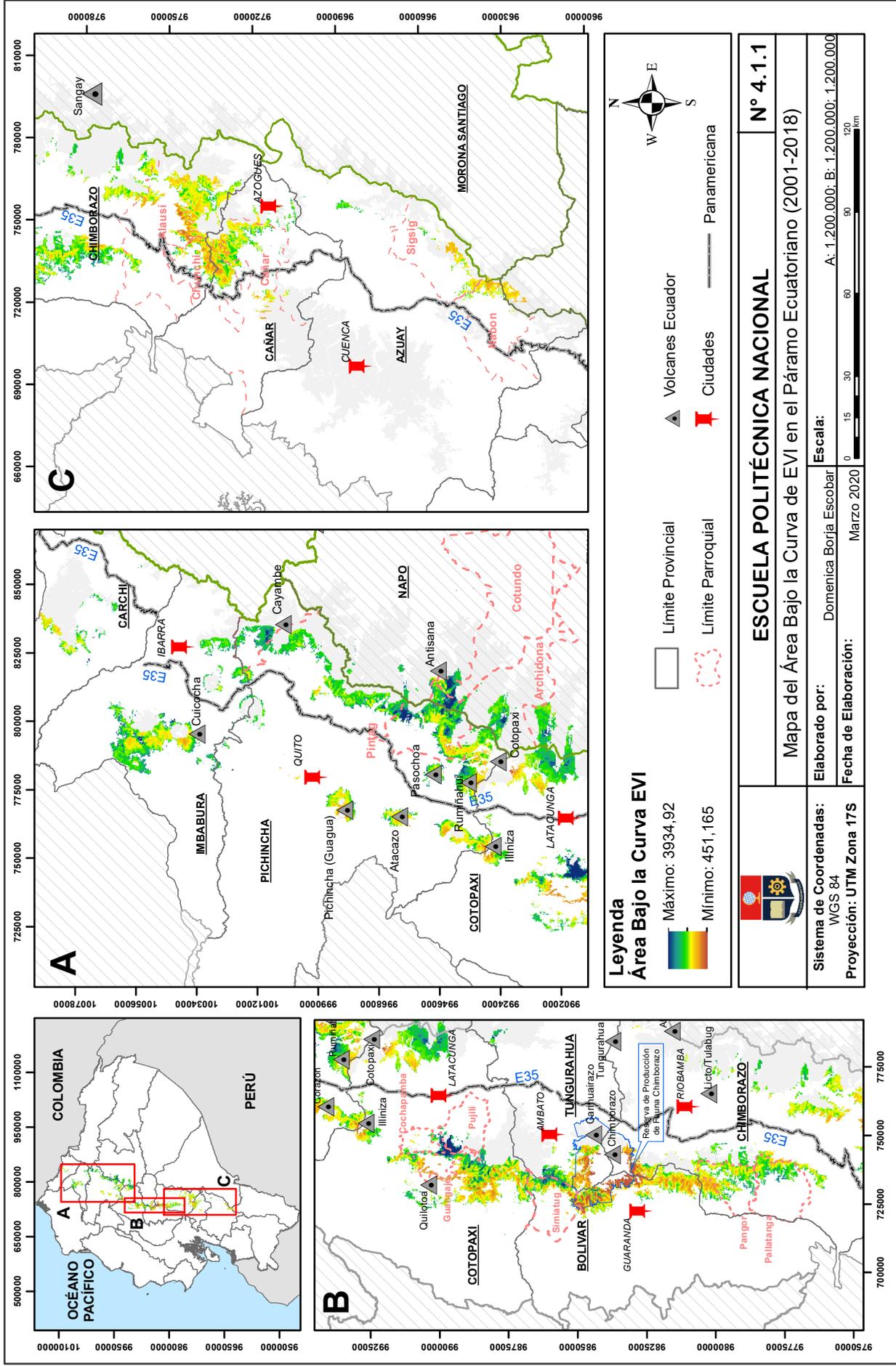
La sección C, correspondiente a la zona sur del páramo, presenta en general valores entre la media a bajos. Los valores más bajos de EVI se presentan entre los límites de las provincias de Chimborazo y Cañar. Esta respuesta de la vegetación coincide con las características del sur del páramo que está influenciado por la corriente de Humbolt que otorga a estas zonas características secas (Buytaert et al., 2006).

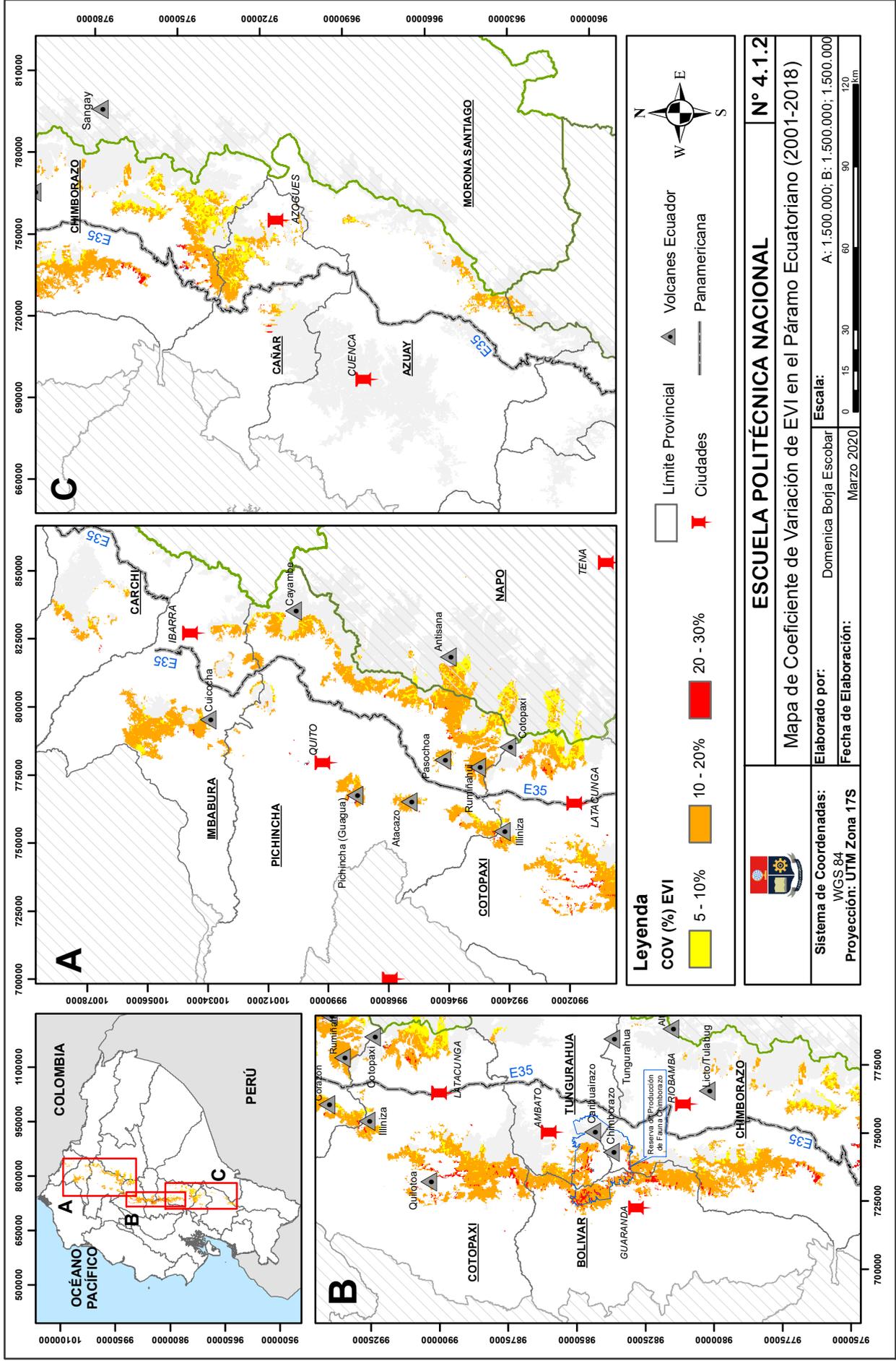
El Mapa 4.1.2 se desarrolló a partir del cálculo del coeficiente de variación de cada una de las 64774 series de tiempo de los valores EVI durante el periodo 2001-2018. Esto quiere decir que cada píxel en el mapa está representado por la variación en porcentaje que ha tenido el mismo durante todo el periodo de estudio. De forma general, se obtuvieron bajas variaciones entre el 5 al 30%. Los píxeles de color amarillo representan a aquellas variaciones en un rango del 5 al 10%, los píxeles de color naranja representan las variaciones en un rango del 10 al 20 % y finalmente los píxeles de color rojo representan las más altas variaciones en un rango del 20 al

30%. De igual forma que en el Mapa 4.2.1, se dividió el área de estudio en tres secciones A, B y C para una mejor visualización.

Al analizar en conjunto la extensión completa del área de estudio se puede observar que se encuentra dominada por variaciones entre el 10 al 20%. Este resultado se respalda con el estudio realizado por Van Leeuwen et al., (2013) en donde determinaron que la variabilidad interanual de NDVI en las Montañas de los Andes representada por el COV presentó variaciones idénticas entre el 10 al 20%. En cuanto a las variaciones interanuales mínimas con un rango del 5 al 10% obtenidas en este estudio, estas se localizaron en las laderas de la Cordillera Oriental específicamente en las zonas centro y sur del área de estudio. Los gráficos de variabilidad de NDVI presentados por Van Leeuwen et al., (2013) muestran mínimas variaciones entre el 0 al 5% en las regiones amazónicas, tomando en cuenta este antecedente, los resultados obtenidos en este estudio nos sugieren que la vegetación del páramo ecuatoriano localizada en las cercanías de la región amazónica no sufre variaciones interanuales importantes.

Las máximas variaciones registradas se encontraron en un rango del 20 al 30%, y estas se distribuyeron sin seguir un patrón específico en la Cordillera Occidental, a pesar de la dispersión de estas variaciones se puede observar que en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo se concentra gran parte de estas, debido a la dispersión de los resultados obtenidos, estos nos podrían sugerir que dichas áreas con altas variaciones podrían estar sujetas a alteraciones de tipo antropológico.





4.1.3 ANÁLISIS POR ECOSISTEMA

La Figura 4.1.4 muestra la respuesta estacional de EVI en los diferentes tipos de ecosistemas presentes en el área de estudio, cada gráfica de la figura está desarrollada a partir del promedio de 9 píxeles y el promedio mensual durante 18 años. Las desviaciones estándar (barras verticales) son indicativos de la variabilidad interanual. Las curvas de las series de tiempo EVI exponen como los diferentes tipos de ecosistemas ubicados en distintas zonas del páramo tienen patrones estacionales similares. El momento de los valores máximos de EVI en la mayoría de los ecosistemas se produce durante el periodo de marzo a abril y el momento de los valores mínimos se produce durante el periodo de noviembre a diciembre. Sin embargo, este patrón no representa a los ecosistemas Herbazal del Páramo (Área 2) y Herbazal y arbustal siempre verde subnival del páramo (Área 12), ya que estos presentan una temporada de crecimiento más larga en comparación a los otros ecosistemas.

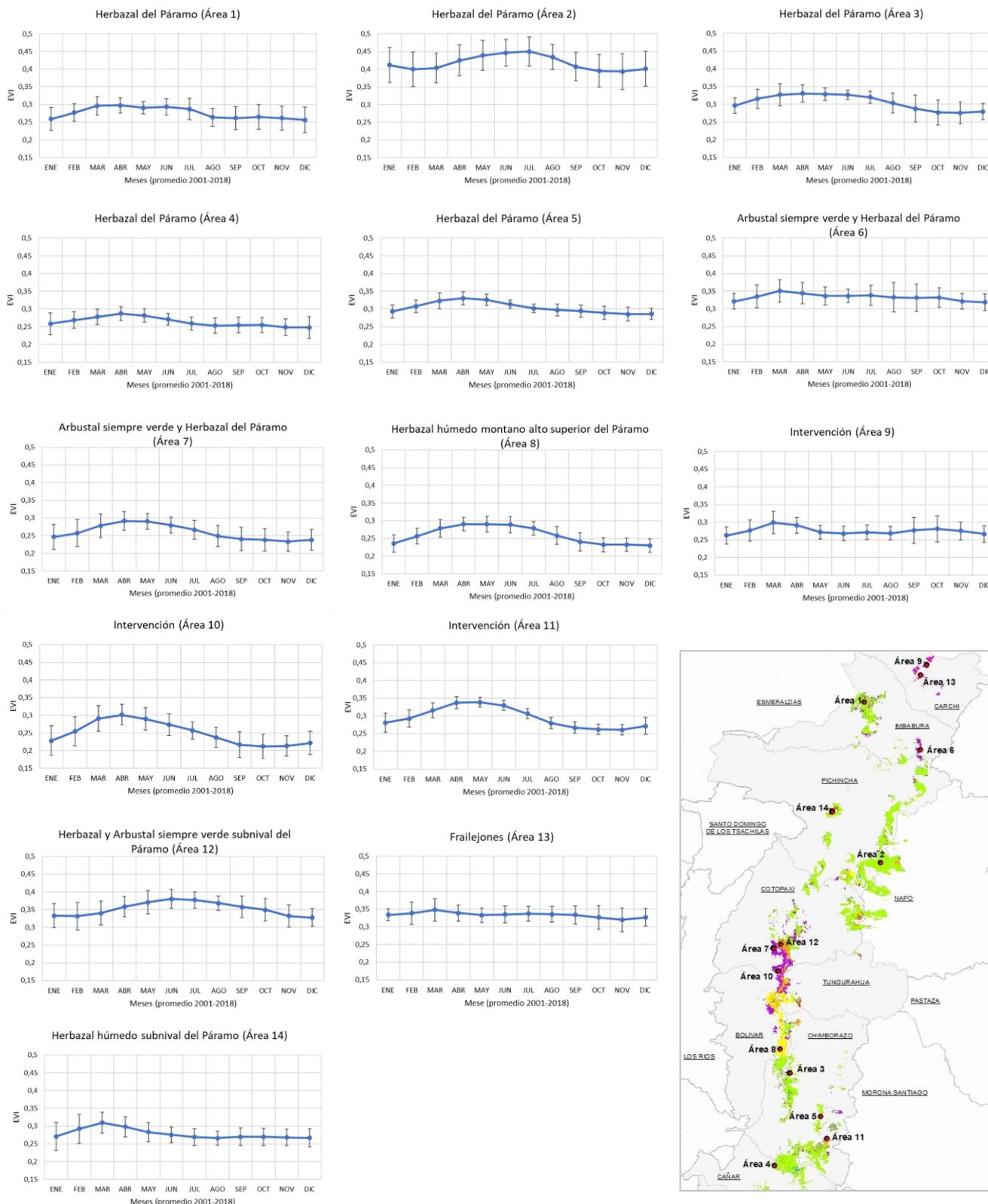
En las gráficas de los ecosistemas Herbazal del Páramo y Arbustal siempre verde y Herbazal del páramo, se puede apreciar que, a pesar de mantener un similar comportamiento estacional, en un mismo ecosistema pueden variar moderadamente los valores EVI dependiendo la ubicación del área de muestra. En este caso las áreas ubicadas en las zonas orientales presentaron valores EVI mayores a las áreas de la zona occidental. El ecosistema Herbazal del Páramo (Área 2), destaca entre todos los ecosistemas por presentar los valores más altos de EVI (0,39-0,44), esta particularidad puede deberse a que dicha área se encuentra ubicada entre los límites de la provincia de Pichincha y la provincia amazónica de Napo, por lo tanto, la respuesta de la vegetación estaría ligada a los climas húmedos de esta región. Sin embargo, este resultado no concuerda con el estudio realizado por Ramírez & Vallejo, (2018) ya que los autores encontraron que el ecosistema que presenta valores más altos de EVI en la zona norte del páramo ecuatoriano fue el ecosistema Herbazal Húmedo Montano alto superior del páramo. Estas diferencias en los resultados pueden deberse a los distintos métodos de manejo de datos empleados en los estudios, por ejemplo, los autores mencionados no realizaron el filtrado de calidad de datos a través de la capa reliability, proceso que en el presente estudio sí fue realizado. En cuanto a las áreas de muestra de las zonas de intervención antrópica a pesar de ser tomados en diferentes

ubicaciones no presentaron variaciones de EVI significativas como los ecosistemas anteriormente mencionados, sin embargo, sigue prevaleciendo la zona oriental con valoraciones mayores.

Al observar el comportamiento del ecosistema Herbazal y Arbustal siempre verde subnival del Páramo (Área 12) ubicado en la zona occidental se puede notar que éste presenta los valores más altos de EVI (0,32-0,38) después del Herbazal del Páramo (Área 2), dada la ubicación occidental de este ecosistema, se esperaría que la valores EVI fueran menores a ecosistemas orientales. Este ecosistema tiene un bioclima hiperhúmedo a ultrahúmedo, las especies de vegetación que allí habitan han desarrollado adaptaciones fisiológicas significativas debido a las variaciones de temperatura y humedad que pueden incluir congelamiento y descongelamiento del agua en el suelo en un mismo día (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2013), por lo tanto, los altos valores de EVI obtenidos pueden deberse a las adaptaciones que ha desarrollado la vegetación a las condiciones extremas de la zona.

De otro lado, se puede observar que la variabilidad interanual en los ecosistemas ha presentado los valores más bajos en las áreas de muestra ubicadas en las zonas sur del páramo. Dichos resultados convergen con el análisis realizado en el Mapa 4.2.2. en donde las extensiones del páramo ubicadas en las provincias del sur mostraban los coeficientes de variación más bajos de toda el área de estudio.

Figura 4.1.4. Variabilidad del Índice de Vegetación Mejorado por ecosistemas específicos



Elaborado por: (Borja, 2020)

4.1.4 ANÁLISIS DE TENDENCIAS

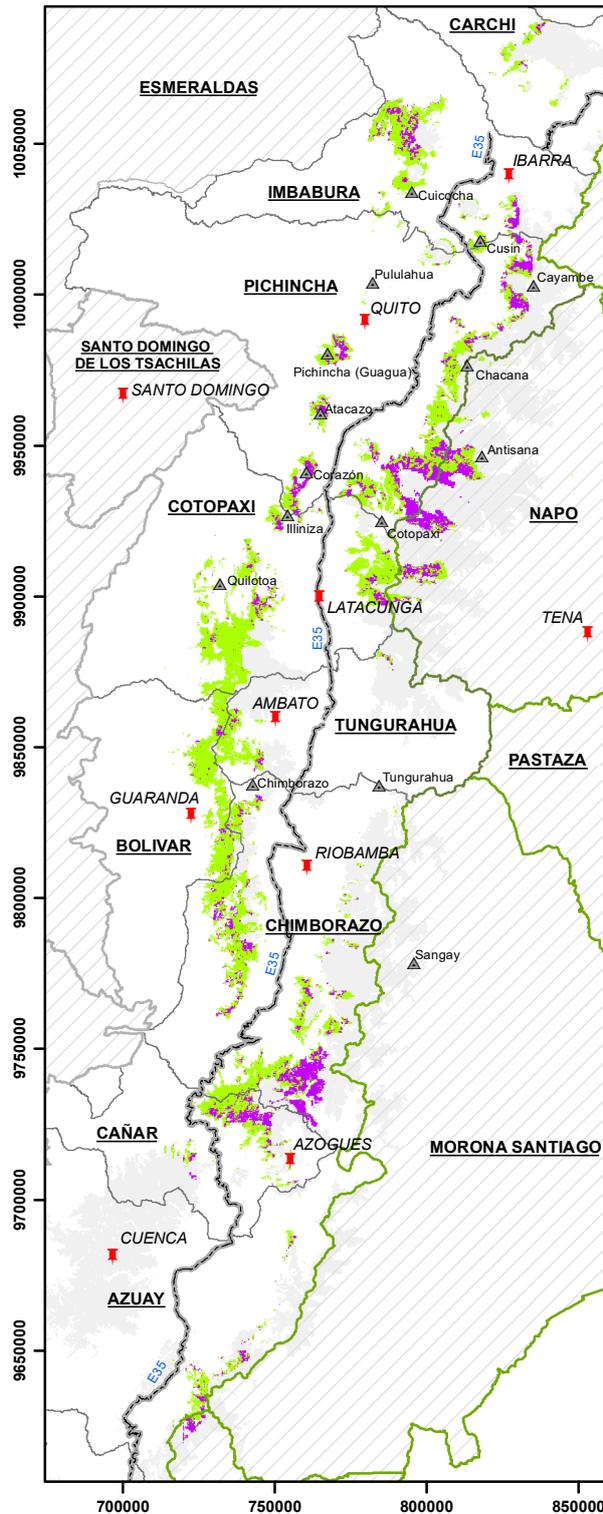
El Mapa 4.1.3 muestra las magnitudes de cambio de EVI durante el periodo de estudio expresadas a través de la pendiente de Theil Sen. Además, muestra el grado de significancia (p-valor) de estos cambios el cual se obtuvo a través de la prueba de tendencias de Mann-Kendall. En cuanto a la pendiente de Theil Sen, se obtuvieron valores de pendiente muy bajos entre $-2,00E-05$ y $3,07 E-05$. Los píxeles de valores negativos que en el mapa se representan por el color morado, indican una disminución en el verdor de la vegetación, mientras que los píxeles de valores positivos que en el mapa se representan por el color verde indican un incremento en el verdor de la vegetación. El rango de valores de pendiente que se obtuvo en este trabajo están muy alejados a los resultados que obtuvo Maita, (2015), éstas diferencias pueden deberse principalmente a que el área de estudio del autor no corresponde a la misma de presente trabajo, otra de las causas puede ser la diferencia en el tratamiento previo de los datos aplicado en los estudios. En este estudio se identificó que las tendencias negativas se concentran principalmente en las laderas de la Cordillera Oriental particularmente en las provincias de Napo y Chimborazo. Maita, (2015) también identificó tendencias negativas en las laderas de la Cordillera Oriental, sin embargo, por su área de estudio estas tendencias se ubican en la provincia de Morona Santiago. A pesar de la no congruencia de las áreas de estudio y por la falta de investigaciones existentes sobre las tendencias de índices de vegetación en el Ecuador con las cuales realizar una comparativa más precisa, se podría decir que las laderas orientales de los Andes han sido las más susceptibles a sufrir una disminución en el verdor de la vegetación.

Los cambios negativos y positivos de EVI se evalúan según su significancia en la gráfica de p-valor del mapa 4.1.3. Los píxeles de color amarillo tienen una significancia $p \leq 0,05$, mientras que los píxeles de color celeste no son estadísticamente significantes pues tienen un $p \geq 0,05$ por lo cual no se aprueba la hipótesis de que en estos píxeles exista una tendencia.

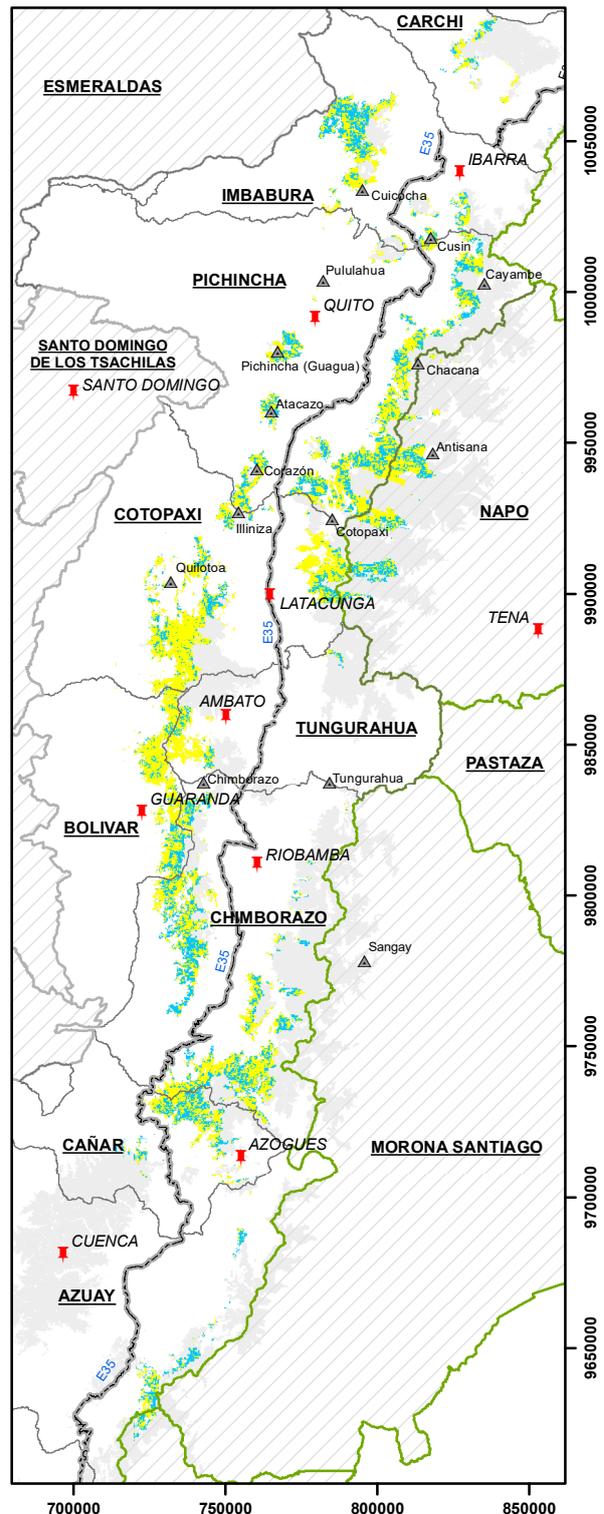
A través de las pruebas de Mann-Kendall y Theil Sen se identificó que en el área de estudio el 75,55% de la superficie presenta una tendencia positiva de EVI, mientras que el 24,45% de la superficie restante presenta una tendencia negativa. Sin embargo, el Mapa 4.1.4 muestra las tendencias que son estadísticamente

significantes, ósea con un $p \leq 0,05$, por lo tanto, se presentó solo un 51,5% de tendencias positivas significantes y 13,4% de tendencias negativas significantes, el 35,1% restante corresponde a las tendencias No significativas. Estas tendencias no significativas se encuentran distribuidas en toda la extensión del área de estudio presentándose con mayor influencia en la zona centro occidental.

PENDIENTE THEIL SEN



P VALOR



Pendiente de Theil Sen

- Tendencias Negativas
- Tendencias Positivas

P_valor

- P < 0,05
- P > 0,05

Límite Provincial



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

Mapa de Tendencias de EVI periodo 2001-2018

Elaborado por:
Domenica Borja Escobar

Fecha de Elaboración:
Marzo 2020

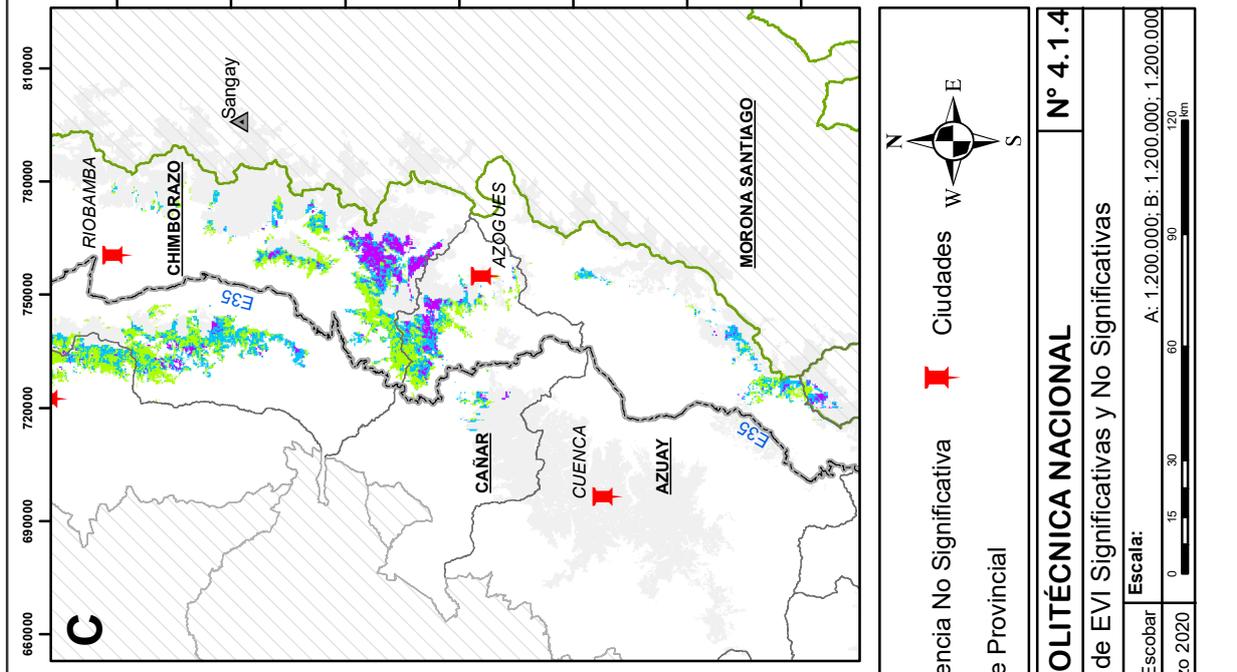
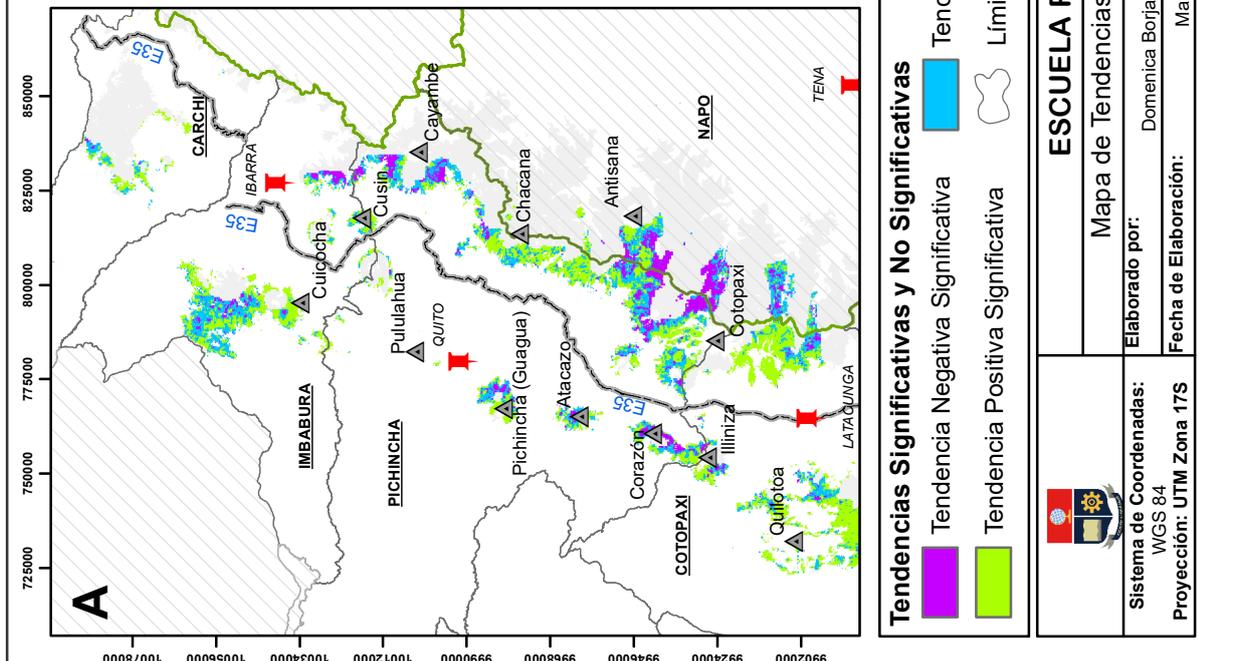
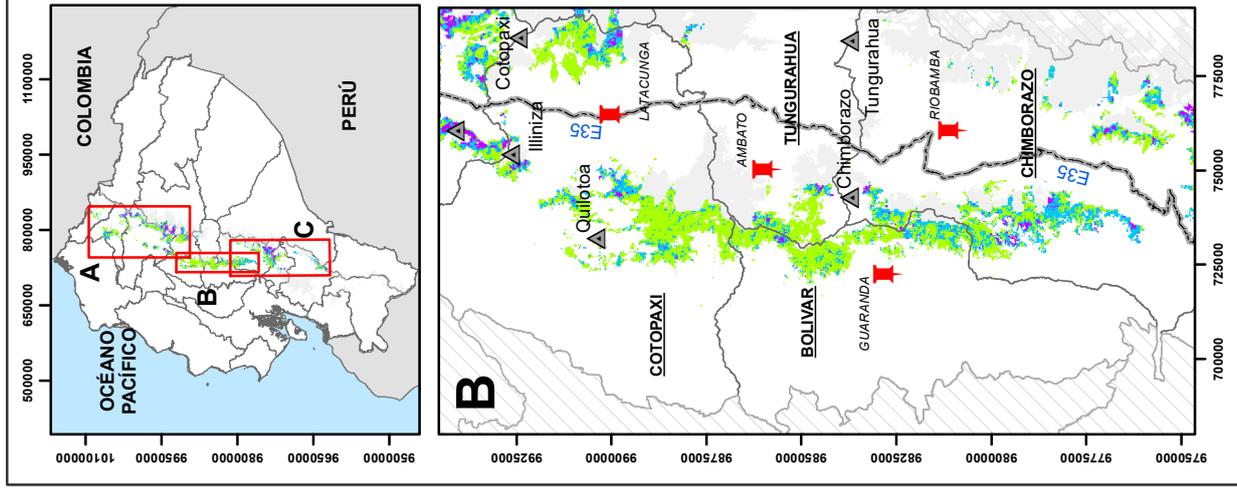
Sistemas de Coordenadas:
WGS 84

Escala:

1:2.500.000

Proyección: UTM Zona 17S

N° 4.1.3



Tendencias Significativas y No Significativas

- Tendencia Negativa Significativa
- Tendencia Positiva Significativa
- Tendencia No Significativa
- Ciudades
- Límite Provincial

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
N° 4.1.4
Mapa de Tendencias de EVI Significativas y No Significativas

Elaborado por: **Domenica Borja Escobar**
 Fecha de Elaboración: **Marzo 2020**

Sistema de Coordenadas: **WGS 84**
 Proyección: **UTM Zona 17S**

Escala: **A: 1:200.000; B: 1:200.000; 1:200.000**

4.2 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN EVI E ÍNDICES ATMOSFÉRICOS GLOBALES

4.2.1 CORRELACIÓN EVI E ÍNDICE DE OSCILACIÓN ANTÁRTICA (AAO)

La Tabla 4.2.1 indica el coeficiente de determinación (R^2) entre EVI y el Índice de Oscilación Antártica de cada año del periodo de estudio con su respectiva significancia (p-valor). Se puede observar que solamente para el año 2001 se presentó una correlación significativa (p-valor $\leq 0,05$), sin embargo, el grado de correlación para este año es medianamente bajo con un R^2 igual a 0,525 unidades. El resto de los años presentó correlaciones muy bajas, con una significancia nula (p-valor $\geq 0,05$), por lo que en estos años no se hace evidente la existencia de una dependencia entre las variables EVI y AAO. Resultados similares se hallaron en el estudio de la correlación entre NDVI y AAO realizado por Van Leeuwen et al. (2013) ya que no se determinaron correlaciones significativas al norte de 20°S, por lo tanto las bajas correlaciones encontradas en este estudio pueden atribuirse a que la Oscilación Antártica afecta principalmente al hemisferio sur quedando el territorio del páramo ecuatoriano fuera de su influencia.

Tabla 4.2.1. Coeficiente de determinación (R^2) entre EVI y AAO

Año	Coeficiente de Determinación (R^2)	p-valor
2001	0,525	0,008
2002	0,001	0,941
2003	0,128	0,253
2004	0,021	0,655
2005	0,098	0,321
2006	0,117	0,276
2007	0,035	0,56
2008	0,004	0,848
2009	0,017	0,69
2010	0,260	0,09
2011	0,109	0,295
2012	0,099	0,319
2013	0,370	0,036
2014	0,025	0,624
2015	0,071	0,401
2016	0,076	0,386
2017	0,309	0,061
2018	0,321	0,055

(Elaborado por: Borja, 2020)

El Mapa 4.2.1 muestra la distribución espacial de las correlaciones significativas (p -valor $\leq 0,05$) entre EVI y AAO durante el año 2001 (único año de todo el periodo de estudio en donde se presentó una correlación significativa), aquellos píxeles de color amarillo presentan correlaciones muy bajas entre 0,3 y 0,5 unidades, los píxeles de color verde presentan correlaciones entre 0,5 y 0,7 unidades y los píxeles de color rojo presentan fuertes correlaciones mayores a 0,7 unidades. Debido a que diferentes rangos de correlación se encuentran dispersos en toda el área de estudio sin presentar patrones definidos o concentraciones en ciertas zonas y además tomando en cuenta que las correlaciones no significativas ocupan un 62% del área total de estudio se puede inferir que no existe ninguna dependencia directa entre las variables EVI y AAO.

4.2.2 CORRELACIÓN EVI E ÍNDICE MULTIVARIADO ENOS (MEI)

La Tabla 4.2.2 indica el coeficiente de determinación (R^2) entre EVI y el Índice Multivariado ENOS de cada año del periodo de estudio con su respectiva significancia. Se puede observar en la tabla que varios años del periodo de estudio presentó correlaciones significativas, sin embargo, las más altas se presentaron en los años 2015 y 2018. Según los datos MEI (Figura 2.1.4), en el año 2015 se presentó un evento El Niño de intensidad fuerte desde junio hasta febrero del 2016 lo cual podría explicar la alta correlación presentada durante ese año. Este evento también se vio reflejado en la curva de variabilidad EVI de la Figura 4.1.3, ya que se presentó una pendiente bastante pronunciada denotando una rápida disminución en los valores EVI que puede ser asociado con la disminución en las precipitaciones el cual es un resultado de la influencia de este fenómeno. En cambio, para el año 2018 donde la correlación fue muy alta con 0,85 unidades, se presentó un evento La Niña de intensidad débil, pero este evento no fue capturado en la curva de variabilidad EVI de la Figura 4.1.3, debido posiblemente a la baja intensidad del evento. Estas incongruencias en los resultados de correlación también se presentan en el año 2010 ya que durante dicho año se presentó un evento La Niña de intensidad muy fuerte, cuyo efecto si se evidenció en la curva de variabilidad temporal de EVI, pero no se vio reflejado en el coeficiente de determinación ya que en ese año se obtuvo uno de los valores más bajos de correlación.

Ramírez & Vallejo, (2018) sugieren que los fenómenos El Niño y La Niña influyen directamente sobre la respuesta de EVI cuando éstos tienen una intensidad de fuerte a muy fuerte, también Germán Poveda et al. (2011) indican que estos fenómenos podrían aumentar o disminuir la respuesta de los índices de vegetación como el NDVI, por lo tanto las incongruencias presentadas en los resultados nos sugieren que la cuantificación de la correlación entre los índices de vegetación y MEI requiere la aplicación de distintos mecanismos de correlación. También, las bajas correlaciones obtenidas en el resto de los años en donde también se presentaron eventos El Niño o la Niña de diferente intensidad nos sugiere que la vegetación no responde directamente a un índice atmosférico si no a distintos factores climáticos.

Tabla 4.2.2. Coeficiente de determinación (R^2) entre EVI y MEI

Año	Coeficiente de Determinación (R^2)	p-valor
2001	0,243	0,103
2002	0,477	0,013
2003	0,097	0,323
2004	0,330	0,051
2005	0,643	0,002
2006	0,015	0,702
2007	0,671	0,001
2008	0,441	0,019
2009	0,606	0,003
2010	0,068	0,414
2011	0,046	0,504
2012	0,014	0,716
2013	0,210	0,134
2014	0,457	0,016
2015	0,785	0,001
2016	0,179	0,171
2017	0,061	0,441
2018	0,854	0,001

Elaborado por: (Borja, 2020)

El Mapa 4.2.2 muestra la distribución espacial de las correlaciones significativas entre EVI y MEI durante el año 2015 y el año 2018. Se puede observar que para el año 2015, periodo donde se presentó un evento El Niño, las correlaciones fuertes, mayores a 0,7 unidades se encuentran dispersas en toda el área de estudio, sin embargo, existe una particular concentración de estas correlaciones en la zona

norte del páramo, para este año las correlaciones no significativas ocuparon un 34% del área total. Para el año 2018, periodo donde se presentó un evento La Niña, las correlaciones más fuertes se distribuyeron principalmente en la zona centro occidental, dicha característica pudo deberse a que el evento La Niña en este periodo fue muy débil por lo que las zonas más adyacentes a la costa resultaron afectadas. Las correlaciones no significativas éstas ocuparon un 48% del área de estudio en el año 2018.

4.2.3 CORRELACIÓN EVI E ÍNDICE DE OSCILACIÓN DEL ATLÁNTICO NORTE (NAO)

La Tabla 4.2.3 indica el coeficiente de determinación (R^2) entre EVI y el Índice de Oscilación del Atlántico Norte de cada año del periodo de estudio con su respectiva significancia. La tabla muestra correlaciones considerablemente bajas inferiores a 0,5 unidades. Según la bibliografía analizada el NAO tiene influencia principalmente sobre la variabilidad climática del hemisferio norte particularmente en el sector Atlántico/Europa (Qian et al., 2000) y Norte América (Sánchez-Santillán et al., 2006), dada la ubicación de Ecuador, nuestro territorio, no se vería afectado por la influencia de NAO y esto se evidencia en los resultados obtenidos en el presente estudio. Sin embargo, en el año 2002, se presentó una correlación máxima con un valor igual a 0,523 unidades, pero dicho resultado no representa necesariamente una razón de dependencia entre EVI y NAO.

Tabla 4.2.3. Coeficiente de determinación (R^2) entre EVI y NAO

Año	Coeficiente de Determinación (R^2)	p-valor
2001	8,31E-06	0,993
2002	0,523	0,008
2003	0,005	0,829
2004	0,289	0,071
2005	0,107	0,299
2006	0,014	0,712
2007	0,055	0,463
2008	0,413	0,024
2009	0,127	0,256
2010	0,268	0,085
2011	0,016	0,693
2012	0,071	0,404
2013	0,015	0,707
2014	0,029	0,597
2015	0,130	0,25
2016	0,044	0,515
2017	0,168	0,186
2018	1,73E-04	0,968

Elaborado por: (Borja, 2020)

El Mapa 4.2.3 muestra la distribución espacial de las correlaciones significativas entre EVI y NAO durante el año 2002. Se puede observar que predominan las correlaciones menores a 0,5 unidades, además las correlaciones no significativas ocuparon un 72% del área de estudio lo que hace hincapié en la no relación de dependencia entre ambos índices.

4.2.4 CORRELACIÓN EVI E ÍNDICE DE OSCILACIÓN MADDEN-JULIAN (MJO)

La Tabla 4.2.4. indica el coeficiente de determinación (R^2) entre EVI y el Índice de Oscilación Madden-Julian de cada año del periodo de estudio con su respectiva significancia. La tabla muestra correlaciones muy bajas entre $9,25E-05$ a $0,318$ unidades, estas correlaciones no son significativas ya que ninguna presento un p-valor $\leq 0,05$. Los bajos valores obtenidos pueden ser atribuidos al manejo de los datos proporcionados por la NOAA, ya que no se presentan datos sobre el territorio ecuatoriano y por lo tanto éstos tuvieron que ser interpolados. Sin embargo, las

bajas correlaciones también podrían ser atribuidas a que EVI responde a otros factores distintos a las oscilaciones de Madden-Julian.

Tabla 4.2.4. Coeficiente de determinación (R^2) entre EVI y MJO

Año	Coeficiente de Determinación (R^2)	p-valor
2001	0,028	0,604
2002	0,003	0,057
2003	0,202	0,142
2004	0,318	0,056
2005	9,25E-05	0,976
2006	0,015	0,707
2007	0,005	0,827
2008	0,056	0,460
2009	0,007	0,798
2010	0,307	0,061
2011	0,004	0,843
2012	0,112	0,287
2013	0,070	0,405
2014	0,051	0,481
2015	0,061	0,438
2016	0,129	0,252
2017	0,002	0,905
2018	0,020	0,662

Elaborado por: (Borja, 2020)

El Mapa 4.2.4 muestra la distribución espacial de las correlaciones significativas entre el índice EVI y el Índice MJO durante el año 2004 (año donde se presentó la mayor correlación, aunque no sea significativa). El mapa hace hincapié en el análisis realizado anteriormente ya que las correlaciones no significativas ocuparon el 87% del área de estudio.

4.2.5 CORRELACIÓN EVI E ÍNDICE DE OSCILACIÓN DECADAL DEL PACÍFICO (PDO)

La Tabla 4.2.5 indica el coeficiente de determinación (R^2) entre EVI y el Índice de Oscilación Decadal del Pacífico de cada año del periodo de estudio con su respectiva significancia. La tabla muestra correlaciones muy bajas a excepción del año 2005 en donde se presenta una correlación de 0,649 unidades. En dicho año y en base a los datos de PDO descargados, en el periodo de enero-agosto la Oscilación Decadal del Pacífico se encontraba en la fase positiva. En esta fase se

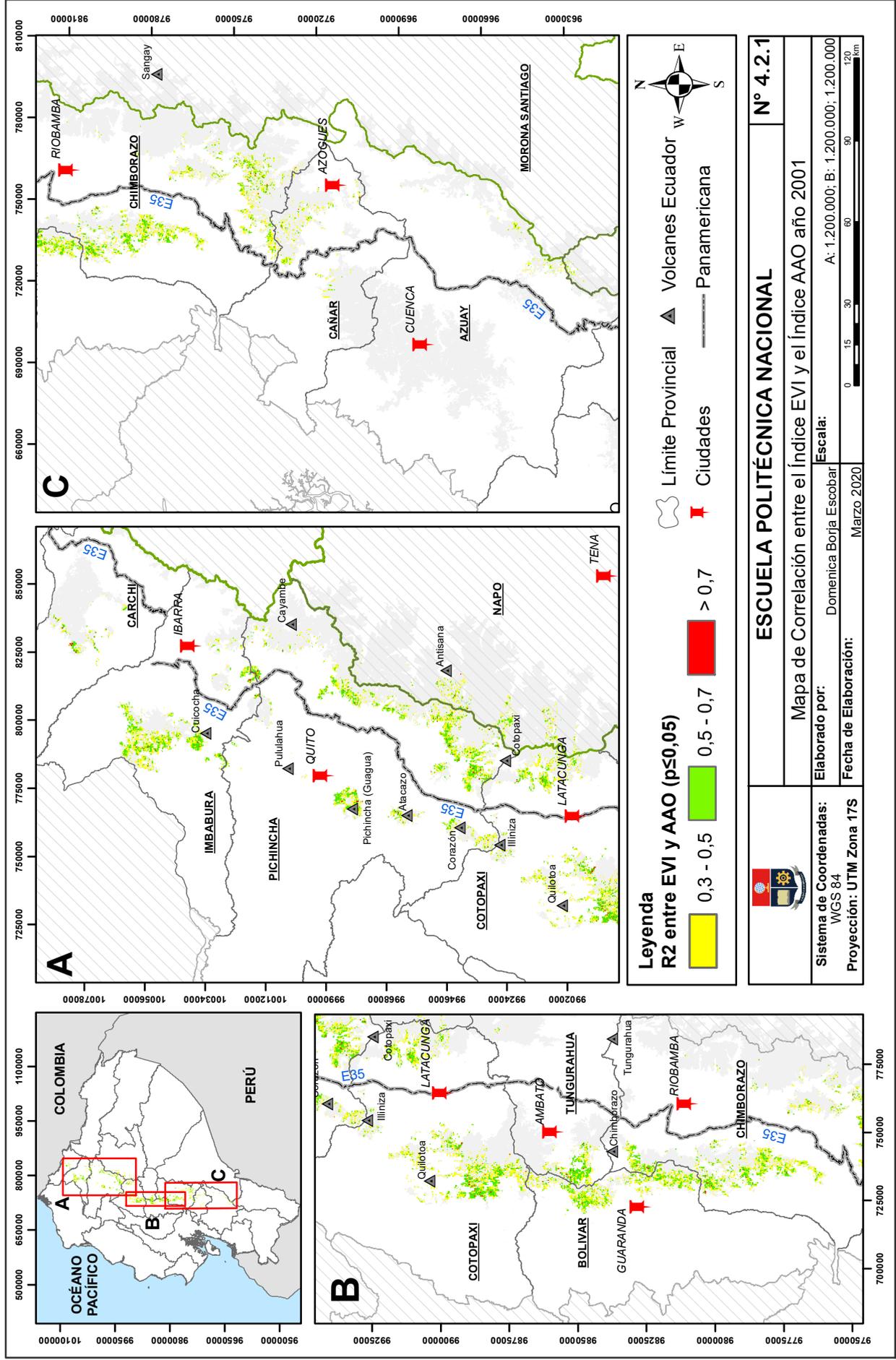
presenta una temperatura anómalamente cálida entre las costas de Norteamérica y el Ecuador (Hessl et al., 2004) lo cual podría explicar la correlación medianamente alta presentada en ese año.

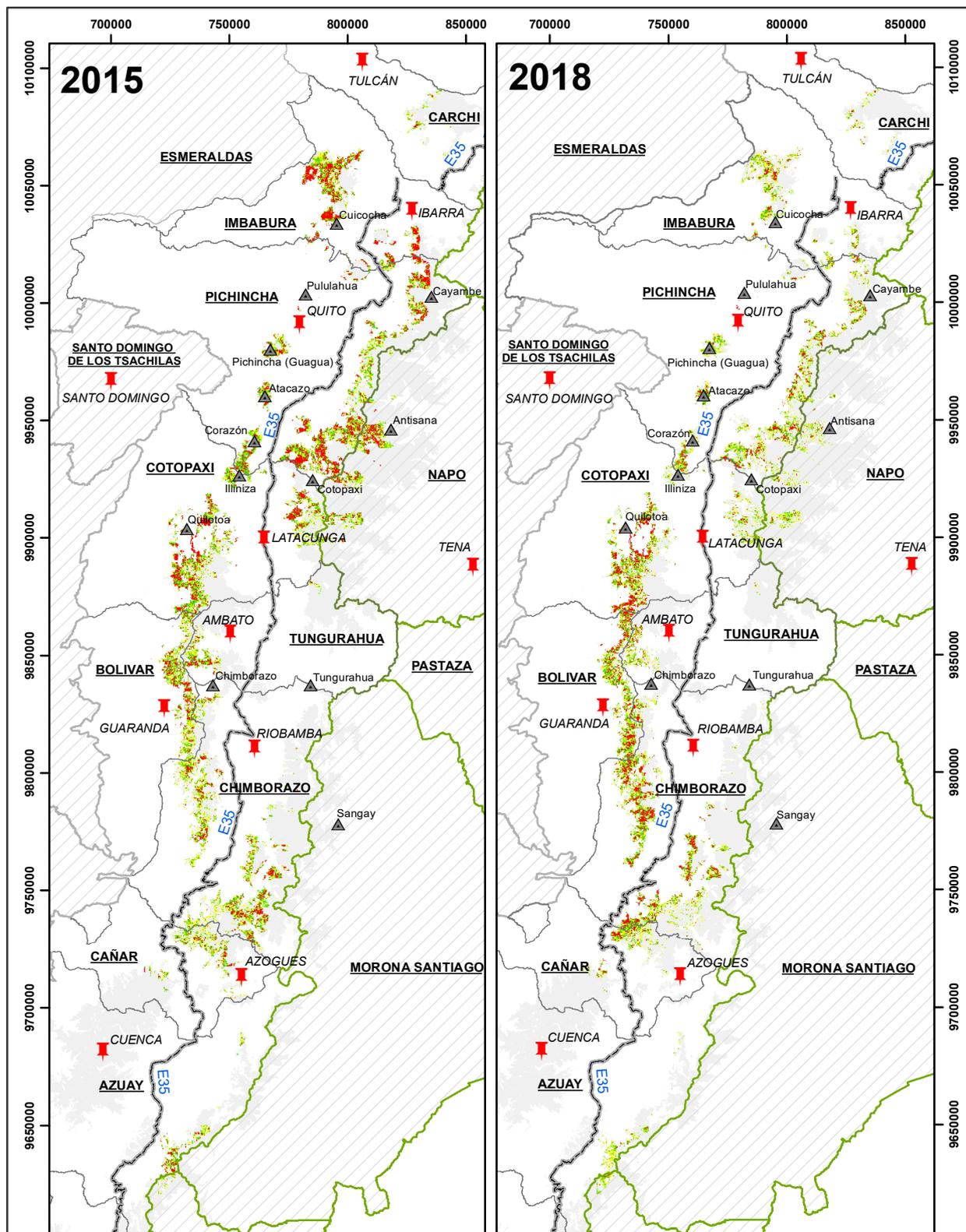
Tabla 4.2.5. Coeficiente de determinación (R^2) entre EVI y PDO

Año	Coeficiente de Determinación (R^2)	p-valor
2001	0,039	0,537
2002	0,465	0,015
2003	0,018	0,681
2004	0,130	0,249
2005	0,649	0,002
2006	0,061	0,438
2007	0,351	0,042
2008	0,255	0,094
2009	0,377	0,034
2010	0,075	0,390
2011	0,098	0,321
2012	0,001	0,923
2013	0,109	0,295
2014	0,099	0,319
2015	0,197	0,148
2016	0,203	0,141
2017	4,97E-04	0,945
2018	0,002	0,882

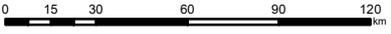
Elaborado por: (Borja, 2020)

El Mapa 4.2.5 muestra la distribución espacial de las correlaciones significativas entre el Índice EVI y el Índice PDO durante el año 2005, se puede observar que existen fuertes correlaciones mayores a 0,6 unidades a lo largo de la Cordillera Occidental particularmente en la zona centro del páramo, por lo cual se puede atribuir una influencia de las temperaturas cálidas de las costas del Pacífico sobre la respuesta de la vegetación. Además, se puede observar que las correlaciones más bajas se presentan al borde de la Cordillera Oriental por lo que se podría decir que la respuesta de la vegetación de esta zona se ve influenciada por otros factores distintos a la Oscilación Decadal del Pacífico.





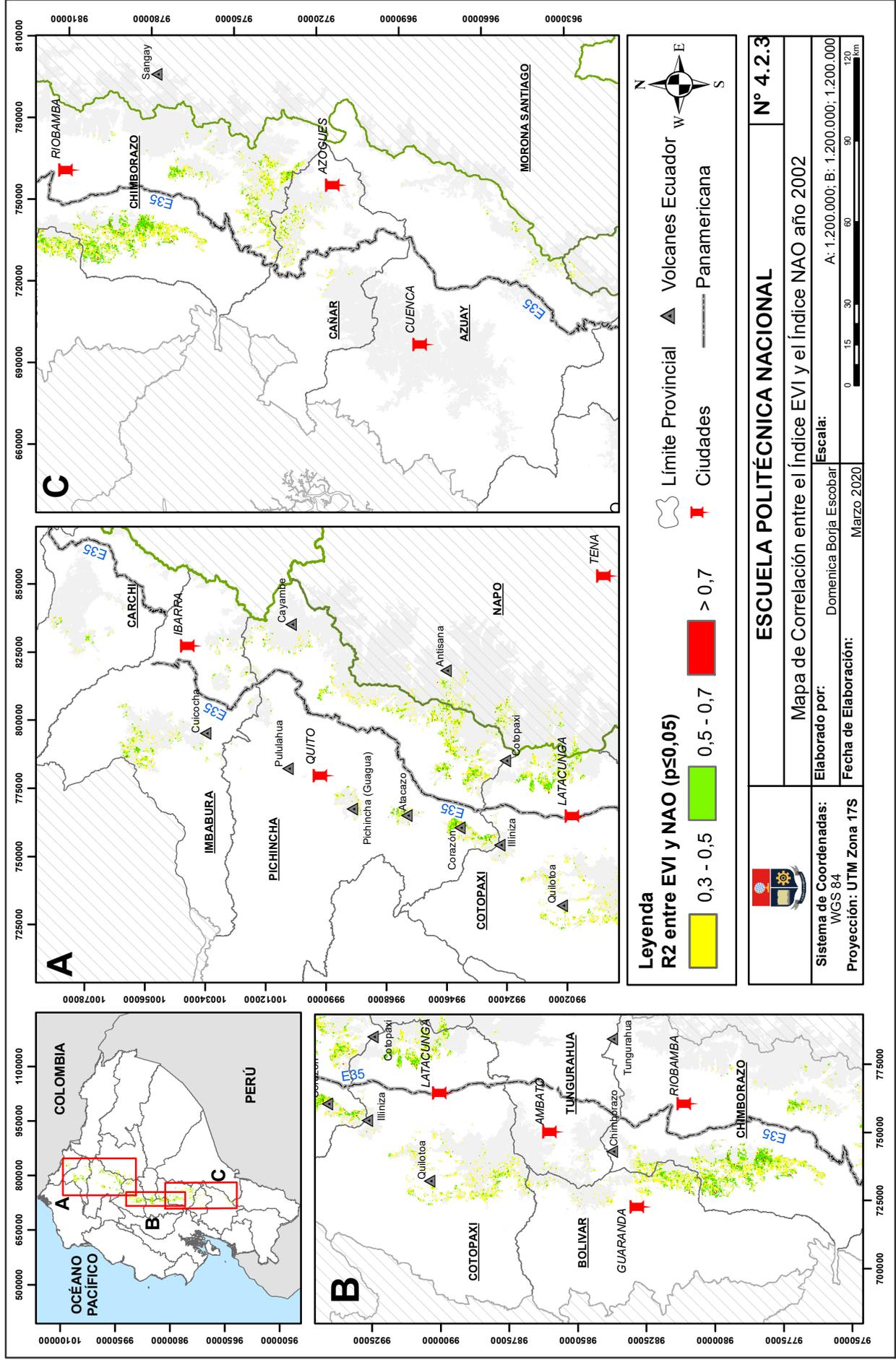
Leyenda
R2 entre EVI y MEI 2015 y 2018 ($p \leq 0,05$)

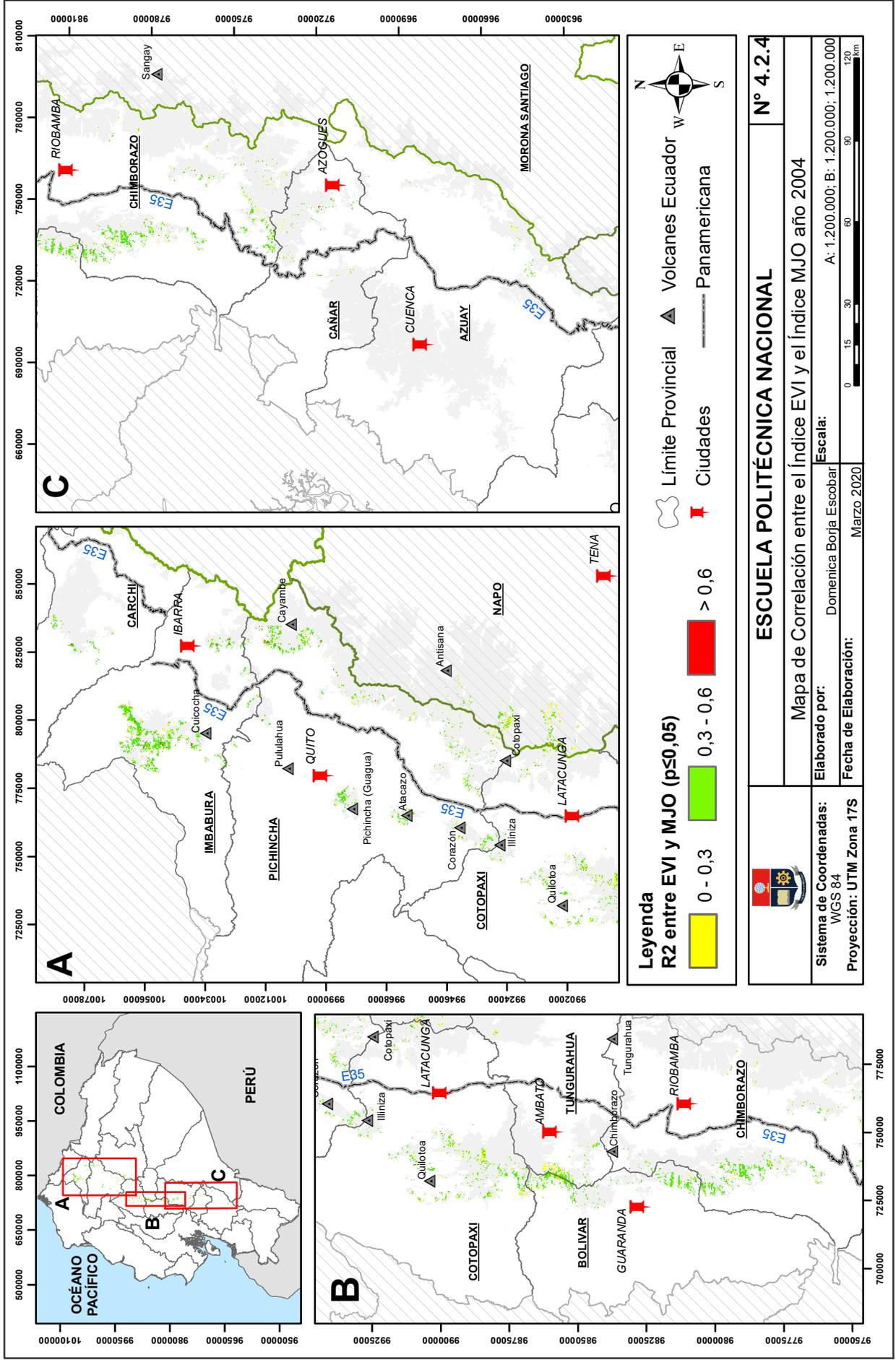
 0,3 - 0,5	 Límite Provincial	 Volcanes
 0,5 - 0,7	 Ciudades	 Panamericana
 > 0,7	 0 15 30 60 90 120 km	

 **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

Mapa de Correlación entre EVI y MEI año 2015 y 2018

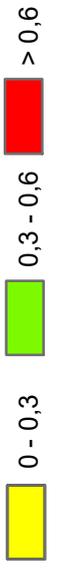
Elaborado por: Domenica Borja Escobar	Fecha de Elaboración: Marzo 2020
Sistemas de Coordenadas: WGS 84	Escala: 1:2.500.000
Proyección: UTM Zona 17S	N° 4.2.2



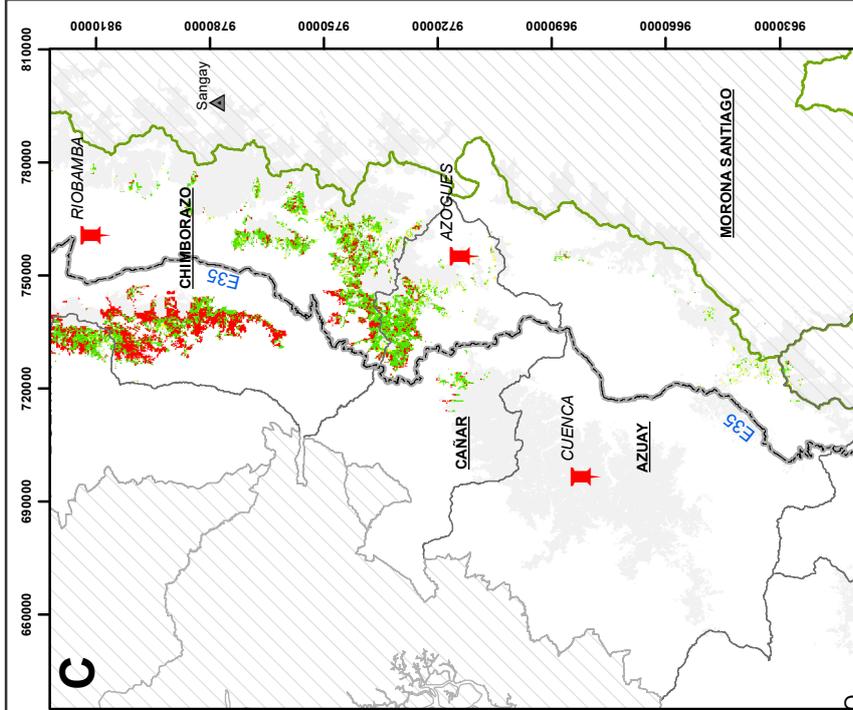
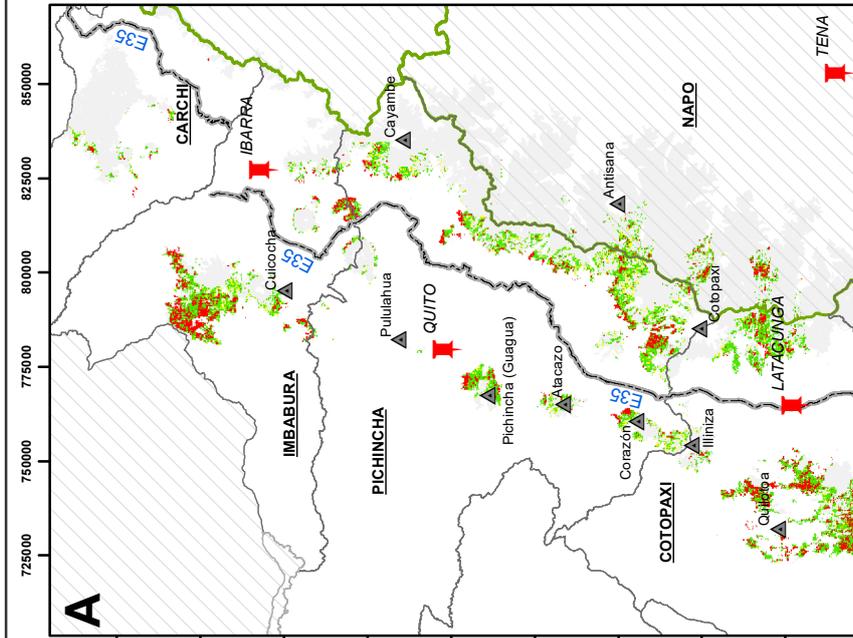
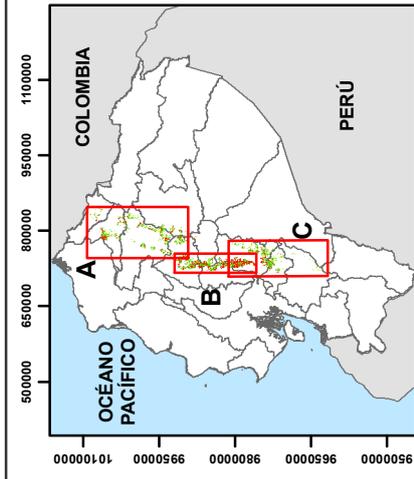


Límite Provincial ▲ Volcanes Ecuador W E
 + Ciudades — Panamericana

Leyenda
R2 entre EVI y MJO ($p < 0,05$)



	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL	
	N° 4.2.4	
Mapa de Correlación entre el Índice EVI y el Índice MJO año 2004		
Sistema de Coordenadas: WGS 84	Elaborado por: Domenica Borja Escobar	Escala: A: 1.200.000; B: 1.200.000; 1.200.000
Proyección: UTM Zona 17S	Fecha de Elaboración: Marzo 2020	



Leyenda
R2 entre EVI y PDO ($p < 0,05$)



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

N° 4.2.5

Mapa de Correlación entre el Índice EVI y el Índice PDO año 2005

Sistema de Coordenadas:
WGS 84

Elaborado por:
Domenica Borja Escobar

Escala:
A: 1.200.000; B: 1.200.000; 1.200.000

Proyección: UTM Zona 17S

Fecha de Elaboración:
Marzo 2020



CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- La conclusión obtenida del primer objetivo planteado en esta investigación fue que existe una amplia bibliografía destinada al monitoreo de la cubierta terrestre que emplea a los índices espectrales de vegetación como principal herramienta de estudio. Estos índices han sido ampliamente usados en distintas investigaciones que involucran análisis de la fenología de la vegetación, la productividad neta, así como también han sido usados como indicadores de la degradación ecosistémica y cambios en las variables climáticas. Por lo tanto, los índices de vegetación han demostrado ser una valiosa fuente de información la cual puede complementar a varias ciencias como la Ecología y la Climatología para llegar a un vasto conocimiento de la cobertura terrestre y su comportamiento, además de ser aliada en estudios sobre el cambio climático.

Las conclusiones obtenidas del segundo objetivo planteado en esta investigación fueron las siguientes:

- Al evaluar la variación estacional de EVI de todo el periodo de estudio se determinó que los valores máximos se presentan en los meses de marzo y abril y, los valores mínimos en los meses de octubre y noviembre, dichos periodos corresponden a la estación lluviosa y al final de la estación seca de la región de estudio respectivamente. Además, se determinó que existen mayores variaciones interanuales de EVI en los meses correspondientes a estaciones lluviosas.
- Al evaluar la variación estacional de EVI por cada año del periodo de estudio no fue posible establecer un patrón definido que represente a todos los 18 años estudiados ya que el índice presenta amplias fluctuaciones de crecimiento y decrecimiento en distintos periodos.

- Al realizar el análisis espacial se determinó que las laderas orientales del páramo presentan los valores más altos de EVI, y las laderas occidentales presentan los valores más bajos durante todo el periodo de estudio. Además, se determinó una variabilidad interanual del EVI representada por el COV entre el 5 al 30%, en donde las mínimas variaciones se presentaron en la vegetación del páramo localizada en las cercanías de la región amazónica.
- Los diferentes ecosistemas de páramo estudiados presentaron patrones estacionales similares con picos en los meses de marzo y abril, y valles en los meses noviembre y diciembre.
- El ecosistema Herbazal del Páramo fue el ecosistema que tuvo la mayor extensión sobre el área de estudio, a pesar de ser un mismo ecosistema los valores de EVI fluctuaban dependiendo la zona geográfica en donde se ubicaba, siendo la zona norte oriental en donde se presentaron los mayores valores llegando hasta 0,44 unidades.
- Se obtuvieron tendencias de variabilidad de EVI positivas significativas en el 51,5% del área de estudio, mientras que el 13,4% del área presentó tendencias negativas significativas. El resto del área presentó tendencias No significativas.
- Las tendencias positivas significativas se localizaron principalmente en la zona centro occidental del área de estudio, mientras que las tendencias significativas negativas se localizaron en las laderas orientales del páramo, lo que nos sugiere que la respuesta espectral de la vegetación de estas zonas ha disminuido en el periodo de estudio.

Las conclusiones obtenidas del tercer objetivo planteado en esta investigación fueron las siguientes:

- Los valores de correlación entre EVI y tres de los índices atmosféricos globales (AAO, NAO y MJO) fueron muy bajos y no significativos, por lo que se sugiere en este estudio que EVI no se ve afectado principalmente por la influencia de estos índices.
- Los índices MEI y PDO, presentaron las correlaciones significativas más altas de entre todos los índices, especialmente en ambos casos las fuertes correlaciones se ubicaron en la Cordillera Occidental.

- El índice MEI mostró correlaciones significativas de 0,78 y 0,85 en los años 2015 y 2018, respectivamente. En el año 2015, en donde se presentó un evento El Niño, se obtuvieron altas correlaciones en toda la extensión del área de estudio principalmente en la zona norte, mientras que en el año 2018 donde se presentó un evento La Niña se obtuvieron altas correlaciones principalmente en la zona centro occidental. A pesar de estas observaciones no se evidenciaron correlaciones altas en el periodo 2010-2011, periodo en el cual se presentó un evento La Niña Muy Fuerte, lo cual sugiere en la presente investigación que la respuesta espectral de la vegetación no depende de un solo factor climático como la precipitación si no de un conjunto de factores climáticos en los que podría intervenir la precipitación, la temperatura, las características físicas y químicas del suelo, entre otros.
- En este estudio se realizaron correlaciones entre EVI y cinco índices atmosféricos, los cuales fueron escogidos por la evidencia científica de su influencia sobre el territorio ecuatoriano y en general sobre el páramo Andino, sin embargo no se descarta la posibilidad de realizar futuras investigaciones que incluyan a índices oceánicos.

5.2 RECOMENDACIONES

- El uso del análisis de calidad de píxeles es un paso fundamental que se debe llevar a cabo para la realización de estudios de índices de vegetación derivados del sensor MODIS en diferentes regiones.
- El análisis espacial de EVI mostró un área entre las parroquias de Pujilí, Guangaje y Chochapamba de la Cordillera Occidental con valores extremadamente altos y al no determinarse una causalidad de dichos resultados se recomienda realizar una evaluación en campo de las condiciones de dicha área.
- Dadas las bajas correlaciones obtenidas en el presente estudio se recomienda realizar investigaciones más exhaustivas utilizando diferentes mecanismos para determinar la correlación de EVI y los Índices Atmosféricos Globales.
- Se recomienda realizar estudios más puntuales de las áreas en donde se identificaron altas variabilidades interanuales y tendencias negativas de EVI

los cuales incluyan dentro del estudio a distintas variables climáticas, así como otros productos satelitales, para comprender la vulnerabilidad que enfrentan dichas áreas ante el cambio climático.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adhikary, S. K., Yilmaz, A. G., & Muttill, N. (2015). *Optimal design of rain gauge network in the Middle Yarra River catchment, Australia. Hydrological Processes, 29(11), 2582–2599.* <https://doi.org/10.1002/hyp.10389>
- Barbosa, H. A., Huete, A. R., & Baethgen, W. E. (2006). *A 20-year study of NDVI variability over the Northeast Region of Brazil. Journal of Arid Environments, 67(2), 288–307.* <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.02.022>
- Borges, E. F., Sano, E. E., & Medrado, E. (2014). *Radiometric quality and performance of TIMESAT for smoothing moderate resolution imaging spectroradiometer enhanced vegetation index time series from western Bahia State, Brazil. Journal of Applied Remote Sensing, 8(1), 083580.* <https://doi.org/10.1117/1.jrs.8.083580>
- Boschetti, L., Roy, D., Hoffmann, A. A., & Humber, M. (2013). *MODIS Collection 5.1 Burned Area Product -MCD45. User's guide version 3.0.1. User Guide, Version 1.(September), 1–12.*
- Buytaert, W., Céleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). *Human impact on the hydrology of the Andean páramos. Earth-Science Reviews, 79(1–2), 53–72.* <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Campozano, L., Robaina, L., & Samaniego, E. (2020). *The Pacific Decadal Oscillation modulates the relation of ENSO with the rainfall variability in coast of Ecuador. International Journal of Climatology.* <https://doi.org/10.1002/joc.6525>
- Carilla, J., Grau, H., Paolini, L., & Morales, M. (2013). *Lake fluctuations, plant productivity, and long-term variability in high-elevation tropical andean ecosystems. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 45(2), 179–189.* <https://doi.org/10.1657/1938-4246-45.2.179>
- Chuvienco, E. (1992). *Teledetección, S.I.G. y Cambio Global. Geographicalia, 29, 33–56.*
- Clark, M. L., Aide, T. M., Grau, H. R., & Riner, G. (2010). *A scalable approach to*

- mapping annual land cover at 250 m using MODIS time series data: A case study in the Dry Chaco ecoregion of South America. Remote Sensing of Environment, 114(11), 2816–2832. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.07.001>*
- Colditz, R. R., Conrad, C., Wehrmann, T., Schmidt, M., & Dech, S. (2008). TiSeG: A flexible software tool for time-series generation of MODIS data utilizing the quality assessment science data set. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 46(10), 3296–3308. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.921412>*
- Córdova, E. (2017). *Evaluación del producto de precipitación diaria TMPA 3B42 V7 para su aplicabilidad en la modelización hidrológica en el Ecuador utilizando diferentes metodologías de corrección de datos. Escuela Politécnica Nacional.*
- Didan, K., Munoz, A. B., Solano, R., & Huete, A. (2015). *MODIS Vegetation Index User's Guide (Collection 6). 2015(May), 31.*
- Eklundh, L., & Jönsson, P. (2015). *TIMESAT: A Software Package for Time-Series Processing and Assessment of Vegetation Dynamics. In Remote Sensing and Digital Image Processing (Vol. 22, pp. 141–158). Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-15967-6>*
- Eklundh, L., & Jönsson, P. (2017). *TIMESAT 3.3 with seasonal trend decomposition and parallel processing Software Manual. Lund and Malmo University, Sweden, 1–92. <http://www.nateko.lu.se/TIMESAT/>*
- Gaitán, J. J., Donaldo Bran, D. E., & Azcona, C. (2015). *Tendencia del NDVI en el período 2000-2014 como indicador de la degradación de tierras en Argentina: Ventajas y limitaciones. AgriScientia, 32(2), 83–93. <https://doi.org/10.31047/1668.298x.v32.n2.16559>*
- Gao, F., Morisette, J. T., Wolfe, R. E., Ederer, G., Pedelty, J., Masuoka, E., Myneni, R., Tan, B., & Nightingale, J. (2008a). *An algorithm to produce temporally and spatially continuous MODIS-LAI Time Series. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 5(1), 60–64. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2007.907971>*
- Gao, F., Morisette, J. T., Wolfe, R. E., Ederer, G., Pedelty, J., Masuoka, E., Myneni, R., Tan, B., & Nightingale, J. (2008b). *An Algorithm to Produce Temporally and*

- Spatially Continuous MODIS-LAI Time Series. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 5(1), 60–64. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2007.907971>
- García-Mora, T., & Mas, J. (2011a). *Modland: los productos de superficie terrestre MODIS. In Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio (pp. 25–70).*
- García-Mora, T., & Mas, J. (2011b). *Presentación del sensor MODIS. In Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio (pp. 11–24).*
- Giraldo, R. (2014). *Introducción a la Geoestadística: Teoría y Aplicación. In Introducción a la geoestadística (Universida).*
- Hamed, K. H. (2008). *Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis. Journal of Hydrology*, 349(3–4), 350–363. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.11.009>
- Hessl, A., McKenzie, D., & Schellhaas, R. (2004). *Drought and Pacific Decadal Oscillation Linked to Fire Occurrence in the Inland Pacific Northwest. Ecological Applications*, 14(2), 425–442. <https://doi.org/10.1890/03-5019>
- Hofstede, R., Calles, J., López, V., Polanco, R., Torres, F., Ulloa, J., Vásquez, A., & Cerra, M. (2014). *Los páramos andinos ¿Qué sabemos? Estado de conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema páramo. In UICN.*
- Huete, A., Didan, K., Leeuwen, W. Van, Miura, T., & Glenn, E. (2011a). *Land Remote Sensing and Global Environmental Change: NASA's Earth Observing System and the Science of ASTER and MODIS. 894. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6749-7*
- Huete, A., Didan, K., Leeuwen, W. Van, Miura, T., & Glenn, E. (2011b). *MODIS Vegetation Indices. In B. Ramachandran, C. O. Justice, & M. J. Abrams (Eds.), Land Remote Sensing and Global Environmental Change: NASA's Earth Observing System and the Science of ASTER and MODIS (pp. 579–601). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6749-7*
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002).

- Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1–2), 195–213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- Hurrell, J. W., Kushnir, Y., Ottersen, G., & Visbeck, M. (2003). An overview of the north atlantic oscillation. *Geophysical Monograph Series*, 134(January), 1–35. <https://doi.org/10.1029/134GM01>
- IDEAM-UNAL. (2018). *Variabilidad Climática y Cambio Climático en Colombia*. [http://www.orasconhu.org/sites/default/files/La Salud y el Cambio Climatico en Colombia - Jairo Garcia Giraldo.pdf](http://www.orasconhu.org/sites/default/files/La%20Salud%20y%20el%20Cambio%20Climatico%20en%20Colombia%20-%20Jairo%20Garcia%20Giraldo.pdf)
- Insel, N., Poulsen, C. J., & Ehlers, T. A. (2010). Influence of the Andes Mountains on South American moisture transport, convection, and precipitation. *Climate Dynamics*, 35(7), 1477–1492. <https://doi.org/10.1007/s00382-009-0637-1>
- IPCC. (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. In Equipo de redcción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación).
- Jönsson, P., & Eklundh, L. (2004). TIMESAT - A program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers and Geosciences*, 30(8), 833–845. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.05.006>
- León Yáñez, S. (2011). *La Flora de los páramos ecuatorianos*. (P. Mena Vásconez, A. Catillo, S. Flores, R. Hofstede, C. Josse, S. Lasso B, . . . D. Ortiz, Edits.) *EcoCiencia/Abya-Yala/ECOBONA*, 25-41.
- Maita, J. (2015). *Dinámica espacio temporal del Índice de Vegetación Mejorado (EVI) en los Ecosistemas del sur del Ecuador (Vol. 16, Issue 2)*. Universidad del Azuay.
- Mantua, N. J., & Hare, S. R. (2002). The Pacific Decadal Oscillation. In *Journal of Oceanography* (Vol. 58, Issue 1, pp. 35–44). <https://doi.org/10.1023/A:1015820616384>
- Martínez Rodríguez, E. (2005). Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal. *Anuario Jurídico y Económico*

- Escorialense*, 38, 315–331.
- Maturana, J., Bello, M., & Manley, M. (2004). Antecedentes históricos y descripción del fenómeno El Niño, Oscilación del Sur. *El Niño y La Niña 1997 - 2000. Sus Efectos En Chile*, 13–27.
- Mazzarella, A., Giuliacci, A., & Scafetta, N. (2013). Quantifying the Multivariate ENSO Index (MEI) coupling to CO2 concentration and to the length of day variations. *Theoretical and Applied Climatology*, 111(3–4), 601–607. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0696-9>
- Mbow, C., Fensholt, R., Rasmussen, K., & Diop, D. (2013). Can vegetation productivity be derived from greenness in a semi-arid environment? Evidence from ground-based measurements. *Journal of Arid Environments*, 97, 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2013.05.011>
- Mena, P. (2009). El estado de salud de los paramos en el Ecuador: alternativas interesantes y pronosticos complicados. In *Gente y Ambiente de Paramo: Realidades y Perspectivas en el Ecuador* (pp. 23–41). Ecociencia.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. 2013. Sistema de Clasificación de los Ecosistemas del Ecuador Continental. Subsecretaría de Patrimonio Natural. Quito.
- Montealegre, J. E., & Pabón, J. D. (2000). La Variabilidad Climática Interanual asociada al ciclo El Niño-La Niña–Oscilación del Sur y su efecto en el patrón pluviométrico de Colombia. *Meteorología Colombiana*, July, 7–21. https://www.researchgate.net/publication/281605886_La_variabilidad_climatica_interanual_asociada_al_ciclo_El_Nio-La_Nia-Oscilacin_del_Sur_y_su_efecto_en_el_patrn_pluviomtrico_de_Colombia
- Morán-Tejeda, E., Bazo, J., López-Moreno, J. I., Aguilar, E., Azorín-Molina, C., Sanchez-Lorenzo, A., Martínez, R., Nieto, J. J., Mejía, R., Martín-Hernández, N., & Vicente-Serrano, S. M. (2016). Climate trends and variability in Ecuador (1966–2011). *International Journal of Climatology*, 36(11), 3839–3855. <https://doi.org/10.1002/joc.4597>
- Muñoz, A. R., Cipriotti, P., & Radic, S. S. (2017). Land surface phenology trends of the Isla Grande de Tierra del Fuego from 15 years MODIS data. 1–4.

<https://doi.org/10.1109/grss-chile.2017.7996011>

- National Oceanic and Atmospheric Administration. (n.d.-a). *Multivariate ENSO Index Version 2 (MEI.v2)* | Physical Sciences Division. Retrieved February 19, 2020, from <https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/>
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (n.d.-b). *North Atlantic Oscillation (NAO) | Teleconnections | National Centers for Environmental Information (NCEI)*. Retrieved February 19, 2020, from <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/nao/>
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (n.d.-c). *Physical Sciences Laboratory: Climate Indices: Monthly Atmospheric and Ocean Time Series*. Retrieved April 8, 2020, from <https://psl.noaa.gov/data/climateindices/>
- Paruelo, J. M., Jobbágy, E. G., & Sala, O. E. (1998). *Biozone of Patagonia (Argentina)*. *Ecología Austral*, 8(2), 145–153.
- Pfeifer, M., Disney, M., Quaife, T., & Marchant, R. (2012). *Terrestrial ecosystems from space: A review of earth observation products for macroecology applications*. *Global Ecology and Biogeography*, 21(6), 603–624. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2011.00712.x>
- Pohl, B., Fauchereau, N., Reason, C. J. C., & Rouault, M. (2010). *Relationships between the Antarctic oscillation, the Madden-Julian oscillation, and ENSO, and consequences for rainfall analysis*. *Journal of Climate*, 23(2), 238–254. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2443.1>
- Potter, C., Gross, P., Klooster, S., Fladeland, M., & Genovese, V. (2008). *Storage of carbon in U.S. forests predicted from satellite data, ecosystem modeling, and inventory summaries*. *Climatic Change*, 90(3), 269–282. <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9462-5>
- Pourrut, P., Gómez, G., Bermeo, A., & Segovia, A. (1995). *Factores condicionantes de los regímenes climáticos e hidrológicos*. In *El Agua en el Ecuador (Corporació, pp. 7–12)*.
- Poveda, G., Mesa, O. J., Agudelo, P. A., Álvarez, J. F., Arias, P. A., Moreno, H. A.,

- Salazar, L. F., Toro, V. G., Vieira, S. C., Jaramillo, A., & Guzman, O. (2002). *Influencia del ENSO, Oscilación Madden-Julian, Ondas del este, huracanes y fases de la luna en el ciclo diurno de precipitación en los Andes Tropicales de Colombia*. *Meteorología Colombiana*, 5, 3–12.
- Poveda, Germán, Álvarez, D. M., & Rueda, Ó. A. (2011). *Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: A review of climatic processes and their impact on one of the Earth's most important biodiversity hotspots*. *Climate Dynamics*, 36(11–12), 2233–2249. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0931-y>
- Qian, B., Corte-Real, J., & Xu, H. (2000). *Is the North Atlantic Oscillation the most important atmospheric pattern for precipitation in Europe?* *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 105(D9), 11,901-11,910. <https://doi.org/10.1029/2000JD900102>
- Rae, B. (2014). *A multi-year comparison of vegetation phenology between military training and native tallgrass prairie using TIMESAT and Moderate Resolution Satellite Imagery*. Kansas State University.
- Ramírez, L., & Vallejo, B. (2018). *Influencia De Los Patrones Climáticos Globales En La Variabilidad Del Clima Durante El Período 2000-2016 En Los Páramos Del Norte De Ecuador*. Universidad Técnica de Norte.
- Recalde-Coronel, G. C., Zaitchik, B., & Pan, W. K. (2020). *Madden–Julian oscillation influence on sub-seasonal rainfall variability on the west of South America*. *Climate Dynamics*, 54(3–4), 2167–2185. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-05107-2>
- Reyes-Díez, A., Alcaraz-Segura, D., & Cabello-Piñar, J. (2015). *Implicaciones del filtrado de calidad del índice de vegetación EVI para el seguimiento funcional de ecosistemas*. *Revista de Teledeteccion*, 2015(43), 11–29. <https://doi.org/10.4995/raet.2015.3316>
- Sánchez-Santillán, N., Signoret-Poillon, M., & Garduño-López, R. (2006). *La Oscilación del Atlántico Norte: un fenómeno que incide en la variabilidad climática de México*. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 7(2), 85–95.

<https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2006.07n2.007>

- Silvestri, G. E., & Vera, C. S. (2003). Antarctic Oscillation signal on precipitation anomalies over southeastern South America. *Geophysical Research Letters*, 30(21), 1–4. <https://doi.org/10.1029/2003GL018277>
- Torres-Pineda, C. E., & Pabón-Caicedo, J. D. (2017). Variabilidad intraestacional de la precipitación en Colombia y su relación con la oscilación de Madden-Julian. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 41(158), 79–93. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.380>
- Van Leeuwen, W. J. D., Hartfield, K., Miranda, M., & Meza, F. J. (2013). Trends and ENSO/AAO Driven Variability in NDVI Derived Productivity and Phenology alongside the Andes Mountains. *Remote Sensing*, 5(3), 1177–1203. <https://doi.org/10.3390/rs5031177>
- Van Leeuwen, W. J. D., Orr, B. J., Marsh, S. E., & Herrmann, S. M. (2006). Multi-sensor NDVI data continuity: Uncertainties and implications for vegetation monitoring applications. *Remote Sensing of Environment*, 100(1), 67–81. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.10.002>
- Veettil, B. K., Leandro Bayer Maier, É., Bremer, U. F., & de Souza, S. F. (2014). Combined influence of PDO and ENSO on northern Andean glaciers: a case study on the Cotopaxi ice-covered volcano, Ecuador. *Climate Dynamics*, 43(12), 3439–3448. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2114-8>
- Vuille, M., Bradley, R., & Keimig, F. (2000). Climate variability in the Andes of Ecuador and its relation to tropical Pacific and Atlantic Sea Surface temperature anomalies. *Journal of Climate*, 13(14), 2520–2535. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<2520:CVITAO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<2520:CVITAO>2.0.CO;2)
- Weiss, D. J., Atkinson, P. M., Bhatt, S., Mappin, B., Hay, S. I., & Gething, P. W. (2014). An effective approach for gap-filling continental scale remotely sensed time-series. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 98, 106–118. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.10.001>
- Williams, D. L., Goward, S., & Arvidson, T. (2006). Landsat : Yesterday , Today , and Tomorrow. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(10),

1171–1178.

- Yu, C., Chen, L., Su, L., Fan, M., & Li, S. (2011). *Kriging interpolation method and its application in retrieval of MODIS aerosol optical depth. Proceedings - 2011 19th International Conference on Geoinformatics, Geoinformatics 2011, 2006.* <https://doi.org/10.1109/GeoInformatics.2011.5981052>
- Yue, S., & Wang, C. Y. (2002). *Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test. Water Resources Research, 38(6), 4-1-4–7.* <https://doi.org/10.1029/2001wr000861>
- Zhang, C. (2005). *Madden-Julian Oscillation. Geophys, 43.* <https://doi.org/10.1029/2004RG000158>.