



**“MAPEO DIGITAL DE CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO
MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES Y ALGORITMOS DE
AUTOAPRENDIZAJE EN EL ECOSISTEMA HERBAZAL DEL PÁRAMO,
PROVINCIA DE CHIMBORAZO, ECUADOR”**

Tesis de Maestría

JOHANNA ELIZABETH AYALA IZURIETA

Presentada ante la Facultad de Ingeniería y la Facultad de Ciencias Astronómicas y
Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata
como requisito para la obtención del Grado Académico de

MAGÍSTER EN GEOMÁTICA

Director de Tesis: Dr. Prof. Víctor García

Codirector de Tesis: Dr. Prof. Jorge Sisti

Jurado de Tesis: Dra. Prof. Adriana Aleksa

Dra. Prof. Analía Argerich

Dr. Prof. Horacio Bozzano

Lugar y fecha de presentación oral y pública: La Plata, 02 de julio del 2019

RESUMEN

Se presenta una metodología para predecir de manera cuantitativa el almacenaje del Carbono Orgánico del Suelo (COS) en zonas alto andinas, en donde, la complejidad paisajística evidenciada por la topografía irregular, dificultades de acceso, clima frío - frío intenso, alta nubosidad, así como su geología, hacen de dicha tarea un gran desafío. La zona de estudio corresponde al ecosistema Herbazal del Páramo (HP) de la provincia de Chimborazo, Ecuador. La metodología emplea variables espectrales derivadas de imágenes satelitales Landsat 8 (sensores OLI y TIRS), Modelo Digital de Elevación (MDE), datos de secuestro de COS *in situ* en el perfil 0 - 30 cm y variables meteorológicas. Las variables son obtenidas mediante el procesamiento de imágenes satelitales y Sistemas de Información Geográfica (SIG), éstas variables son usadas en la calibración de un algoritmo de autoaprendizaje con *Random Forest Regression (RFR)* para la predicción de COS. Se logró encontrar 9 variables que controlan la dinámica de distribución de COS en el área de estudio, y a través de ellas generar el modelo final de predicción de COS con una precisión del 82 %, validada mediante muestreo aleatorio simple (MAS). Las variables halladas son: Formación Geológica, Taxonomía, Precipitación, Altura, Orientación, Factor LS, Índice BI, Temperatura Ambiente, Temperatura Superficial - *TOA Brightness Temperature*. Mediante SIG se generó el mapa de COS en la zona de estudio y se cuantificó la extensión de las mayores concentraciones de COS, en donde, el mayor porcentaje del área de estudio tiene altas reservas de COS, entre los 150-205 Mg/ha, equivalente al 57 % del área total.

A través del presente estudio y sus resultados se presenta una nueva alternativa de cuantificación de COS. El modelo calibrado puede ser extendido sin necesidad de muestrear *in situ*, muy útil en zonas complejas como el ecosistema páramo. El mapeo digital de COS permitió revelar las elevadas reservas de COS existentes en el ecosistema de estudio, representando un gran aporte en la caracterización de los suelos del territorio nacional.

Finalmente, los resultados obtenidos pueden ser utilizados para crear normativas provinciales y nacionales, para evitar la degradación del suelo en este tipo de ecosistemas, considerando la importancia del HP en la estabilización de las estructuras del suelo, regulación hídrica y su aporte en la mitigación del cambio climático.

Palabras clave: Landsat 8, Random Forest, índices multiespectrales, SIG, árboles de decisión análisis espacial.

ABSTRACT

The methodology presented is used to predict the storage of Organic Soil Carbon (SOC) in quantitative form, in high Andean areas, where a landscape matter evidenced by irregular topography, access difficulties, cold weather - intense cold weather, high cloudiness and its geology, make this task a great challenge. The study area corresponds to the *Herbazal del Páramo* (HP) ecosystem of the province of Chimborazo, Ecuador. The methodology uses spectral variables derived from Landsat 8 satellite images (OLI and TIRS sensors), Digital Elevation Model (DEM), SOC sequester data in situ in the profile 0 - 30 cm and meteorological variables. The variables are obtained by satellite image processing and Geographic Information Systems (GIS), these variables are used in the calibration of a self-learning algorithm applying Random Forest Regression (RFR) for the SOC prediction. It was possible to find nine variables that control the dynamics of SOC distribution in the study area, and with them generate the final SOC prediction model with a precision of 82%, which was validated by simple random sampling (MAS). The found variables are Geological Formation, Taxonomy, Precipitation, Height, Orientation, LS Factor, BI Index, Temperature, Surface Temperature - TOA Brightness Temperature. Using GIS, the SOC map was generated in the study area and quantify the surface area of the largest SOC values, where, the highest percentage of the study area has high SOC reserves between 150-205 Mg / ha, equivalent to 57% of the total area.

With the present study and its results is possible to present a new alternative of SOC quantification. The calibrated model can be extended without need to sample in situ, useful in complex areas such as the Paramo geosystem. The digital mapping of SOC allows us to reveal the high reserves of SOC in the ecosystem of study, representing a great contribution to the soil characterization of the national territory.

Finally, the obtained results could be used to create provincial and national regulations to avoid the soil degradation in these types of ecosystems, considering the importance of HP on the soil structure stabilization, water regulation and its contribution on climate change mitigation.

Key words: Landsat 8, Random forest, multispectral indexes, GIS, decision trees, spatial analysis.

DEDICATORIA

Para mis grandes amores mi hijo Arturito y mi esposo Carlitos, su amor, sacrificio y apoyo fueron la fuerza que necesité en todo momento para seguir adelante...

A mis padres, por formarme, amarme y por acompañarme en todas las fases de mi vida...

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación- SENESCYT, como entidad auspiciante de la beca internacional de estudios dentro del Programa de Becas “CONVOCATORIA ABIERTA 2014-SEGUNDA FASE”, bajo la cual fue posible estudiar el presente Posgrado y cumplir esta nueva meta profesional.

Al Dr. Víctor García de la Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH) - Ecuador y al Dr. Jorge Sisti de la Universidad Nacional de la Plata (UNLP) - Argentina, en calidad de “Director” y “Codirector” de tesis respectivamente, por la contribución, asesoramiento, orientación y seguimiento brindado en todas las fases de la investigación.

A la Dra. Omaira Márquez, experta en suelos y miembro del proyecto SOCEPE-UNACH por su asesoramiento y guía en todas las temáticas ambientales vinculadas a la investigación.

Al Proyecto SOCEPE-UNACH, para el cual se destina el presente estudio, por su colaboración tanto de personal como de laboratorio y sus insumos, que fueron destinados en el desarrollo de la investigación.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	I
ABSTRACT.....	II
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. PROBLEMÁTICA Y JUSTIFICACIÓN.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	3
2. ANTECEDENTES.....	3
3. ZONA DE ESTUDIO.....	5
3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	5
3.2. DESCRIPCIÓN DEL ECOSISTEMA HERBAZAL DEL PÁRAMO EN EL ECUADOR.....	6
3.3. INFORMACIÓN EXISTENTE.....	8
4. MARCO TEÓRICO.....	11
4.1. SUELOS DEL ECOSISTEMA PÁRAMO.....	11
4.2. CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO (COS).....	11
4.3. GEOLOGÍA Y TAXONOMÍA DEL SUELO.....	11
4.4. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO Y SU RELACIÓN CON LAS FIRMAS ESPECTRALES.....	12
4.5. ÍNDICES ESPECTRALES.....	13
4.6. ÍNDICES Y VARIABLES TOPOGRÁFICAS.....	14
4.6.1. PENDIENTE Y ORIENTACIÓN.....	14
4.6.2. FACTOR LS.....	14
4.7. VARIABLES CLIMÁTICAS.....	14
4.8. IMÁGENES SATELITALES LANDSAT 8.....	15
4.9. RANDOM FOREST.....	15
4.9.1. ALGORITMO DE PREDICCIÓN DE RANDOM FOREST.....	16
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
5.1. DESCARGA Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES.....	19
5.1.1. DESCARGA DE IMÁGENES LANDSAT 8.....	19
5.1.2. CORRECCIÓN RADIOMÉTRICA.....	21
5.1.3. ENMASCARAMIENTO Y VALIDACIÓN DE PÍXELES.....	24
5.1.4. MOSAICO DE LAS ESCENAS.....	25
5.1.5. EXTRACCIÓN DE NUBOSIDAD Y RELLENO DE IMAGENES.....	25
5.1.6. CÁLCULO DE ÍNDICES ESPECTRALES.....	28
5.2. GENERACIÓN DE VARIABLES TOPOGRÁFICAS.....	33

5.3.	ESTIMACIÓN DE SUPERFICIES MEDIANTE KRIGING	36
5.3.1.	SUPERFICIES CLIMÁTICAS	36
5.3.2.	ESTIMACIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE pH	38
5.4.	ENTRENAMIENTO DEL ALGORITMO DE AUTOAPRENDIZAJE PARA PREDICCIÓN DE COS	39
5.4.1.	TRATAMIENTO DE INFORMACIÓN <i>IN SITU</i>	39
5.4.2.	GENERACIÓN DEL ARCHIVO PARA CALIBRACIÓN DEL ALGORITMO CON RANDOM FOREST	39
5.4.3.	CALIBRACIÓN DEL ALGORITMO DE AUTOAPRENDIZAJE	40
5.5.	OBTENCIÓN DE LA PREDICCIÓN DEL COS CON EL MODELO GENERADO (ALGORITMO RANDOM FOREST CALIBRADO)	43
5.6.	VALIDACIÓN DE RESULTADOS POR MUESTREO DE CAMPO	44
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
6.1.	RESULTADOS DEL MUESTREO DE VALIDACIÓN	50
7.	CONCLUSIONES	52
8.	RECOMENDACIÓN	54
	NOMENCLATURA	57
	BIBLIOGRAFÍA	59
	ANEXOS	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3. 1. Área de estudio-provincia de Chimborazo.....	6
Figura 3. 2. a), b), c) Ecosistema Herbazal del Páramo-Chimborazo; d) En coloración roja la distribución del ecosistema Herbazal del Páramo en el Ecuador.	7
Figura 3. 3. a) y b) Recolección de muestras de suelo in situ; c) y d) Análisis de laboratorio para determinar COS a partir de las muestras de suelo recolectadas in situ; e) Mufla marca Thermo Scientific -Lab Servicios Ambientales-UNACH; f) Estufa marca Memmert- Lab Servicios Ambientales-UNACH; g) pHachímetro- Lab Servicios Ambientales-UNACH; h) Muestras de suelo de la zona de estudio.	10
Figura 4. 1. Funciones del COS. (FAO, 2017).....	11
Figura 4. 2. Firmas espectrales de distintas cubiertas, (Chuvieco, 2008)	13
Figura 4. 3. Algoritmo de selección del mejor Split. (SALFOR SYSTEMS A MINITAB, 2017)	17
Figura 4. 4. Síntesis procedimental del algoritmo de regresión de RF. (SALFOR SYSTEMS A MINITAB, 2017)	18
Figura 5. 1. Esquema general de procedimientos	18
Figura 5. 2. Flujograma de trabajo: a) generación de insumos para la predicción y mapeo de COS; b) Predicción y mapeo de COS	19
Figura 5. 3. Sitio web USGS GloVis, escenas de imágenes base descargadas	20
Figura 5. 4. (a) Codificación de las cartas topográficas del IGM, de la provincia de Chimborazo, (b) Cartas topográficas utilizadas, (c). Ubicación de las catas topográficas con respecto las escenas que cubren la zona de estudio.....	21
Figura 5. 5. Configuración de la herramienta Radiometric Calibration utilizada	22
Figura 5. 6. Configuración del módulo FAASH Atmospheric Correction ENVI 5.1.....	23
Figura 5. 7. Resultado de la corrección radiométrica, firma espectral en uno de los píxeles de la escena superior	23
Figura 5. 8. Banda QA de la escena Norte path, row 010, 061.	24
Figura 5. 9. (a) Acople de las escenas N y S para mosaico; (b) Acople de las máscaras de píxeles validados de zona N y S para mosaico.....	25
Figura 5. 10. Modelado cartográfico utilizado, en el mosaico de referencia y las imágenes de relleno. Aplicación ModelBuilder- ArcGis 10.2.....	26
Figura 5. 11. A la izquierda píxeles de relleno. A la derecha, mosaico de referencia con vacíos de información por concepto de extracción por nubosidad.	27
Figura 5. 12. Configuración del relleno. Mosaico de referencia es la imagen a rellenar y las imágenes para el relleno son de ajuste.....	27

Figura 5. 13. Combinación falso color (7,5,3). En el lado izquierdo, la imagen satelital corregida de la provincia de Chimborazo (el sector Oeste del cantón Cumandá no es considerado por encontrarse fuera de la zona del estudio); del lado derecho se presenta la imagen cortada con la zona objetivo del estudio, ecosistema Herbazal del Páramo de Chimborazo.....	28
Figura 5. 14. Índice de suelo desnudo-BI.....	30
Figura 5. 15. Esquema procedimental del cálculo de T	31
Figura 5. 16. Mapa de T en el Ecosistema Herbazal del Páramo	32
Figura 5. 17. Esquema procedimental del cálculo del Factor LS	34
Figura 5. 18. Mapa del Factor LS del Ecosistema Herbazal del Páramo	35
Figura 5. 19. (a) Ubicación de las estaciones meteorológicas con datos de temperatura respecto al ecosistema de estudio. (b) Ubicación de las estaciones con mediciones pluviométricas respecto al ecosistema de estudio.	37
Figura 5. 20. (a) Superficie de temperatura en el Ecosistema Herbazal del Páramo. (b) Superficie de precipitación en el Ecosistema Herbazal del Páramo.	37
Figura 5. 21. Mapa de pH en el Ecosistema Herbazal del Páramo.....	38
Figura 5. 22. Diagrama procedimental de la generación del archivo de calibración para el algoritmo RF.....	40
Figura 5. 23. Distribución de puntos de entrenamiento del algoritmo RF y captura del archivo .csv generado para el entrenamiento	40
Figura 5. 24. Configuración del modelo RF.....	42
Figura 5. 25. Configuración de características de testeo para validación del modelo RF	42
Figura 5. 26. Configuración de parámetros del modelo RF	43
Figura 5. 27. Configuración de parámetros para la predicción.....	44
Figura 6. 1. Importancia de las variables de predicción.....	46
Figura 6. 2. Mapa resultado de la predicción de COS [%]	47
Figura 6. 3. Mapa de resultado de la predicción de COS [Mg/ha]	48
Figura 6. 4. Ubicación de puntos de validación en la zona de estudio	50
Figura 6. 5. Valores de COS en los puntos de validación vs COS predicho, unidades [%]	51
Figura 6. 6. Gráficas de error de COS [%] en función de las muestras de validación	51
Figura 6. 7. Valores de COS de puntos de validación vs COS predicho, unidades [Mg/ha].....	51
Figura 6. 8. Gráficas de error de COS [Mg/ha] en función de las muestras de validación	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3. 1. Herbazal del Páramo HP. (MAE, 2013).....	8
Tabla 4. 1. Descripción de las bandas de las imágenes Landsat 8, (Survey, 2016).....	15
Tabla 5. 1. Imágenes Landsat 8 utilizadas	20
Tabla 5. 2. Índices espectrales calculados y su expresión de acuerdo a las bandas de Landsat 8	29
Tabla 6. 1. Ensayos para la presentación del modelo de COS	46

1. INTRODUCCIÓN

1.1. PROBLEMÁTICA Y JUSTIFICACIÓN

Los ecosistemas de páramo (EP) dominantes se encuentran en un rango altitudinal de 3,000 – 4,700 msnm, con una extensión superior a 75,000 km² abarcando territorio en países como Costa Rica, Colombia, Ecuador, Venezuela y Perú. En el Ecuador, el EP ocupa la mayor extensión con respecto a su extensión total (Beltrán et al., 2009). El ecosistema de páramo en Ecuador (EPE) cubre una superficie de 13,372 km², correspondiente al 5% del territorio nacional (Hofstede et al., 2014).

El ecosistema páramo es el mayor proveedor de agua del Ecuador, sus suelos son relativamente jóvenes especialmente en zonas de volcanismo activo y la ceniza volcánica aumenta la acumulación de materia orgánica por la formación de complejos organometálicos con aluminio (Al) y hierro (Fe) liberados durante el desgaste de la ceniza. En el Ecuador, los suelos del centro y norte se desarrollaron a partir de la intemperización de las cenizas volcánicas (Hofstede et al., 2014). Actualmente, la zona de transición entre bosque y páramo está bastante afectada, especialmente en las vertientes interandinas. Las actividades actuales en los páramos se encaminan a la ganadería que viene asociada también con la quema de cubierta vegetal; así mismo, los cultivos distintos a los endémicos (Hofstede et al., 2014), producen una modificación en la estructura del suelo, afectando la funcionalidad de los servicios ecosistémicos del EP, la disminución de la capacidad de retención y regulación del agua, así como la acumulación de carbono orgánico.

El clima en el EP es frío con una variación media anual entre 2 °C y 10 °C y la temperatura baja entre 0.5 °C y 0.7 °C por cada 100 m de altitud a partir de los 2,000 m (Mena et al., 2000). Las bajas temperaturas de los EP, reducen la actividad biológica. Como consecuencia, la mineralización de la materia orgánica baja y eso permite su acumulación en grandes cantidades. Así mismo, por efecto de la neblina y lloviznas persistentes, así como la lluvia que varía entre 500 mm y más de 3,000 mm/año, la humedad del suelo en el EP es permanente y permite su evolución rápida (Mena et al., 2000). Los EP actúan como sumideros por su gran capacidad de retención de carbono en el suelo, incluso similar a la cantidad retenida en la vegetación de una extensión equivalente de bosque húmedo tropical (Hofstede, 2004).

Existe una correlación directa entre el grado de conservación del suelo y la materia orgánica que dispone: a mayor estado de conservación del suelo, éste dispone de mayor cantidad de

materia orgánica, y por ende mejor almacenamiento de carbono y mejor regulación hídrica. El carbono orgánico del suelo (COS) tiene que ver con el potencial de captura de CO₂ por lo tanto, el EP evita la descarga de grandes concentraciones de CO₂ a la atmósfera. El CO₂ es un gas de efecto invernadero, pero que en aumento exagerado tiene impacto ambiental negativo por su alta influencia en el cambio climático (González et al., 2003; Herrán, 2012). Estudios indican que 1 ton de COS equivale a la captura de 3.67 ton de CO₂ (Africano et al., 2016). En el Ecuador, la cantidad de carbono que el EP es capaz de almacenar está sobre los 143 ton/ha (0-30 cm de profundidad).

Las estimaciones espaciales del COS son cada vez más importantes para reconocer el potencial de almacenamiento de carbono de los suelos del EP en el contexto del cambio climático. El conocer el estado de conservación del ecosistema permite tomar decisiones y elaborar planes de manejo y gestión ambiental para la preservación de los EP. Sin embargo, los datos de carbono en los suelos de los EP son escasos y los correspondientes a la capa orgánica apenas existen (Ließ et al., 2016). Estudiar la situación actual del EP del Ecuador es una actividad que permitirá la toma de decisiones para el manejo de las tierras en los Andes ecuatorianos (Mcknight, 2015).

Así mismo, es necesario indicar que la dificultad de acceso puede ser abordada mediante el uso de herramientas y análisis a través de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), así como la incorporación de imágenes satelitales (Chuvienco, 1995). La posibilidad de estudiar la tierra desde el espacio permite obtener modelos matemáticos y algoritmos que facilitan los procesos mecánicos de las investigaciones (Chuvienco, 2008). Desde este punto de vista, la obtención de resultados precisos junto a la reducción de años en el tiempo de estudio requerido por análisis basados únicamente en técnicas *in situ* y laboratorio, es una gran ventaja. Encontrar la conexión entre características internas y superficiales en la tierra, ligadas al COS, y poder modelarla sería un gran hallazgo.

Por lo tanto, la necesidad de conocer la distribución espacial del COS en los páramos de Ecuador ha llevado a un equipo de investigación de la Universidad Nacional de Chimborazo-Ecuador a desarrollar el proyecto de investigación "Soil Organic Carbon Evaluation and Sequestration in Ecuadorian Páramo Ecosystems"- SOCEPE, a través de la dirección del PhD. Víctor García, respaldado por Universidades como ESPOCH-Ecuador, Brock University de Canadá, Universidad Verona y Alcalá de España, UNESCO y a través del Convenio Universidades de la República Popular China con el Gobierno del Ecuador. Este proyecto tiene como objetivo

la estimación espacial y evaluación del COS en todo el ecosistema páramo ecuatoriano (UNACH, 2016).

El presente estudio es de vital importancia para el cumplimiento de los objetivos del proyecto SOCEPE. La metodología integra técnicas de procesamiento de imágenes multispectrales, análisis espacial mediante SIG y el uso de algoritmos de autoaprendizaje, para obtener un mapeo digital del COS en el EP Herbazal del Páramo en la provincia de Chimborazo-Ecuador. Los resultados obtenidos servirán para extender la predicción de COS mediante el algoritmo calibrado en el ecosistema de estudio a nivel nacional. Así mismo, el estudio será referente para nuevas investigaciones a nivel nacional e internacional.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es mapear de manera digital el carbono orgánico del suelo mediante imágenes satelitales y algoritmos de autoaprendizaje en el ecosistema Herbazal del Páramo, provincia de Chimborazo, Ecuador.

Los objetivos específicos que permitirán alcanzar el objetivo principal son:

- Generar información geográfica georreferenciada a partir de datos *in situ*, imágenes LANDSAT 8, Modelo Digital de Elevación e información ambiental, relevante en el almacenamiento de COS.
- Calibrar el algoritmo de aprendizaje automático Random Forest, entrenado para la predicción del COS y evaluar su precisión.
- Seleccionar variables indicadoras relevantes en la distribución espacial del COS en el EPE tipo Herbazal del Páramo de la zona de estudio.
- Estimar la cantidad de almacenamiento de COS distribuido en la capa superficial (0-30 cm bajo suelo) del EPE tipo Herbazal del Páramo en el área de estudio.

2. ANTECEDENTES

La predicción cuantitativa del carbono del suelo puede lograrse mediante modelos empíricos o mecánicos o una combinación de ambos. El mapeo digital del COS consiste en la aplicación de un modelo empírico que conlleva la utilización de una base de datos de observaciones COS sobre un área de interés, variables relevantes para el área de estudio, la calibración o entrenamiento de una función o modelo de predicción espacial para toda la zona

de estudio, y finalmente un proceso de validación. Los mapas digitales de COS pueden utilizarse en modelos mecánicos de paisaje simulando la evolución orgánica del carbono (Minasny et al., 2014).

El mapeo digital de COS en los suelos a escala global se considera de vital importancia para la toma de decisiones adecuadas y correctas sobre los usos de la tierra a nivel mundial (Ramifehiarivo et al., 2017). Los métodos utilizados para llegar a mapear el COS son diversos y el reto es encontrar la manera más apropiada y de mejor precisión. El COS obtenido a partir de datos de perfiles de suelo y una generalización de resultados mediante SIG es aplicado a escala regional o nacional. Uno de los métodos es realizar una distribución espacial en SIG a través de una interpolación de muestreos de campo, como es el caso del método inverso de la distancia (Segura et al., 2005). Estudios enfocados en la dinámica de nutrientes de los suelos, en donde el COS es uno de los parámetros más relevantes, obtuvieron una cobertura territorial del COS usando *kriging* (Arbelo et al., 2008). De este modo, varios países a nivel mundial han empezado a realizar estimaciones de COS en su intento de encontrar metodologías más precisas, como por ejemplo el uso de simulaciones estocásticas, un plan de muestreo y modelos matemáticos (Chartin et al., 2017).

Considerando que la cantidad de secuestro de COS en el suelo puede estar relacionada a variantes ambientales, investigaciones han incorporado en el mapeo del COS, variables geomorfométricas, variables climáticas, también usos y tipos de suelo, en donde se encontró que algoritmos como Random Forest y máquinas de vectores de soporte, ofrecen mejores resultados (Blanco et al., 2014). Una reciente revisión de modelos predictivos indicó que los modelos de árbol CART y Random Forest, son muy potentes para mapear COS y que además pueden obtener resultados favorables incluso en presencia de conjuntos de datos con inclusión de ruido (Zhang et al., 2017). Con respecto a las variables predictivas para COS, se encontró que la temperatura, precipitación, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI (Rouse et al., 1974), podrían estar relacionadas (Ramifehiarivo et al., 2017). La aplicación de los índices derivados de imágenes multiespectrales es muy importante a la hora de realzar y analizar tipos y usos de suelo (Ayala et al., 2017), la capacidad indicadora de los tipos de cubierta vegetal u otros tipos de cubierta del suelo en determinados rangos del espectro electromagnético, hace posible su estudio y discriminación a través de un ajuste matemático entre bandas. Así el suelo desnudo, tipos de cubiertas vegetales, nieve, entre otros, pueden ser evaluados (CONAE, 2016).

Estudios de mapeo digital de COS en el EP son escasos, en los cuales se investiga al COS de manera puntual con análisis estadístico. En el Ecuador, el conocimiento a escala nacional de las

reservas de COS en el EP es inexistente y a escala regional el conocimiento es reducido. Existen estudios que analizan el COS en el EPE sin tomar en cuenta su distribución espacial (Farley et al., 2004). Luego de identificar el gran potencial del EP como sumidero de COS, así como la necesidad latente de avanzar a una amplia investigación experimental en el tema (Farley et al., 2012), se han desarrollado avances en el análisis de metodologías para la predicción del COS en el EPE (Ließ et al., 2016). La complejidad paisajística del suelo en los EPE y su difícil accesibilidad plantean un desafío para el análisis de distribución espacial (Ließ et al., 2016), por eso una metodología adecuada con el hallazgo de indicadores adecuados para este tipo de ecosistema se considera un gran aporte científico.

En el Ecuador, el EP tipo Herbazal del Páramo (HP) de código HsSn02 según el Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE, 2013), identificado también como Páramo Herbáceo y conocido como pajonales altimontanos y montanos paramudos; cubre una superficie de 10,520.06 km², de los cuales el 15.9 % se encuentra concentrado en la provincia de Chimborazo, razón por la que la provincia de Chimborazo ha sido tomada por el proyecto SOCEPE como referente para el mapeo digital del COS en todo el territorio Ecuatoriano.

3. ZONA DE ESTUDIO

3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio corresponde al ecosistema páramo, subtipo de ecosistema Herbazal del Páramo (HP) en la provincia de Chimborazo, Ecuador, sobre la cordillera de los Andes, ver Figura 3.1. Chimborazo está situada a 135 km al sur de la ciudad de Quito y se extiende entre las coordenadas: 78° 39' de longitud Oeste y 1° 39' de latitud Sur, definida entre las coordenadas UTM Zona 17 Sur, Datum WGS84 (X= 694,531; Y= 9,840,051) y (X=789,975; Y=9,714,929) y su capital es la ciudad de Riobamba. La provincia de Chimborazo se encuentra en la zona centro del país, tiene una superficie aproximada de 6,499.7 km², de los cuales 1,667.6 km² corresponden al HP, equivalente al 25.7 % de la superficie total de la provincia.

La provincia de Chimborazo tiene topografía irregular que se encuentra en un rango altitudinal de 143 a 6,263 msnm. El ecosistema Herbazal del Páramo comprende alturas que varían entre los 2,303 a 4,501 msnm. El clima es propio de la sierra ecuatoriana, registrando en el HP una temperatura media entre 2 °C y 16 °C según las isotermas del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI) (SNI ECUADOR - INFOPLAN, 2011).

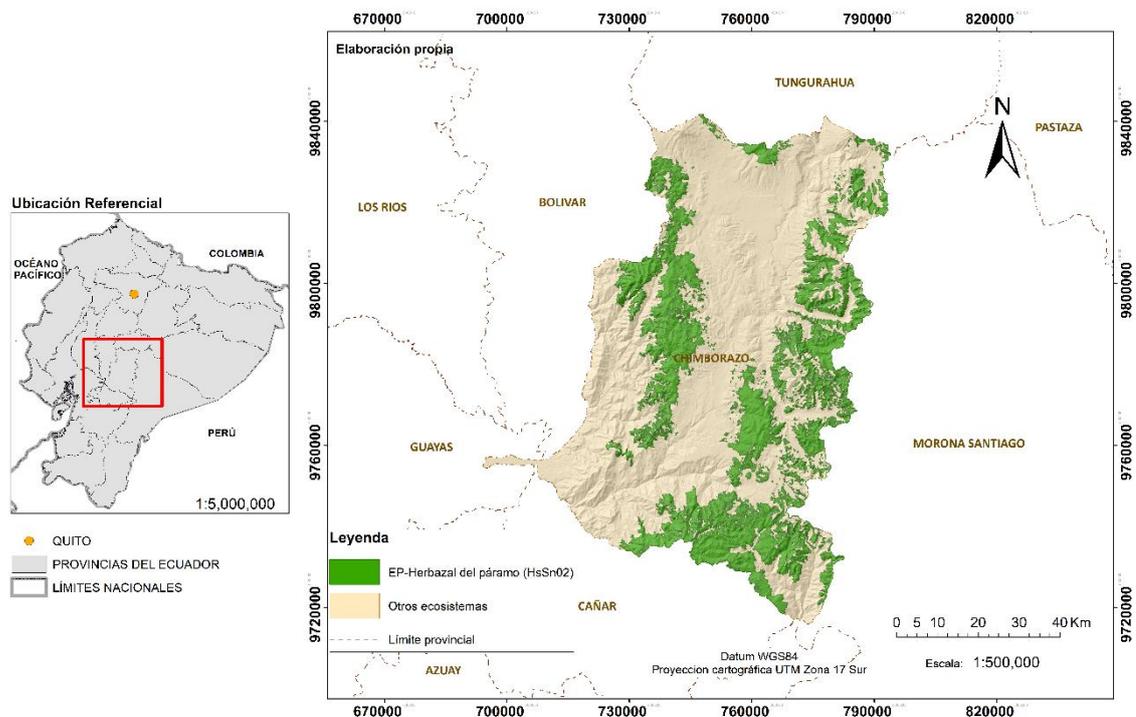


Figura 3. 1. Área de estudio-provincia de Chimborazo

3.2. DESCRIPCIÓN DEL ECOSISTEMA HERBAZAL DEL PÁRAMO EN EL ECUADOR

El ecosistema HP abarca la mayor extensión de los ecosistemas de montaña en el Ecuador y se extiende a lo largo de las dos cordilleras de los Andes, desde la provincia del Carchi hasta la provincia de Loja (Beltrán et al., 2009). Se caracteriza por el paisaje de los ecosistemas altoandinos del Ecuador y se localiza generalmente en los valles glaciares, laderas y llanuras montañosas sobre los 3,300 m de elevación, ver Figura 3.2. Son ricos en carbono orgánico (COS) y las condiciones climáticas de alta humedad y la alta concentración de carbono orgánico en el suelo determinan que este ecosistema se caracterice por contener una gran cantidad de agua por unidad de volumen y con excelente capacidad de regulación hídrica (Ministerio de Ambiente del Ecuador, 2012).



a)



b)



c)



d)

Figura 3. 2. a), b), c) Ecosistema Herbazal del Páramo-Chimborazo; d) En coloración roja la distribución del ecosistema Herbazal del Páramo en el Ecuador.

Actividades antrópicas como quemas de coberturas de suelo y actividades ganaderas pueden afectar la estructura y composición de la vegetación de este ecosistema. En lugares donde existe una mayor intensidad en las quemas y el pastoreo, los herbazales tienen una menor altitud, han perdido biomasa y el estrato arbustivo está ausente. Este ecosistema está caracterizado por tener una vegetación densa dominada por gramíneas amacolladas. Los arbustos y las pajas amacolladas desaparecen gradualmente a lo largo del gradiente de elevación y son reemplazados en importancia por los cojines, rosetas acaulescentes, arbustos postrados y hierbas de tallo corto. La composición y fisonomía de estos herbazales difieren altitudinal y latitudinalmente, así como también factores tales como el clima, la historia geológica, la diversidad de hábitats junto con la influencia humana configuran la diversidad de la biota del páramo (MAE, 2012).

El Herbazal del Páramo es un ecosistema clasificado como ecosistema de formación vegetal y sus características se observan en la Tabla 3. 1.

Tabla 3. 1. Herbazal del Páramo HP. (MAE, 2013)

Fisonomía	Herbácea
Bioclima	Pluvial. Ombrotipo: Hiperhúmedo
Biogeografía	Región: Andes Provincia: Andes del Norte. Sector: Páramo
Fenología	Siempreverde
Piso bioclimático	Montano alto y montano alto superior (3,400-4,300 msnm N - 2900-3,900 msnm S) Termotipo (It): supratropical a orotropical
Geoforma	Relieve general: de montaña Macrorelieve: Valle Glaciar, Cordillera Mesorelieve: Llanura subglaciar, Vertientes disectadas
Inundabilidad general	Régimen de Inundación: no inundable

3.3. INFORMACIÓN EXISTENTE

Información

El proyecto SOCEPE cuenta con información de datos *in situ*, que corresponden muestreos de carbono orgánico del suelo (COS) en el EPE tipo HP, basados en muestras recolectadas en el horizonte de capa superficial (0 - 30 cm bajo suelo) y con las lecturas de pH del suelo asociadas a las muestras.

La información entregada proviene de una estratificación de unidades de muestreo en el ecosistema Herbazal del Páramo basada en la geología y taxonomía del suelo; utilizando un muestreo aleatorizado considerando el error de muestreo y un nivel de confianza del 95% (Galmés, 2011). La recolección de muestras *in situ* es obtenida mediante barrenación, ver Figura 3.3 a) y b). En el laboratorio de servicios ambientales de la UNACH, el personal del proyecto

SOCEPE obtuvo el porcentaje (%) de COS almacenado en el suelo a través de la cuantificación de la materia orgánica (MO) por calcinación y el factor Van Bemmelen (Van Bemmelen, 1891), para cada una de las muestras, ver Figura 3.3 c), d), e), f) y g). La posición asociada a las muestras de suelo fue registrada mediante GPS en forma aislada, con el GPS de mano marca *Trimble JUNO*, *SW Terrasinc Profesional*. Las muestras fueron tomadas en las zonas céntrica de las unidades, evitando errores asociados a la precisión de la posición. Suman un total de 501 puntos de muestreo que corresponden a las 501 muestras de suelo procesadas en laboratorio, ver Figura 3.3 h), con su respectiva información de posición espacial (coordenadas UTM zona 17 S, WGS84) y su correspondiente valor porcentual [%] de COS, así como COS en [Mg/ha].



a)



b)



c)



d)



e)



f)



g)



h)

Figura 3. a) y b) Recolección de muestras de suelo in situ; c) y d) Análisis de laboratorio para determinar COS a partir de las muestras de suelo recolectadas in situ; e) Mufla marca Thermo Scientific -Lab Servicios Ambientales-UNACH; f) Estufa marca Memmert- Lab Servicios Ambientales-UNACH; g) pHímetro- Lab Servicios Ambientales-UNACH; h) Muestras de suelo de la zona de estudio.

Información geográfica

Se dispone de la cartografía base de la provincia de Chimborazo, así también de todo el Ecuador que incluyen ecosistemas, geología, taxonomía del suelo, incluyendo el modelo digital de elevación (MDE) en una resolución de 30 m a través de INFOPLAN Ecuador. (SNI ECUADOR - INFOPLAN, 2011)

4. MARCO TEÓRICO

4.1. SUELOS DEL ECOSISTEMA PÁRAMO

Los suelos del páramo son jóvenes, su formación se inicia 10,000 años atrás, con la meteorización de roca descubierta al cabo de las últimas glaciaciones (Pleistoceno), cuando la totalidad de la extensión de páramo estuvo cubierta de hielo. En zonas donde hay volcanismo activo, el suelo tiene que formarse con cenizas volcánicas de edad todavía más reciente. De igual manera, gracias a las bajas temperaturas, el proceso de formación de suelo es lento. Al contrario de lo que sucede con las tierras bajas, los suelos de páramo tienen esta elevada concentración de materia orgánica y además son muy profundos (hasta varios metros). Gracias a esto, la cantidad total de carbono almacenada por hectárea de páramo puede ser mayor que la de una selva tropical (Hofstede et al., 2014).

4.2. CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO (COS)

El COS es el carbono (C) que permanece en el suelo después de la descomposición parcial de cualquier material producido por organismos vivos. Constituye un elemento primordial del ciclo global del carbono a través de la atmósfera, vegetación, suelo, ríos y océano. El COS es el componente principal de la materia orgánica del suelo (MOS) y, como tal, constituye el combustible de cualquier suelo. La MOS contribuye a funciones clave del suelo, ya que es fundamental para la estabilización de la estructura del suelo, la retención y liberación de nutrientes vegetales, y permite la infiltración y almacenamiento de agua en el suelo. La pérdida de COS indica un cierto grado de degradación del suelo (FAO, 2017).

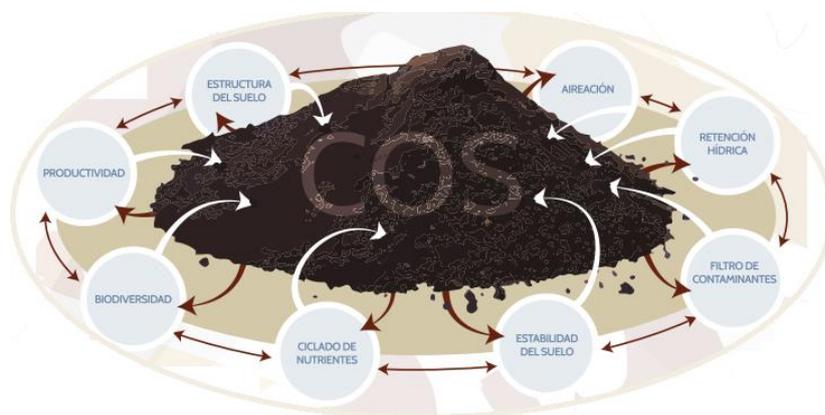


Figura 4. 1. Funciones del COS. (FAO, 2017)

4.3. GEOLOGÍA Y TAXONOMÍA DEL SUELO

La geología de los suelos tiene que ver con su origen y evolución en el paso de los tiempos. En el Ecuador se encuentran los siguientes geosistemas: (a) Las frías cimas de las cordilleras

andinas con presencia de conos de volcanes de diferentes edades y poco desarrollados, suelos negros con alto contenido de materia orgánica; (b) Laderas exteriores de los Andes, con modelado vigoroso sobre diversas rocas antiguas muy diseccionadas. El clima es húmedo a húmedo con presencia de nubes pesadas, condición que favorece la formación de zonas boscosas perennes. Se tiene cobertura parcial de cenizas volcánicas recientes y rejuvenecidos por la erosión; (c) Cuencas interandinas de la Sierra norte con rellenos de sedimentos de origen volcánico, donde la evidente morfogénesis volcánica fue promovida por la presencia de estratovolcanes recientes, grandes y activos; (d) Cuencas interandinas de la sierra central sobre una base antigua, volcánica y metamórfica, sin la presencia de volcanes activos o reciente cobertura piroclástica. Esta zona está fragmentada en dos conjuntos de cuencas sedimentarias paralelas con un relieve distribuido en una secuencia topo-climática donde los suelos de la parte superior son ferralíticos, a menudo con alto contenido de humus, los suelos de la zona media evolucionan moderadamente y los suelos de la parte inferior están poco desarrollados; (e) Muecas y valles fluviales interandinos, con suelos aluviales relativamente ricos y con actividad agrícola diversa; (f) Alivios de la Sierra Sur, ubicados en una secuencia de suelos paleo-topo-climáticos de valles grandes y depresiones ortogonales donde existe una clara estratificación del clima húmedo al árido. (Moreno et al., 2018)

Los nombres de las formaciones geológicas suelen relacionarse al sitio al que pertenecen, la zona de estudio abarcando 31 formaciones geológicas según la cartografía de INFOPLAN (SNI ECUADOR - INFOPLAN, 2011).

La taxonomía del suelo es un sistema de clasificación de suelos, en donde, se considera que el suelo es un cuerpo natural que comprende a sólidos (minerales y materia orgánica), líquidos y gases que ocurren en la superficie de las tierras, que ocupa un espacio y que se caracteriza por uno o ambos de los siguientes: horizontes o capas que se distinguen del material inicial como resultado de adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de energía y materia o por la habilidad de soportar plantas en un ambiente natural (USDA & NRCS, 2014). La Taxonomía de Suelos de USDA es el sistema nacional de clasificación de los suelos de Estados Unidos y es reconocido en América Latina y Asia.

4.4. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO Y SU RELACIÓN CON LAS FIRMAS ESPECTRALES

El espectro electromagnético se puede expresar como cualquier tipo de energía radiante en función de la longitud de onda o frecuencia, aunque la sucesión de valores de longitud de onda es continua, se pueden establecer una serie de bandas en donde la radiación

electromagnética presenta un comportamiento similar. La organización de bandas de longitudes de onda o frecuencia se denomina espectro electromagnético. En teledetección ambiental suele utilizarse mucho el espectro visible (0.4-0.7 μm) distinguiendo las bandas azul, verde y rojo; también el espectro correspondiente al infrarrojo cercano (0.7 - 1.3 μm) por su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad; el infrarrojo medio (IRM) (3-5 μm) en la detección de focos de temperatura; también el espectro infrarrojo de onda corta (SWIR) (1.3-2.5 μm) usado para detectar humedad en los suelos y/o vegetación. (Chuvieco, 2008)

Las firmas espectrales vienen a ser la manera en la que se comportan las diferentes superficies a distintas longitudes de onda y de esta manera las superficies pueden ser estudiadas por su firma espectral en términos de reflectividad (ver Figura 4.2). La vegetación presenta un comportamiento cromático con baja reflectividad en el espectro visible, en el infrarrojo cercano se tienen valores más elevados y menores en el infrarrojo medio.

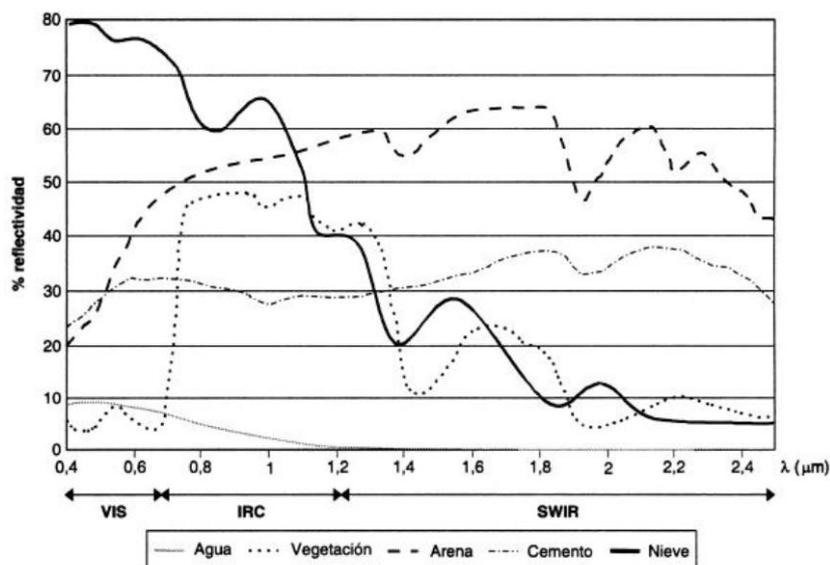


Figura 4. 2. Firmas espectrales de distintas cubiertas, (Chuvieco, 2008)

4.5. ÍNDICES ESPECTRALES

Las observaciones ambientales a través de sensores remotos pueden llegar a ser muy complejas dado que el comportamiento de una cubierta ya sea de origen vegetal u otra depende de otros factores externos que modifican el comportamiento espectral teórico, así es el caso de factores relacionados al relieve, ángulos de iluminación, variaciones ambientales, influencia atmosférica, condiciones fenológicas, características edáficas, entre otros (Chuvieco, 2008).

El ecosistema de estudio desde el punto de vista superficial es una cubierta de tipo vegetal en donde actividades antrópicas tales como la quema de cobertura podrían alterar su estructura y características en condiciones naturales.

Los índices de vegetación (IV) permiten discriminar el comportamiento reflectivo de la vegetación evaluándola de manera cualitativa y cuantitativa a través de los canales espectrales. Los IV disponibles son numerosos, existen varias comparaciones de los mismos que discuten su utilidad (Bannari et al., 1995). Con el fin de detectar un IV más adecuado para el Herbazal del Páramo, varios IV fueron evaluados. También, es posible usar índices espectrales para otras cubiertas del suelo como es el caso del suelo desnudo a través del *Bare Index* (Li & Chen, 2014) o lugares quemados (López & Caselles, 1991).

4.6. ÍNDICES Y VARIABLES TOPOGRÁFICAS

Los índices y variables topográficas permiten conocer distintas cualidades del suelo basados en su topografía. El ecosistema de estudio se encuentra en zonas alto andinas, el uso de variables topográficas en forma aislada como es el caso de la elevación, pendiente y orientación, así como en forma conjunta a través de índices; permiten caracterizar el suelo desde este punto de vista y buscar una posible relación con cantidad de COS.

4.6.1. PENDIENTE Y ORIENTACIÓN

Para cada punto del paisaje topográfico $\{X, Y\}$ la tasa de cambio de la elevación en las direcciones X, Y puede usarse para identificar la magnitud y la dirección del gradiente más inclinado del campo de elevación topográfica, $h(X, Y)$. La pendiente local S se define como la magnitud del gradiente mientras que el aspecto u orientación (α) es su dirección (Vico & Porporato, 2009).

4.6.2. FACTOR LS

El Factor LS describe el efecto de la topografía en la erosión del suelo; el factor L da el impacto de la longitud de la pendiente mientras que el factor S explica el efecto de la inclinación de la pendiente (Panagos et al., 2015), que es muy útil a la hora de explicar la erosión del suelo en topografías complejas (Desmet & Govers, 1996).

4.7. VARIABLES CLIMÁTICAS

La temperatura y la precipitación, son factores que determinan en alto grado a la distribución de la vegetación (MAE, 2012). El COS es cuantificado en función de la MO presente en los suelos (Van Bemmelen, 1891). A bajas temperaturas la actividad biológica se reduce,

disminuyendo la mineralización de la materia orgánica; esto permite la acumulación de COS en grandes cantidades.

El estudio observacional de las variables temperatura y precipitación se basa en mediciones de estaciones meteorológicas, distribuidas sobre y en torno de un territorio de interés a través de sensores de temperatura ambiente y sensores pluviométricos para el caso de la precipitación. La temperatura de la superficie terrestre puede ser estudiada a través de sensores térmicos en las plataformas satelitales como es el caso de Landsat 8 Sensor *Thermal Infrared Sensor (TIRS)* (Survey, 2016).

4.8. IMÁGENES SATELITALES LANDSAT 8

El satélite Landsat 8 de órbita helio-sincrónica a 705 km del ecuador terrestre incorpora dos instrumentos de barrido: *Operational Land Imager (OLI)* con 9 bandas que capturan el espectro visible, infrarrojos y espectros de radiación de ondas bajas y un sensor *Thermal Infrared Sensor (TIRS)* que detecta infrarrojos térmicos y es usado para medir la temperatura de la superficie de la Tierra. La resolución radiométrica de las imágenes Landsat 8 es de 16 bits, la resolución temporal es de 16 días y son imágenes de acceso libre, cuyas características se resumen en la Tabla 4.1. (Survey, 2016)

Tabla 4. 1. Descripción de las bandas de las imágenes Landsat 8, (Survey, 2016)

Sensor	# Banda	Resolución		Longitud de onda (µm)
		espacial	Banda	
OLI	Banda 1	30 m	Aerosol costero	0.435 - 0.451
	Banda 2	30 m	Azul	0.452 - 0.512
	Banda 3	30 m	Verde	0.533 - 0.590
	Banda 4	30 m	Rojo	0.636 - 0.673
	Banda 5	30 m	Infrarrojo Cercano (NIR)	0.851 - 0.879
	Banda 6	30 m	SWIR-1	1.566 - 1.651
	Banda 7	30 m	SWIR-2	2.107 - 2.294
	Banda 8	15 m	Pancromática	0.503 - 0.676
	Banda 9	30 m	Cirrus	1.363 - 1.384
TIRS	Banda 10	100 m	Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10.60 - 11.19
	Banda 11	100 m	Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11.50 - 12.51

4.9. RANDOM FOREST

Random Forest (RF), es un algoritmo de autoaprendizaje basado en la combinación de árboles de decisión. Cada árbol depende de los valores de un vector aleatorio muestreado en forma independiente y que tiene la misma distribución para todos los árboles del bosque. El error depende de la importancia de los árboles individuales y la correlación entre ellos. La predicción mediante RF busca obtener un valor cuantitativo como resultado de la predicción

(regresión), el predictor de árbol toma valores numéricos en lugar de etiquetas de clase y el conjunto de entrenamiento se extrae independientemente de la distribución del vector aleatorio. Una de las ventajas de RF es que es robusto ante la presencia de ruido, es decir la presencia de datos anómalos (Breiman, 2001).

4.9.1. ALGORITMO DE PREDICCIÓN DE RANDOM FOREST

El algoritmo de aprendizaje automático que emplea RF en regresiones tiene en su estructura árboles de clasificación y regresión (*Classification and Regression Trees-CART*) (Breiman et al., 2017). *CART*, es un algoritmo basado en árboles de decisión. En una regresión, *CART* escoge las mejores variables y los puntos de división para reducir el criterio de error cuadrático y absoluto. Las divisiones o particiones de las variables predictivas (x_1, x_2, \dots, x_n) generan regiones con las que la variable dependiente (Y) puede ser predicha con mayor precisión. En el presente estudio la variable (COS) es la variable dependiente.

Algoritmo de CART

A partir del conjunto de datos de entrenamiento compuesto de la variable dependiente (Y) y los predictores (X_1, X_2, \dots, X_n), se genera un árbol. Empieza en un nodo de inicio (*root node*), los nodos son las bases en donde se construyen los árboles de decisión. Los árboles de decisión pueden tener ramificaciones también conocidas como particiones (*Split* de la variable) y si no tienen ramificación son llamados nodos terminales. En la creación del árbol todas las variables son consideradas en la selección de cada *Split*. Cada *Split* se realiza en referencia a una sola variable y un valor o conjunto de valores. El *Split* usado es el que genera menor error en el modelo. El árbol crece hasta que no se puede volver a particionar o bajo especificación externa (del usuario). La Figura 4.3, muestra el proceso seguido para calcular el mejor *Split*.

En sí, en el proceso de creación del árbol todas las variables son consideradas en cada *Split*, pero cada quiebre se realiza usando una sola variable y un valor o conjunto de valores. El mejor quiebre se escoge cuando el modelo minimiza el error. El *software* internamente entonces, por predictor, ordena sus valores de manera ascendente, con ellos sus valores correspondientes a la variable dependiente (COS) y a su vez los demás predictores (X_1, X_2, \dots, X_n) del registro; luego, se busca el mejor *Split* basado en un ajuste por mínimos cuadrados. Cuando el proceso es realizado para todos los predictores, *CART* ha evaluado todos los posibles puntos de partición para cada variable predictiva y determinado el mejor *Split* de cada una; *CART* hace una comparación entre los mejores *Split* de cada posible predictor y elige el *Split* basado en el indicativo de la desviación estándar de cada opción.

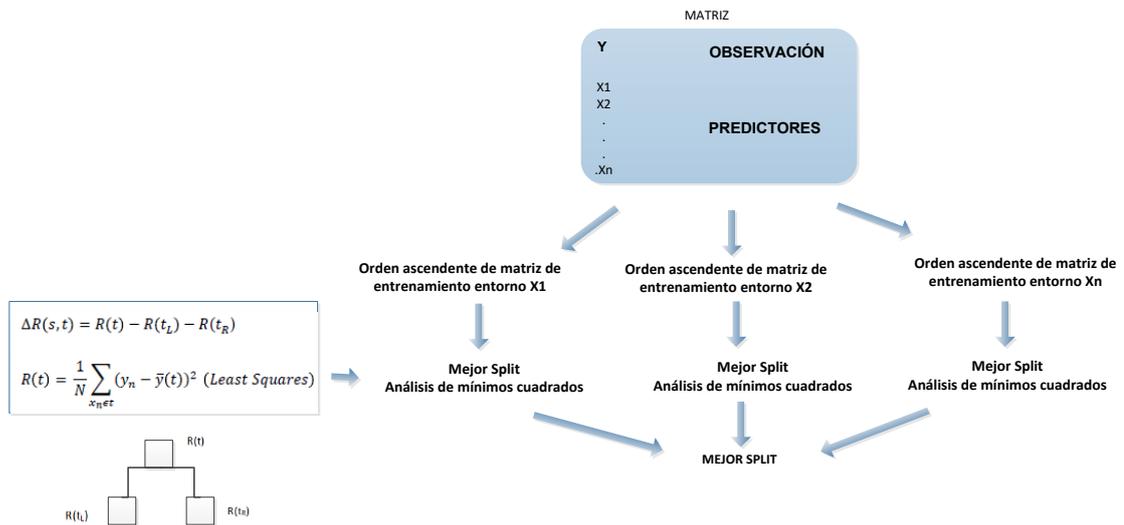


Figura 4. 3. Algoritmo de selección del mejor Split. (SALFOR SYSTEMS A MINITAB, 2017)

Algoritmo de regresión de Random Forest (RF)

El algoritmo ajusta múltiples árboles CART a muestras independientes *bootstrap* de datos y luego combina las predicciones. Un *bootstrap* es una muestra aleatoria con fines de reemplazo, se crea seleccionando de manera aleatoria un registro por vez de los datos originales y una observación puede ser elegida más de una ocasión; el proceso es realizado hasta completar la misma cantidad de registros de los datos originales.

En cada *bootstrap* se crea un árbol CART, y en cada partición del árbol se consideran solo K variables seleccionadas al azar en lugar de todas. El proceso es realizado M veces de acuerdo al número de *bootstrap* creados. Al final se tiene un registro de predicción por cada árbol, la predicción final es el resultado del promedio de M predicciones, ver Figura 4.4. El rendimiento del algoritmo depende de parámetros como K y M, configurados. De esta manera la predicción de *Random Forest* es un promedio de la predicción de los árboles CART creados en cada *bootstrap* (de 1 - M).

Es decir, cada uno de los registros de la matriz a predecir el valor de COS, son sometidos hacia abajo en cada árbol de decisión de los *bootstrap*, generando al final de su paso una predicción basada en el CART del *bootstrap* (1-M), luego las predicciones son promediadas generando una predicción de COS para la combinación de predictores dada por el usuario y que desde luego deben hacer referencia a los predictores del modelo hallado. (SALFOR SYSTEMS A MINITAB, 2017)

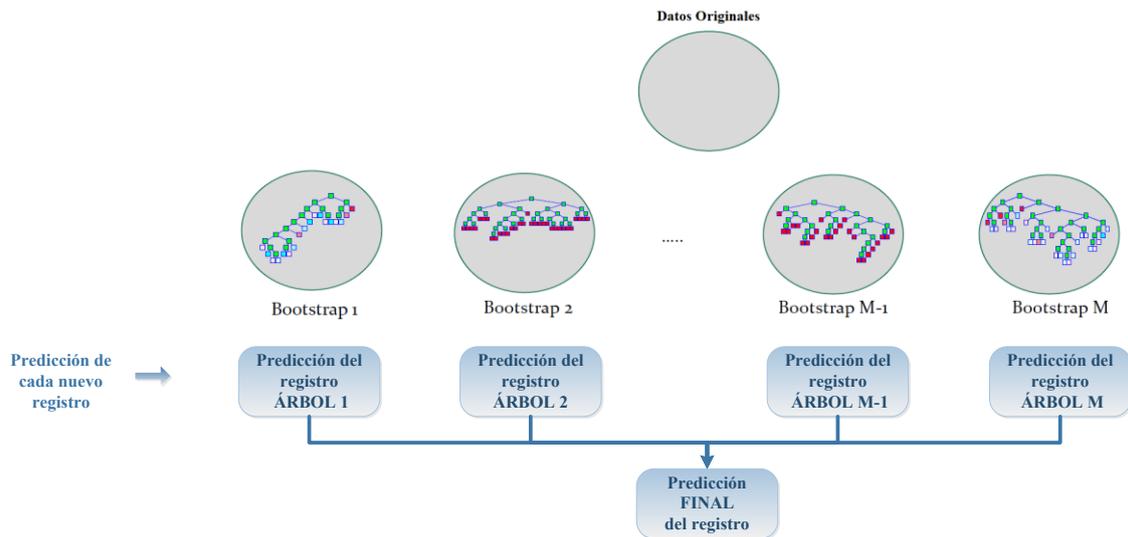


Figura 4. 4. Síntesis procedimental del algoritmo de regresión de RF. (SALFOR SYSTEMS A MINITAB, 2017)

5. MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación, se presenta el esquema general de los procedimientos, ver Figura 5.1, así como el flujograma de trabajo realizado basado en entrada, proceso y salida de datos e información, ver Figura 5.2; utilizados en la investigación para mapear de manera digital el COS en el ecosistema Herbazal del Páramo (HP) de la zona de estudio.



Figura 5. 1. Esquema general de procedimientos

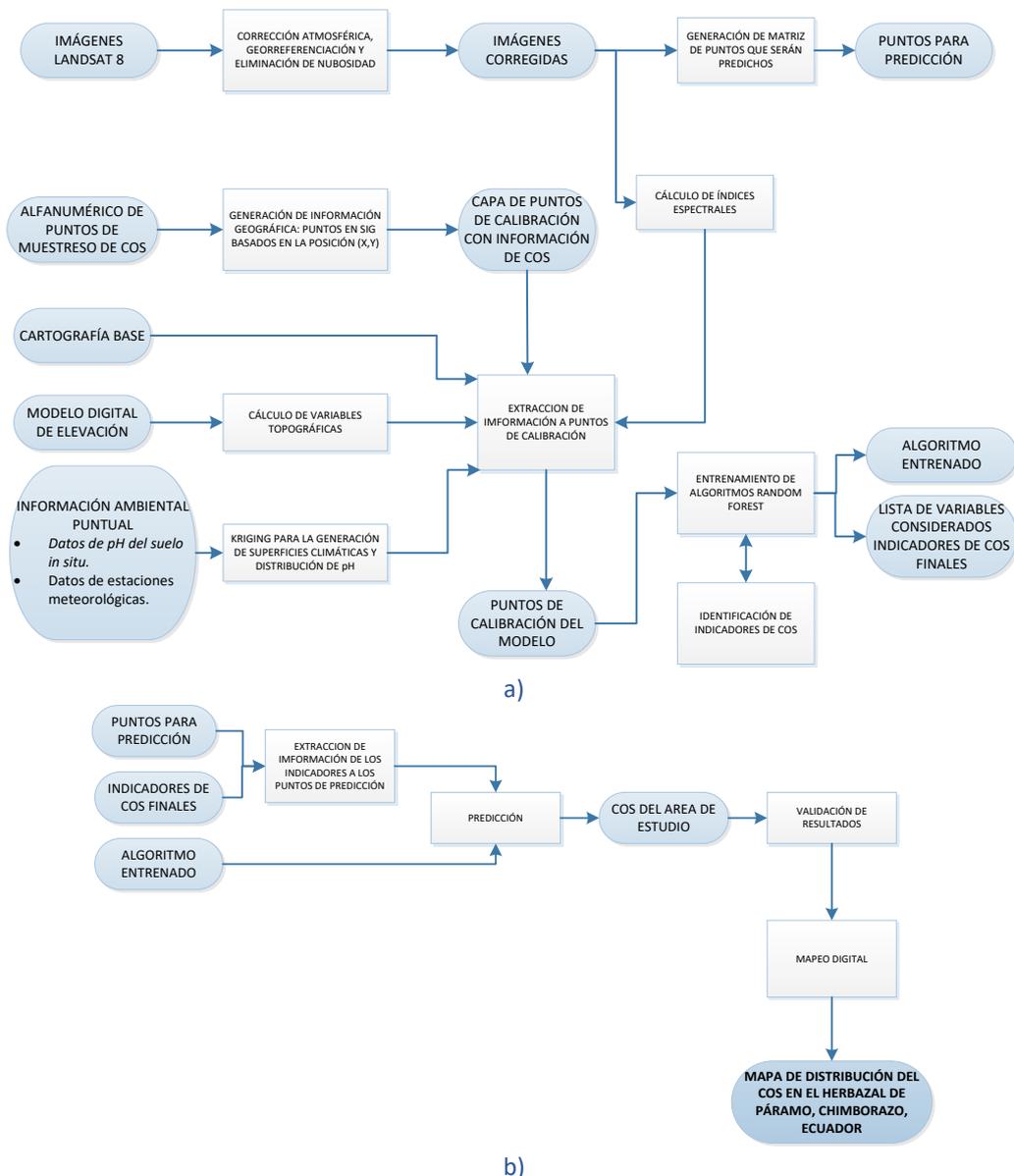


Figura 5. 2. Flujograma de trabajo: a) generación de insumos para la predicción y mapeo de COS; b) Predicción y mapeo de COS

5.1. DESCARGA Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES

5.1.1. DESCARGA DE IMÁGENES LANDSAT 8

Las imágenes multispectrales utilizadas corresponden al satélite Landsat 8, sensores OLI y TIRS. Para cubrir la zona de estudio fue necesario utilizar dos escenas definidas en el path, row (010, 061) y el path, row (010, 062) del sistema WRS-2 que usa Landsat para catalogar las escenas de los sensores en los satélites Landsat 4 al 8 (Survey, 2016). Aproximadamente el 75 % de la zona de estudio se localiza en escena superior path, row (010, 061). La descarga de las imágenes Landsat 8 fue realizada desde el servicio web *Global Visualization Viewer- GloVis* del Departamento Geológico de los Estados Unidos de Norte América- *USGS* (USGS, 2017) ver Figura 5.3, del año 2016, teniendo como precedente que los datos *in situ* de COS y pH corresponden a

dicho año. Adicional a ello, fue necesario seleccionar y descargar dos imágenes del año 2017 con fines de relleno en la escena path, row (010, 061), debido a que las condiciones atmosféricas propias de las zonas de páramo introducen grandes concentraciones de nubes en la escena, generando pérdida de información de interés. Las imágenes utilizadas en el estudio y sus características se resumen en la Tabla 5. 1.

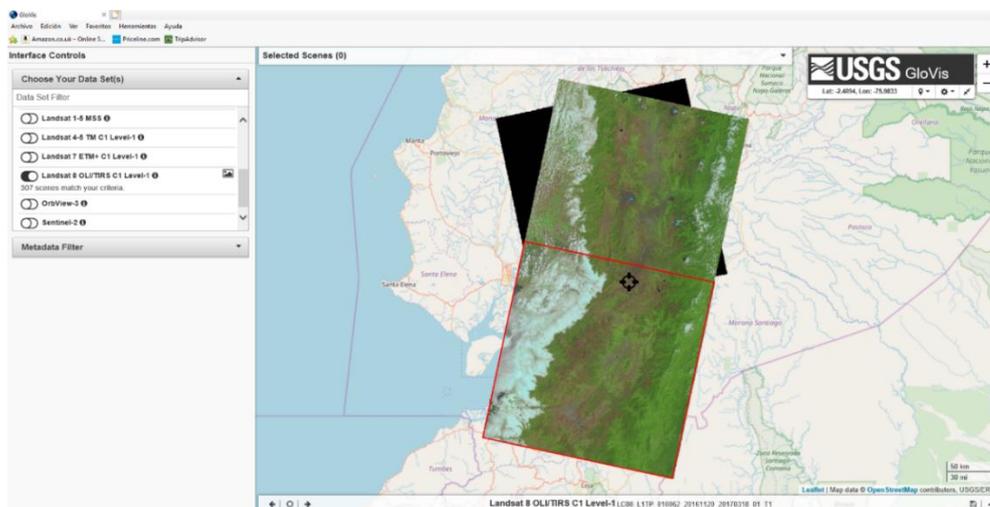


Figura 5. 3. Sitio web USGS GloVis, escenas de imágenes base descargadas

Tabla 5. 1. Imágenes Landsat 8 utilizadas

Id de la escena L8	Uso - path, row	Fecha de captura
LC80100612016325LGN01	Imagen base – 010, 061	2016/11/20
LC80100622016325LGN01	Imagen base – 010, 062	2016/11/20
LC80100612017263LGN00	Relleno - 010, 061	2017/09/20
LC80100612017023LGN01	Relleno - 010, 061	2017/01/23

Las imágenes descargadas en formato *GEOTIFF* poseen un nivel de pre-procesamiento L1T. Estas imágenes tienen una corrección sistemática radiométrica y geométrica mediante la incorporación de puntos de control *GPC's* (USGS-USA, 2018) y también orto-rectificación a través del Modelo Digital de Elevación-*MDE (SRTM)*. Se hizo una verificación mediante las cartas topográficas y cartografía base de ríos y vías, a escala 1:50,000, georreferenciadas en la proyección UTM Datum WGS84, del Instituto Geográfico Militar del Ecuador- IGM, (IGM, 2016), ver Figura 5.4.

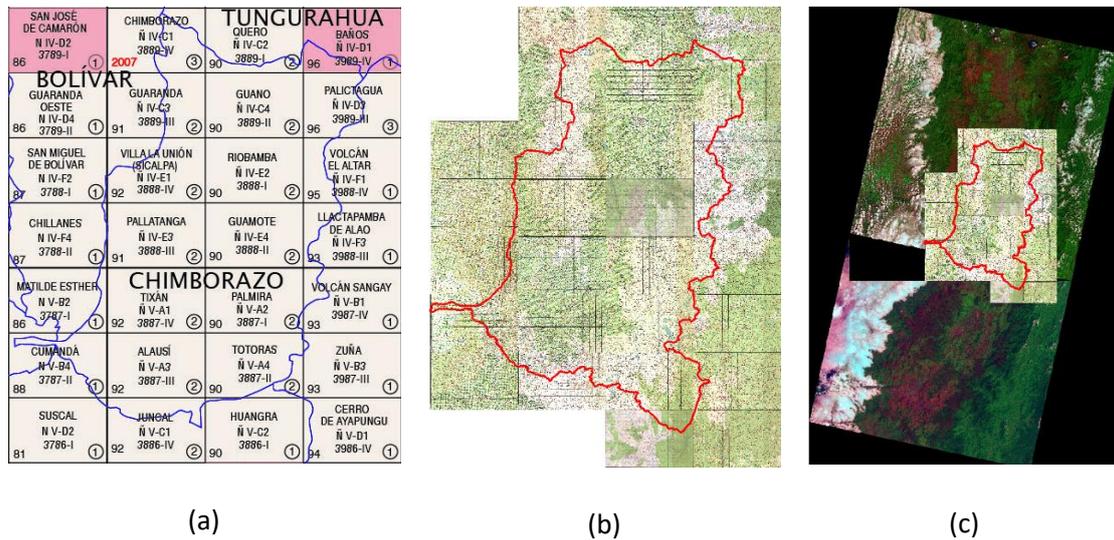


Figura 5. 4. (a) Codificación de las cartas topográficas del IGM, de la provincia de Chimborazo, (b) Cartas topográficas utilizadas, (c). Ubicación de las catas topográficas con respecto las escenas que cubren la zona de estudio.

5.1.2. CORRECCIÓN RADIOMÉTRICA

Las imágenes satelitales poseen un escalado de la radiancia, almacenada mediante una representación discreta de números digitales (ND). Esta es una escala artificial definida por las características específicas de cada sensor (Aguilar Arias et al., 2014) y para el caso de los sensores de Landsat 8 es de 16 bits (Survey, 2016). Dichos ND deben ser pasado a unidades físicas como la radiancia y reflectancia. Ya que los ND son proporcionales a la radiancia de la señal percibida en el sensor, es posible su recuperación en las escenas. La calibración radiométrica consiste en convertir los ND a valores de radiancia (L) al tope de la atmósfera (TOA) y para ello se usó el *software ENVI.5.1* (Harris Geoespacial Solutions, 2014), herramienta *Radiometric Calibration*, ver Figura 5.5. Se usa la codificación de imagen BIL, que toma la información de filas y columnas en la imagen y almacena todos los valores de la primera fila de la imagen para la banda 1, luego lo repite para la banda 2, hasta la banda final.

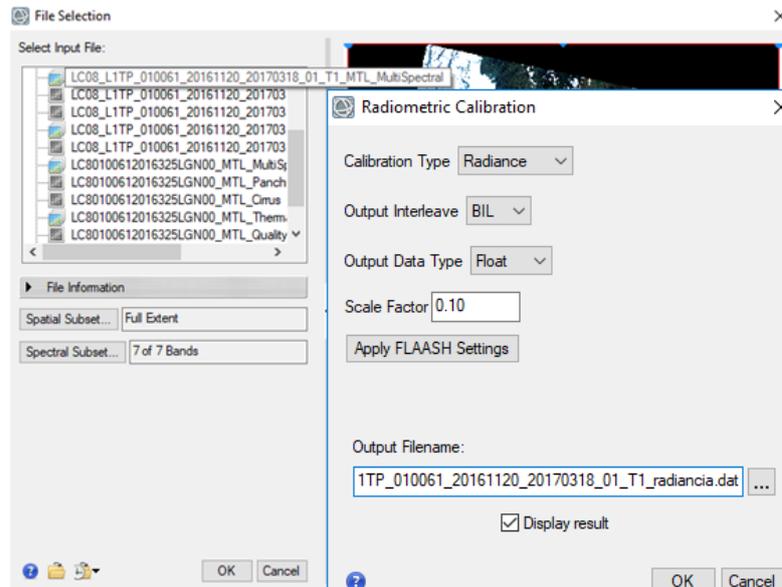


Figura 5. 5. Configuración de la herramienta Radiometric Calibration utilizada

Los valores de radiancia son convertidos a valores de reflectancia al tope de la atmósfera (TOA) por medio la herramienta *FLAASH Atmospheric Correction*, ver Figura 5.6. Para hacer una remoción de la dispersión atmosférica el modelo se compone de dos factores que son la radiancia reflejada por la cubierta o superficie terrestre hasta el sensor y la radiancia que resulta dispersa por la atmósfera antes de llegar al sensor; para el caso de la radiancia reflejada el modelo utiliza el valor medio de altura sobre el suelo obtenido mediante el MDE, altura del sensor sobre el nivel del mar y la información de la fecha de captura, obtenidos de los metadatos de la imagen. Para el caso del factor por radiación dispersa, es necesario conocer la cantidad de vapor de agua existente en la atmósfera: *FLAASH* cuenta con las aproximaciones de acuerdo a latitudes y épocas de captura de las imágenes, usándose el modelo de invierno por las condiciones frías de los páramos.

Se realiza también la compensación de las distorsiones por aerosoles y partículas atmosféricas que producen deformaciones heterogéneas en la imagen y que se asocian a las fuentes de influencia presentes en la superficie. Ya que no hay fuerte influencia urbana e industrial para el caso de la zona de estudio se aplica el modelo de aerosol rural. Este modelo recupera la cantidad estimada de aerosol / neblina de los píxeles terrestres oscuros seleccionados en la escena (Exelis Visual Information Solutions, 2013).

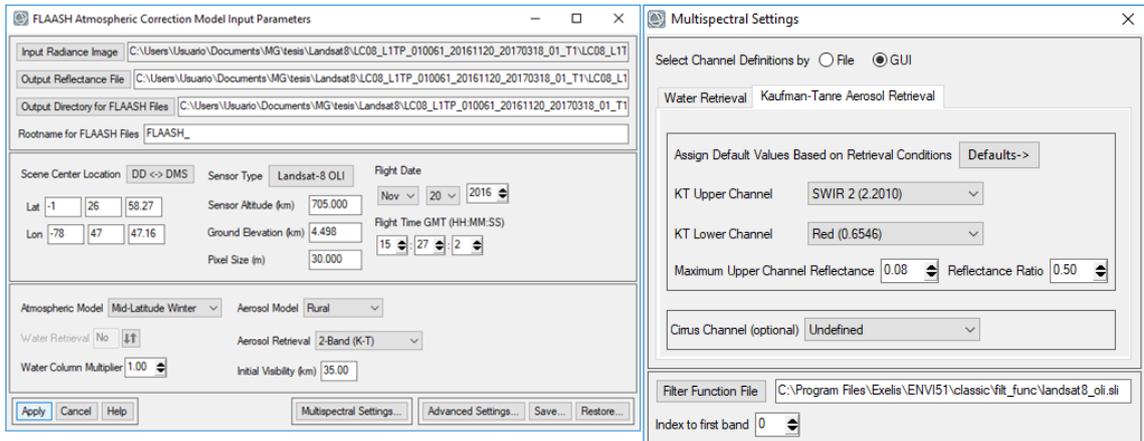


Figura 5. 6. Configuración del módulo FAASH Atmospheric Correction ENVI 5.1

Los valores de reflectancia en las imágenes resultantes poseen valores entre 0 y 10,000, por lo que son rescaldados a un rango entre 0 y 1 mediante la Ec:5.1, obteniendo escenas con reflectancias TOA como se muestra en la Figura 5.7.

$$banda = (b le 0) * 0 + (b1 ge 10000) * 1 + (b1 gt 0 \text{ and } b1 lt 10000) * \text{float}(b1)/10000 \quad Ec: 5.1$$

Donde:

le: menor o igual

ge: mayor o igual

gt: mayor que

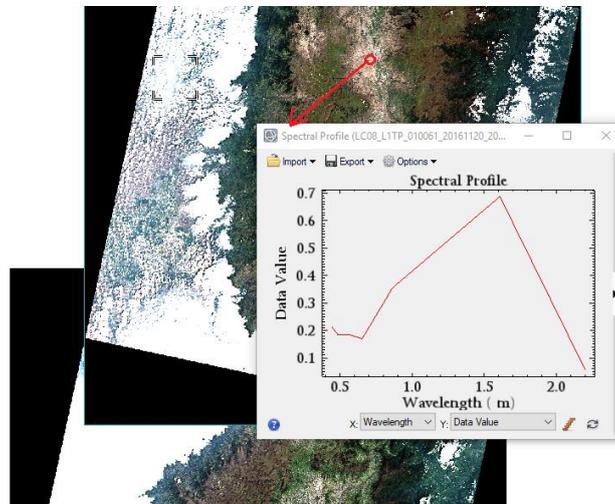


Figura 5. 7. Resultado de la corrección radiométrica, firma espectral en uno de los píxeles de la escena superior

5.1.3. ENMASCARAMIENTO Y VALIDACIÓN DE PÍXELES

Las zonas montañosas por sus condición climática y atmosférica son las superficies en las cuales la captura de imágenes satelitales se ve muy intervenida por la presencia de nubes. El análisis del histograma de las imágenes permitió encontrar concentraciones de nubes, dentro del ecosistema Herbazal del Páramo, en la escena norte.

La banda *Quality Assessment* (QA) es una banda de 16 bits, de igual dimensión a las bandas del producto L1T. Denominada banda de control de calidad, tiene en cada píxel un valor decimal que representa las combinaciones de bits de relleno de la superficie, la atmósfera y las condiciones de sensores que pueden afectar a la utilidad general de un píxel (Survey, 2016). Estos valores pueden ser utilizados con eficacia para mejorar la integridad del análisis, ya que suministra información sobre cuáles de los píxeles pueden verse afectados por las coberturas nubosas: los niveles claros son susceptibles o afectados por nubosidad, ver Figura 5.8. Se procedió a discriminar el rango de traducción decimal de las cadenas binarias presentes en la banda QA bajo el cual cada una de las escenas presenta problemas de calidad por concepto de nubes. Como resultado es posible generar una máscara de nubes basado en el valor decimal en el histograma en donde se encuentran pixeles afectados. Para este caso fue el rango >2750 , fuera de ello, los pixeles no tienen problemas de nubosidad. Se genera en ENVI 5.1, herramienta *Apply Mask* la máscara para los pixeles validados en las imágenes tanto de referencia como de relleno.

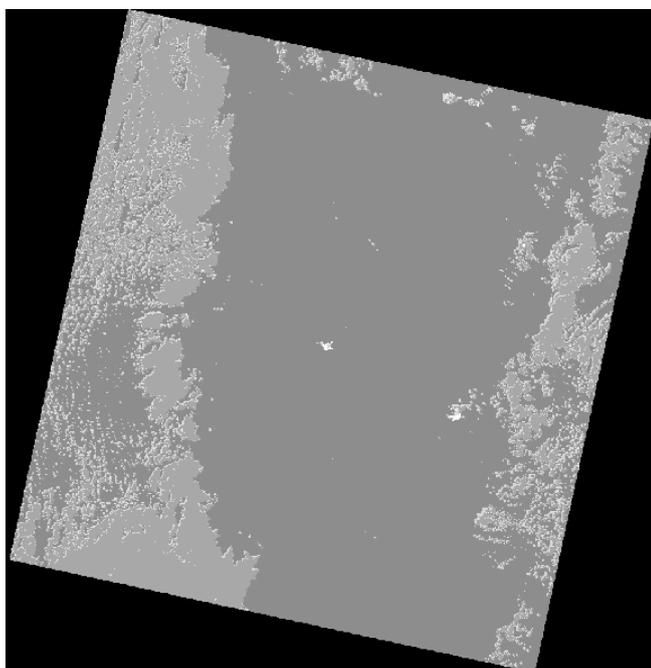


Figura 5. 8. Banda QA de la escena Norte path, row 010, 061.

5.1.4. MOSAICO DE LAS ESCENAS

Las escenas Norte y Sur (path, row: 010, 061; path, row: 010, 062), son acopladas con el fin de obtener una sola imagen completa que cubra la zona de estudio. Se utilizó la herramienta Seamless Mosaic de ENVI 5.1, generando el mosaico de las escenas. La escena norte es tomada como referencia o base sobre la que se ajusta la escena sur. Del mismo modo, se genera un mosaico a partir de las máscaras generadas en las escenas Norte y Sur en ENVI por medio de la banda QA, ver Figura 5.9.

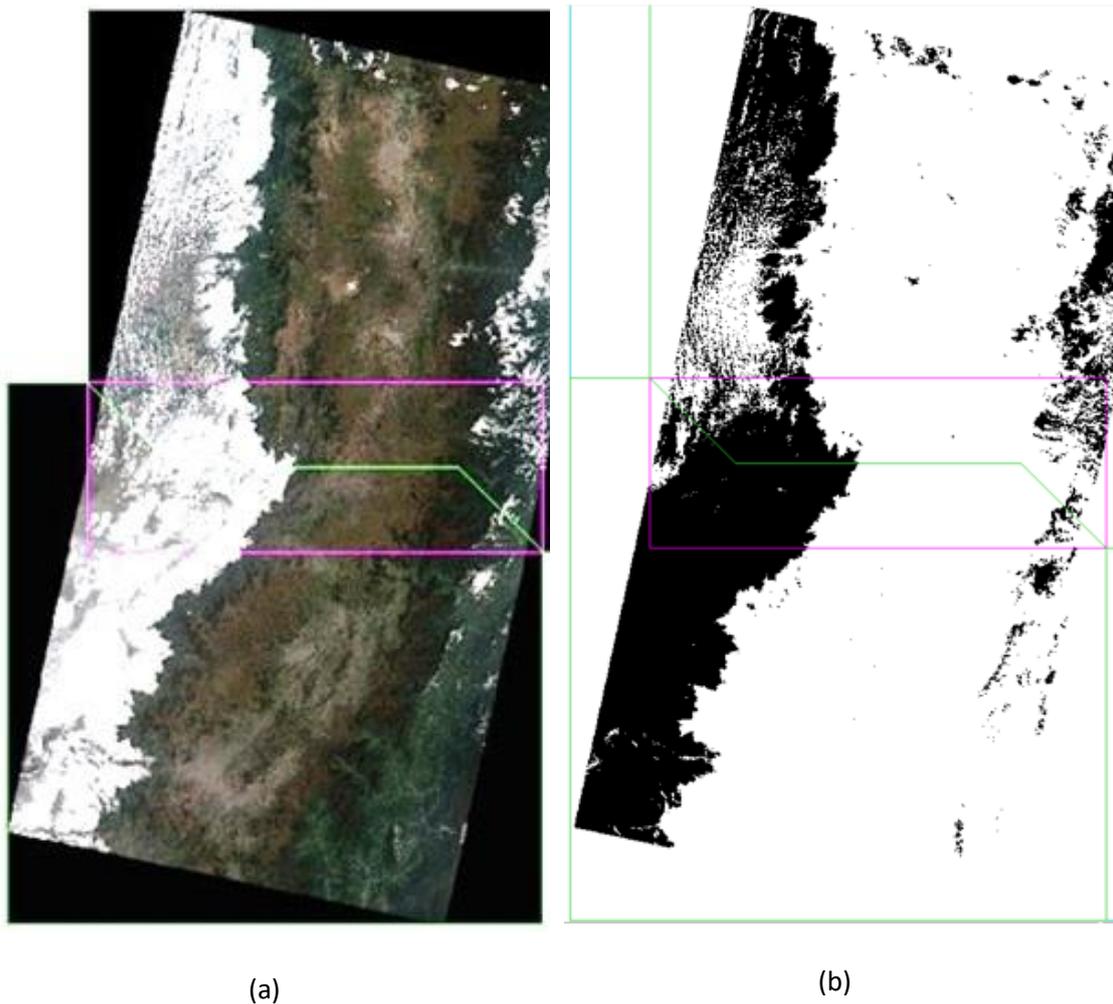


Figura 5. 9. (a) Acople de las escenas N y S para mosaico; (b) Acople de las máscaras de píxeles validados de zona N y S para mosaico.

5.1.5. EXTRACCIÓN DE NUBOSIDAD Y RELLENO DE IMAGENES

El proceso de extracción de nubosidad fue realizado con la aplicación *ModelBuilder* en el software *ArcGis 10.2* (ESRI, 2013), ver Figura 5.10. A través de la herramienta *Extract by mask*, se extrae la información sin nubes en el mosaico obtenido con las imágenes a través del mosaico

de las máscaras de píxeles validados por la banda QA. Se hizo también un recorte de la provincia Chimborazo. Los píxeles no validados ubicados en ecosistema Herbazal del Páramo de la provincia de Chimborazo, son rellenados a través de las escenas LC80100612017263LGN00 y LC80100612017023LGN01, ver Figura 5.11. El relleno fue realizado en ENVI bajo la herramienta *Seamless Mosaic*, ver Figura 5.11 y Figura 5.12. A la salida se tiene la imagen en formato .TIFF, lista para los procesos de reclasificación y cálculos de índices espectrales de interés en el HP, ver Figura 5.13.



Figura 5. 10. Modelado cartográfico utilizado, en el mosaico de referencia y las imágenes de relleno. Aplicación ModelBuilder- ArcGis 10.2

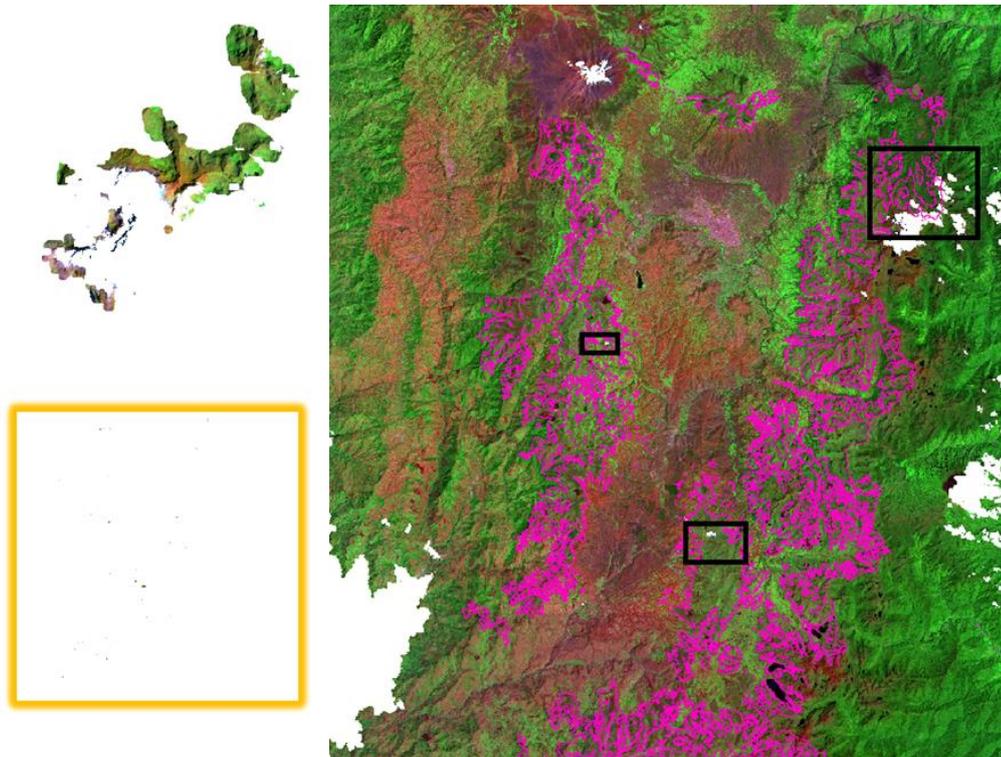


Figura 5. 11. A la izquierda pixeles de relleno. A la derecha, mosaico de referencia con vacíos de información por concepto de extracción por nubosidad.

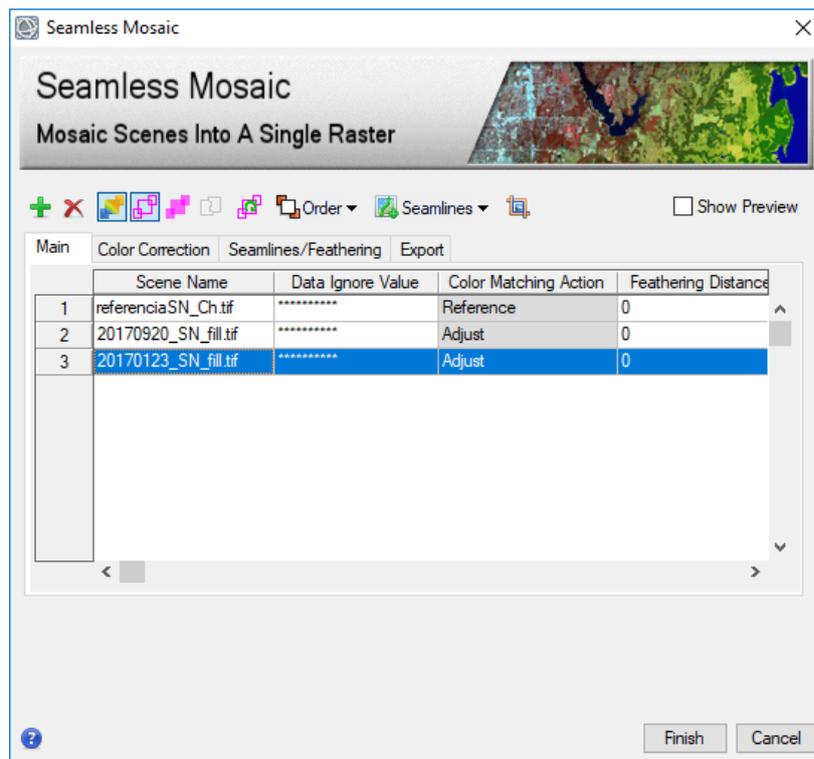


Figura 5. 12. Configuración del relleno. Mosaico de referencia es la imagen a rellenar y las imágenes para el relleno son de ajuste

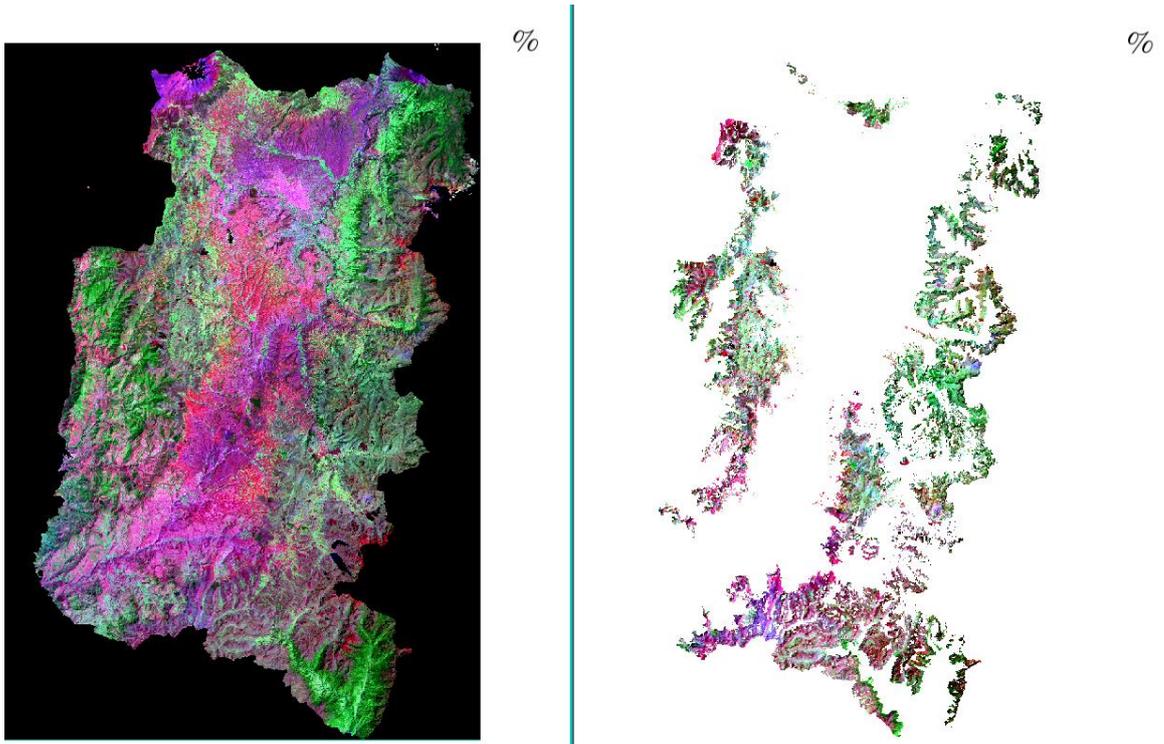


Figura 5. 13. Combinación falso color (7,5,3). En el lado izquierdo, la imagen satelital corregida de la provincia de Chimborazo (el sector Oeste del cantón Cumandá no es considerado por encontrarse fuera de la zona del estudio); del lado derecho se presenta la imagen cortada con la zona objetivo del estudio, ecosistema Herbazal del Páramo de Chimborazo.

5.1.6. CÁLCULO DE ÍNDICES ESPECTRALES

Sensor Operational Land Imager (OLI)

Conforme lo expuesto en el capítulo anterior, se calcularon los índices espectrales que más adelante serán puestos en evaluación por su capacidad indicadora como variables que controlan el almacenamiento de COS. Se utilizó el álgebra de bandas a través de la herramienta *Math Band*, de ENVI, para generar los índices detallados en la Tabla 5.2 de acuerdo a su correspondiente banda de Landsat 8. El suelo y el medio ambiente se encuentran relacionados a la hora de comprender los procesos biológicos, químicos y físicos que rigen las funciones de los suelos (Minasny et al., 2014). Desde este punto de vista este estudio ha contemplado índices espectrales que realcen características superficiales como tipo de cubierta vegetal, tipos de suelo, humedad, y así evaluar su covariabilidad con el almacenaje de COS. Por ejemplo, el índice *BI Bare Index* (Chen et al., 2004), es capaz de identificar superficies de suelo desnudo, en ambientes de baja intervención antrópica; éste tipo de suelo podría aportar información relevante sobre la cantidad de COS bajo del mismo ver Figura 5.14. En el anexo B se presentan los mapas de todos los índices generados según Tabla 5.2.

Tabla 5. 2. Índices espectrales calculados y su expresión de acuerdo a las bandas de Landsat 8

EXPRESIÓN MATEMÁTICA EN FUNCIÓN DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	EXPRESIÓN MATEMÁTICA EN FUNCIÓN DE LAS BANDAS DE LANDSAT 8
$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$	$NDVI = \frac{B5 - B4}{B5 + B4}$
$SAVI = \frac{NIR - R}{NIR + R + L} (1 + L) \quad L = 0.15$	$SAVI = \frac{B5 - B4}{B5 + B4 + 0.15} (1 + 0.15)$
$WDRVI = \frac{aNIR - R}{aNIR + R} \quad a = 0.05$	$WDRVI = \frac{0.05 B5 - B4}{0.05B5 + B4}$
$EVI2 = 2.5 \frac{NIR - R}{NIR + (2.4)R + 1}$	$EVI2 = 2.5 \frac{B5 - B4}{B5 + (2.4)B4 + 1}$
$NDWI = \frac{G - NIR}{G + NIR}$	$NDWI = \frac{B3 - B5}{B3 + B5}$
$VARI_G = \frac{G - R}{G + R}$	$VARI_G = \frac{B3 - B4}{B3 + B4}$
$NDSI = \frac{SWIR1 - NIR}{SWIR1 + NIR}$	$NDSI = \frac{B6 - B5}{B6 + B5}$
$BI = \frac{(SWIR1 + R) - (NIR + B)}{(SWIR1 + R) + (NIR + B)}$	$BI = \frac{(B6 + B4) - (B5 + B2)}{(B6 + B4) - (B5 + B2)}$
$NDMI = \frac{NIR - SWIR1}{NIR + SWIR1}$	$NDMI = \frac{B5 - B6}{B5 + B6}$
$NBR = \frac{NIR - SWIR2}{NIR + SWIR2}$	$NBR = \frac{B5 - B7}{B5 + B7}$
$NBR2 = \frac{SWIR1 - SWIR2}{SWIR1 + SWIR2}$	$NBR2 = \frac{B6 - B7}{B6 + B7}$

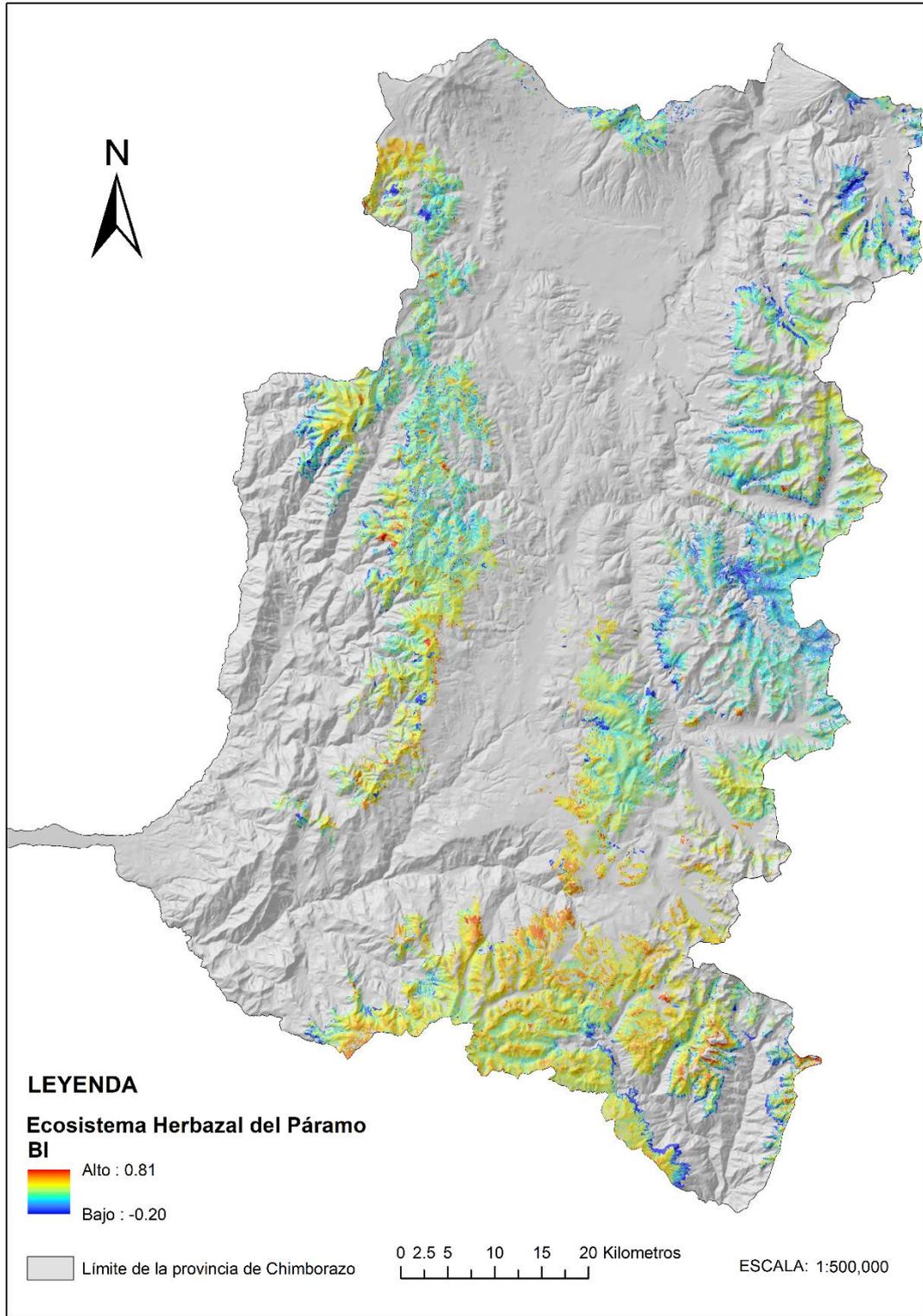


Figura 5. 14. Índice de suelo desnudo-BI

Sensor *Thermal Infrared Sensor (TIRS)*

La temperatura del brillo de la superficie terrestre (T) *TOA Brightness Temperature*, puede ser calculada mediante los datos del sensor TIRS. Al igual que con *OLI*, es posible convertir la radiancia a temperatura del brillo superficial, Ec: 5.2, (Survey, 2016). El cálculo de T se hizo mediante el *software ENVI 5.1* (Harris Geoespacial Solutions, 2014), herramienta *Math Band*. El proceso es realizado en las bandas 10 y 11 correspondientes al sensor *TIRS* de *Landsat 8*; la temperatura resultante en grados Kelvin T (°K) es convertida a su valor correspondiente en grados Celsius T (°C) y la composición de las bandas se hizo con la herramienta *Cell Statistics* aplicado el valor medio. Así como en el caso de *OLI*, también se hizo el mosaico para unificar las escenas, ver Figura 5.15. Como resultado se obtiene el mapa de temperatura del brillo superficial T (°C), ver Figura 5.16, teniendo una media de T de 21 °C.

$$T = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L_\lambda}\right) + 1} \quad \text{Ec: 5.2}$$

Donde:

T= temperatura del brillo de la superficie terrestre (*TOA Brightness Temperature*) [°K]

L_λ = radiancia espectral [Watts/(m² * sr * μm)]

K1 =constante de conversión termal (K1_CONSTANT_BAND_n de los metadatos de la imagen)

K2 =constante de conversión termal (K2_CONSTANT_BAND_n de los metadatos de la imagen)

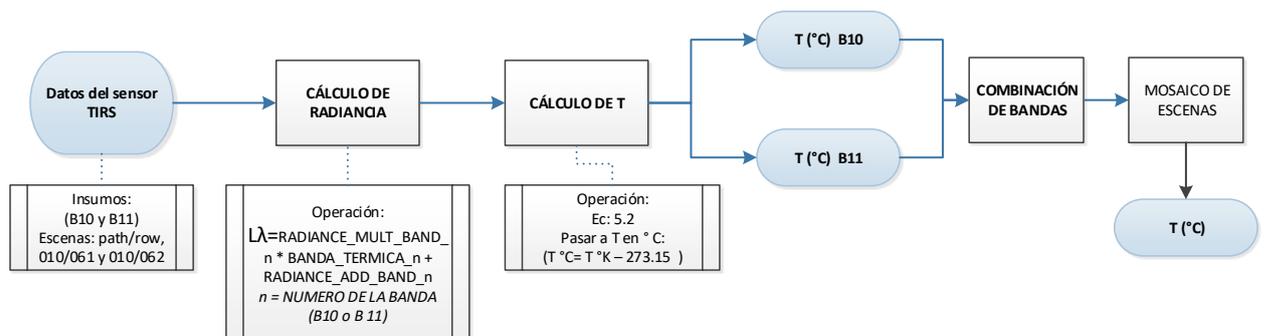


Figura 5. 15. Esquema procedimental del cálculo de T

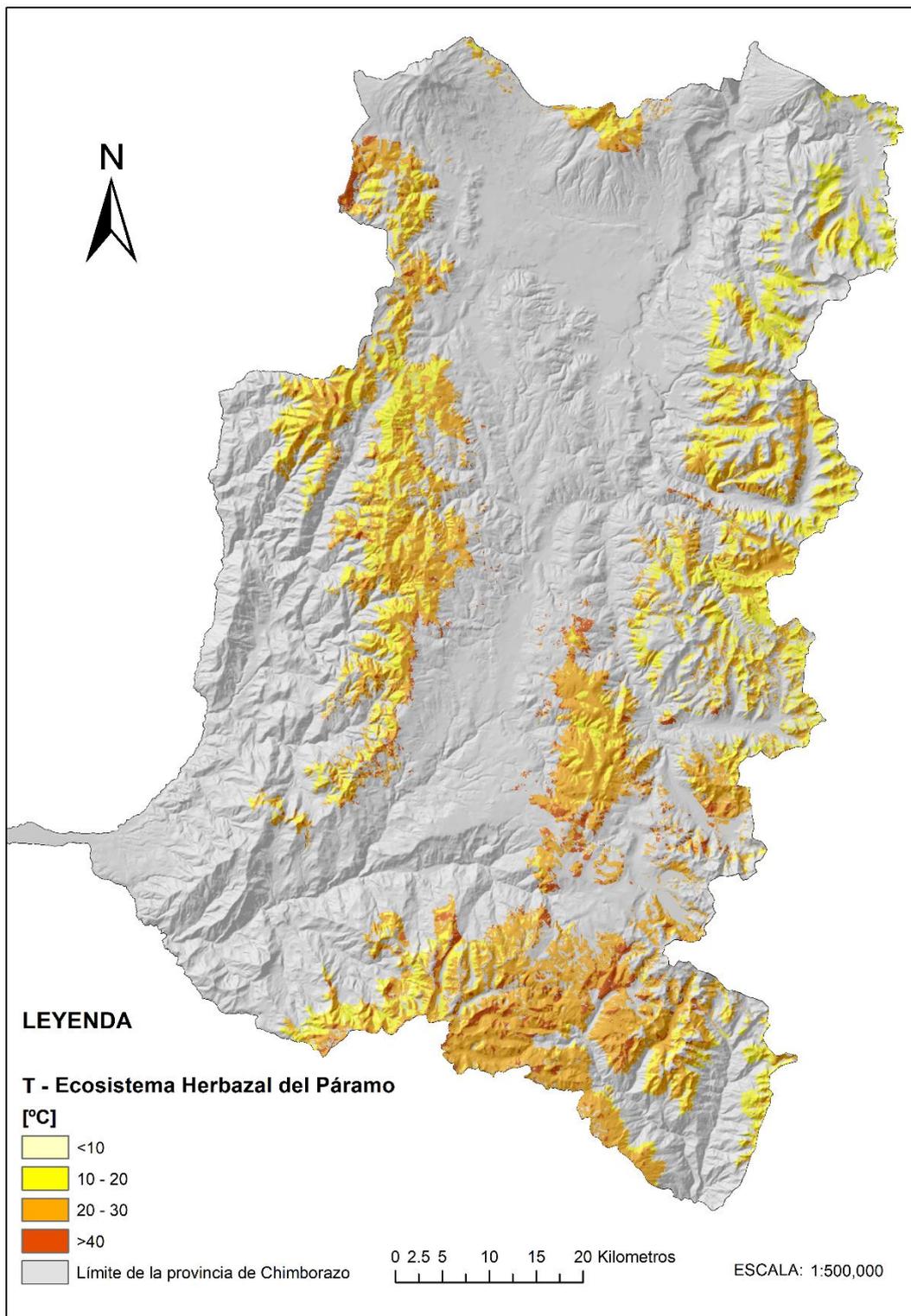


Figura 5. 16. Mapa de T en el Ecosistema Herbazal del Páramo

5.2. GENERACIÓN DE VARIABLES TOPOGRÁFICAS

Factor topográfico LS

El Modelo Digital de Elevación (MDE) y el factor LS determinan la resolución espacial de los resultados del modelo de erosión del suelo e incorporan el potencial de erosión del suelo debido a la escorrentía superficial. El factor L da el impacto de la longitud de la pendiente mientras que el factor S explica el efecto de la inclinación de la pendiente. El factor LS es adimensional, con valores iguales o mayores a 0 (Panagos et al., 2015) y es apropiado para modelar la erosión del paisaje abarcando topografías complejas (Desmet & Govers, 1996). El procedimiento fue realizado en el *software ArcGis 10.2* (ESRI, 2013), según el esquema procedimental expuesto en la Figura 5.17, los resultados se muestran en la Figura 5.18.

$$\text{Factor } LS = L * S \quad \text{Ec: 5.3}$$

Factor L

$$\beta = \frac{\frac{\sin \theta}{0.0896}}{3 \sin \theta^{0.8} + 0.56} \quad \text{Ec: 5.4}$$

$$m = \frac{\beta}{\beta + 1} \quad \text{Ec: 5.5}$$

$$L = \frac{[A_{i,j} + D]^{(m+1)} - A_{i,j}^{(m+1)}}{x^m D^{m+2} (22.13)^m} \quad \text{Ec: 5.6}$$

(Desmet & Govers, 1996)

Donde:

A= área de acumulación [m²]

D= longitud del lado del tamaño del pixel [m]

X= coeficiente de forma

m= entre 0 y 1 (Mccool et al., 1987)

Θ= ángulo de la pendiente

β= tasa de erosión (por surcos a laminar)

Factor S

$$S = 10.8 \sin \theta + 0.03, \quad \text{si } \text{tg } \theta < 0.09 \quad \text{Ec: 5.7}$$

$$S = 16.8 \sin \theta - 0.05, \quad \text{si } \text{tg } \theta \geq 0.09 \quad \text{Ec: 5.8}$$

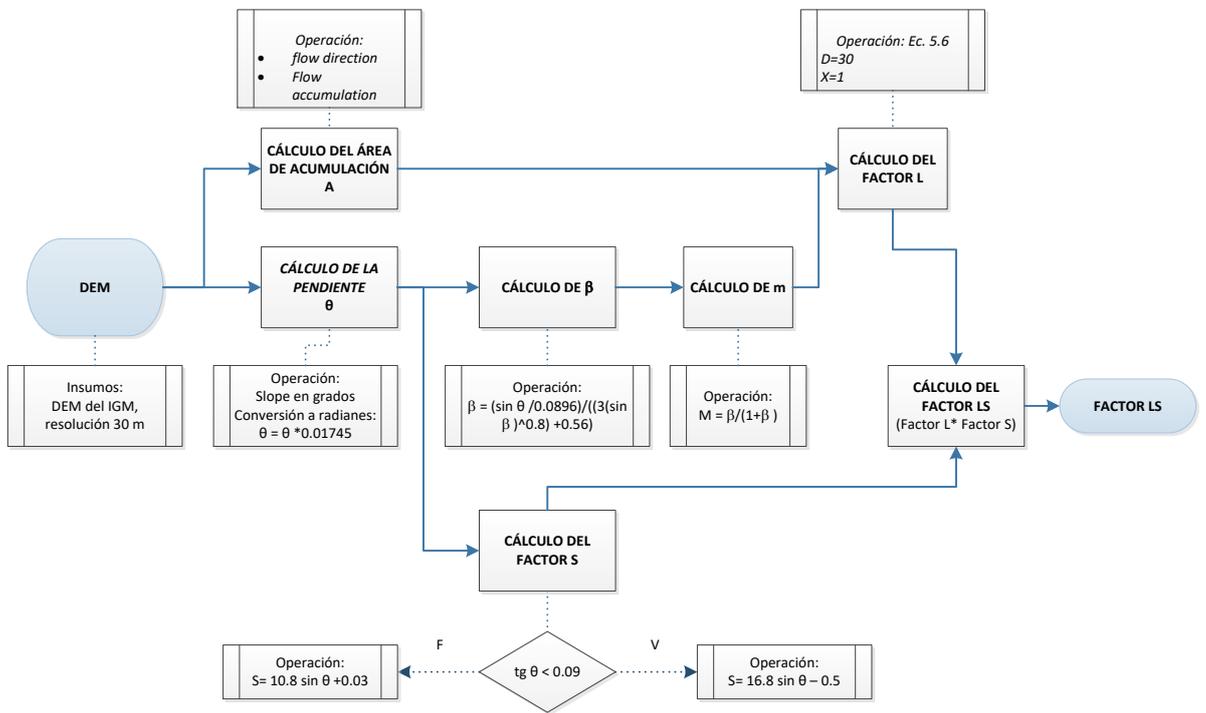


Figura 5. 17. Esquema procedimental del cálculo del Factor LS

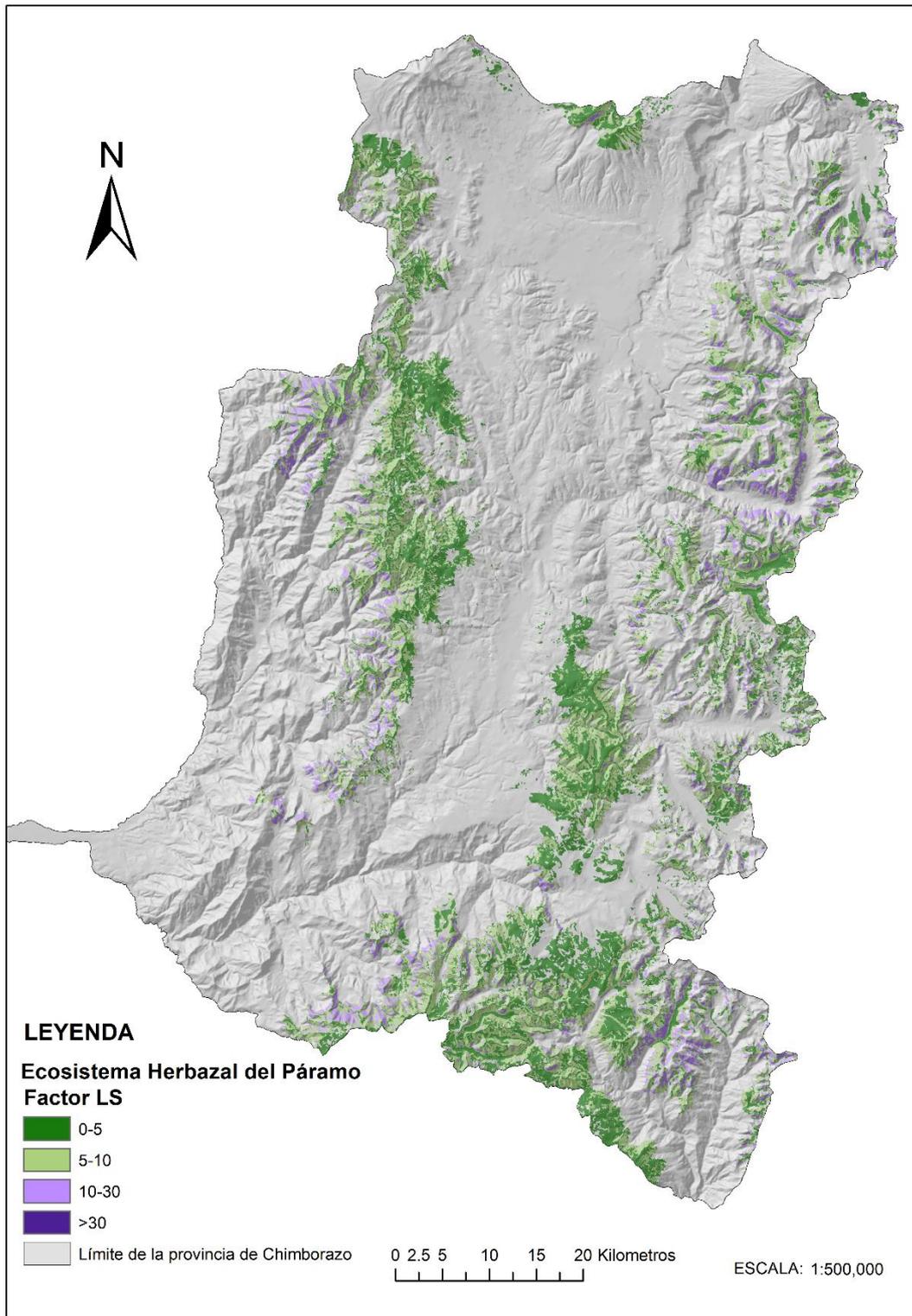


Figura 5. 18. Mapa del Factor LS del Ecosistema Herbazal del Páramo

Pendiente y orientación

La pendiente es la magnitud de la tasa máxima de cambio en el valor de z para cada celda de la superficie ráster y es calculada en grados, el rango de la pendiente está entre 0° y 90° , obtenida a partir del MDE de 30 m de resolución, con la herramienta *Slope* de *ArcGis*. La

orientación es calculada mediante la herramienta *Aspect* de *ArcGis* y resulta de la máxima tasa de cambio en z de cada celda de superficie ráster, medido desde el norte en dirección de las manecillas del reloj expresándose en grados de 0° a 360°. Como resultado se obtienen las variables en datos ráster simple.

5.3. ESTIMACIÓN DE SUPERFICIES MEDIANTE KRIGING

5.3.1. SUPERFICIES CLIMÁTICAS

La cartografía base no cuenta con superficies climáticas de temperatura y precipitación; se disponen de isoyetas e isotermas del año 2011 pero éstas resultan muy antiguas para el estudio considerando que la información de COS y demás variables son del año 2016. En este caso la disposición de información del año 2016 no fue completa, por lo que se utilizaron datos del 2015. Por tal motivo, la estimación de las superficies climáticas tanto de temperatura como precipitación, se hizo a través un análisis geoestadístico con el método *kriging* con el fin de realizar la interpolación de mediciones generadas en las estaciones meteorológicas ubicadas dentro y en los alrededores de la provincia de Chimborazo, ver Figura 5.19. Las estaciones meteorológicas pertenecen al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI), y 3 estaciones de la UNACH ubicadas al Sureste de la provincia de Chimborazo. En el Anexo C se detallan las estaciones utilizadas mediante su código de identificación a nivel nacional.

Ya que los archivos del INAMHI corresponden a datos alfanuméricos en formato *.txt (text file)* y las coordenadas de ubicación de las estaciones es recibida en coordenadas geográficas *GCS (Geographic Coordinate System)*, se hizo una conversión de formato de entrada de datos a vectorial de estructura *shapefile* de puntos. También se proyectó al sistema de coordenadas planas utilizada en el estudio (*WGS_1984_UTM_Zone_17S*). Las superficies climáticas son estimadas mediante el módulo de *ArcGis 10.2 Geo statistical Analyst*, se realizó un Krigeado ordinario con ajuste del semivariograma analizando la continuidad y variabilidad de los datos, tanto de temperatura como de precipitación. Como resultado se obtienen las superficies estimadas de temperatura y precipitación en formato ráster de la zona de estudio. Para el uso a posteriori se reclasificó a las superficies en rangos de 2° y para el caso de la precipitación en rangos de 250 mm, ver Figura 5.20.

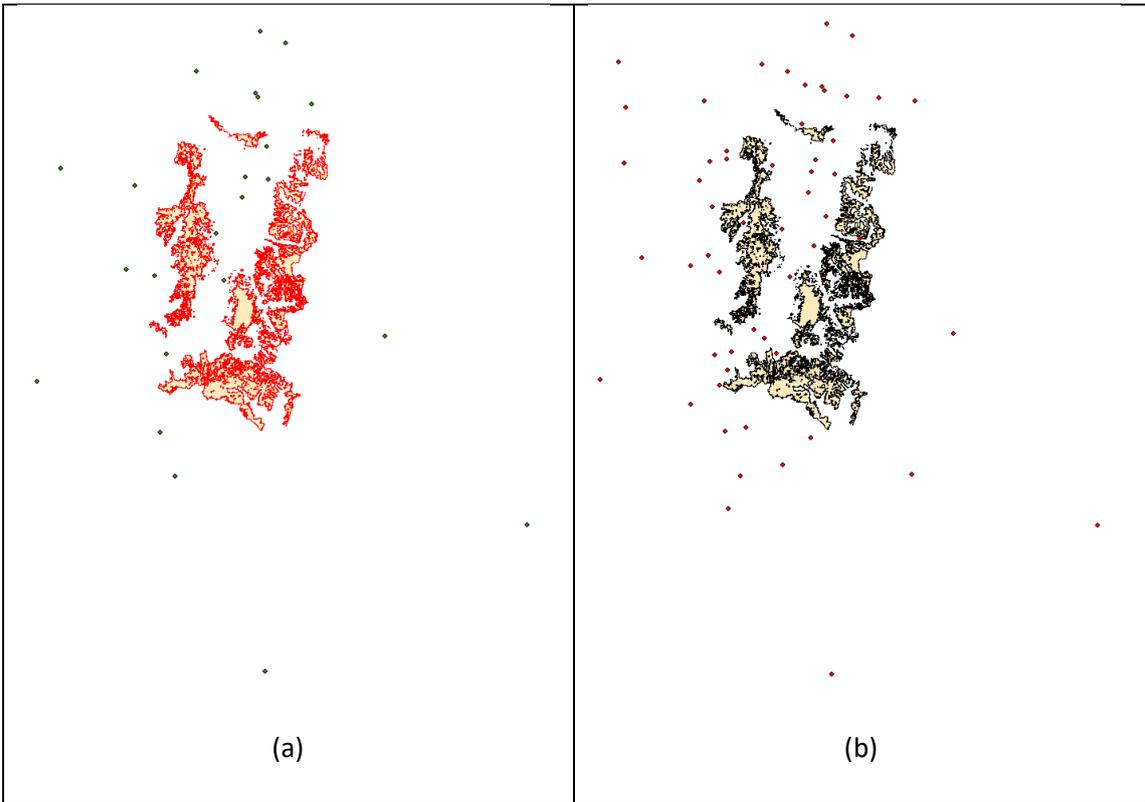


Figura 5. 19. (a) Ubicación de las estaciones meteorológicas con datos de temperatura respecto al ecosistema de estudio. (b) Ubicación de las estaciones con mediciones pluviométricas respecto al ecosistema de estudio.

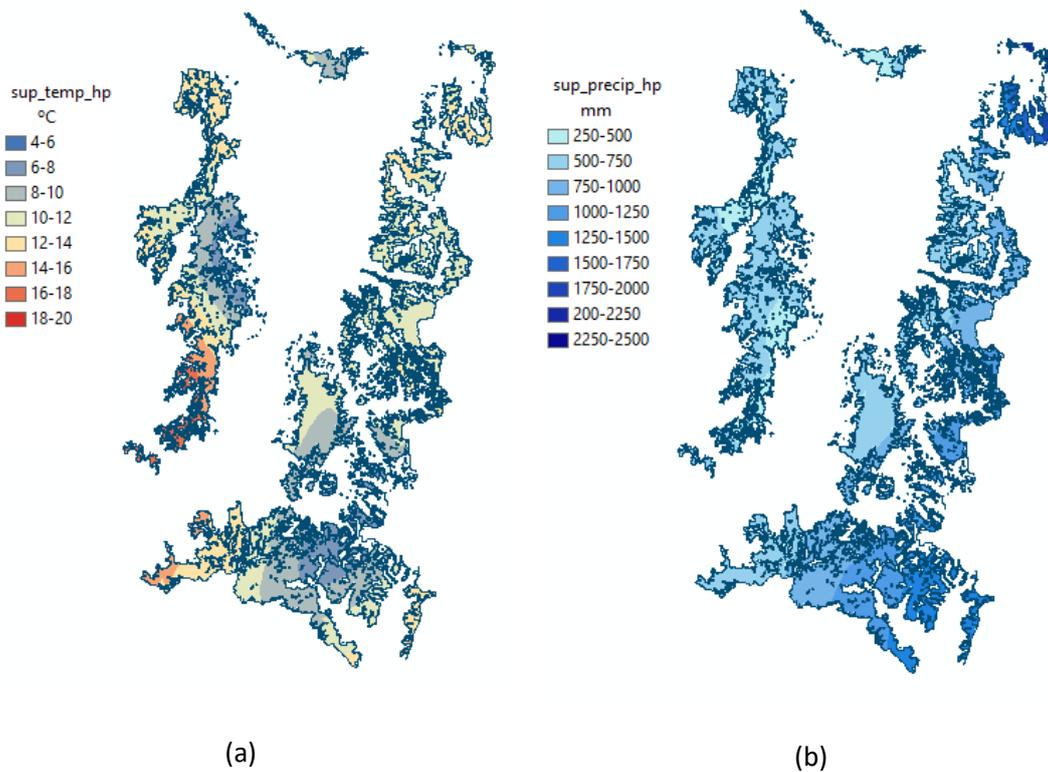


Figura 5. 20. (a) Superficie de temperatura en el Ecosistema Herbazal del Páramo. (b) Superficie de precipitación en el Ecosistema Herbazal del Páramo.

5.3.2. ESTIMACIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE pH

La superficie de pH se obtuvo mediante los valores *in situ* por mediciones de la variable en el horizonte superficial (30 cm bajo suelo), distribuidos en la zona de estudio. Se utilizó el módulo de *ArcGis 10.2 Geostatistical Analyst* y se aplicó *kriging* ordinario con ajuste del semivariograma, al igual que las superficies climáticas. Como resultado se obtuvo el mapa de distribución de la variable pH en formato ráster, ver Figura 5.21.

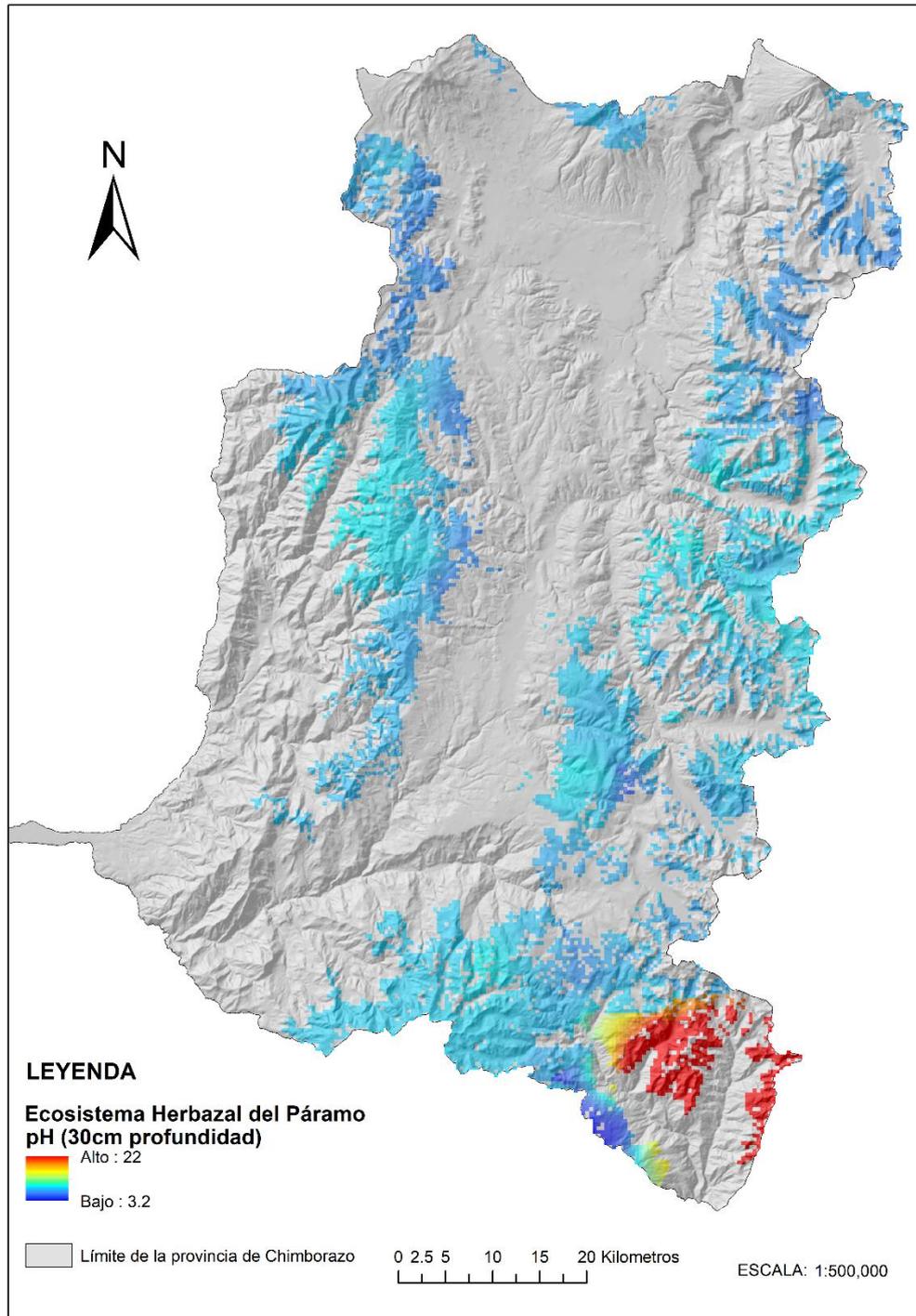


Figura 5. 21. Mapa de pH en el Ecosistema Herbazal del Páramo.

5.4. ENTRENAMIENTO DEL ALGORITMO DE AUTOAPRENDIZAJE PARA PREDICCIÓN DE COS

5.4.1. TRATAMIENTO DE INFORMACIÓN *IN SITU*

La información recibida del muestreo *in situ* cuenta con 501 puntos de muestreo realizados en los meses mayo, junio, agosto y septiembre, del año 2016. Los datos obtenidos son archivos alfanuméricos con coordenadas planas de proyección UTM Datum WGS84 zona 17S. Se hizo una conversión de esta entrada de datos alfanumérica a vectorial de estructura *shapefile*, tipo puntos, mediante el *software ArcGis 10.2* (ESRI, 2013), con el fin de tener información geográfica.

5.4.2. GENERACIÓN DEL ARCHIVO PARA CALIBRACIÓN DEL ALGORITMO CON RANDOM FOREST

A partir de la información geográfica *in situ* con los datos de COS de las muestras, se hace una extracción de los valores obtenidos de los índices multiespectrales, variables topográficas, superficies climáticas, estimación de pH, geología, taxonomía del suelo (a partir de la cartografía base del Ecuador provista por el IGM se obtienen archivos vectoriales de estructura *shapefile*, tipo polígono, correspondientes a geología y taxonomía del suelo) y también la variable altura a partir del MDE.

Como resultado se tienen 501 puntos de muestreo de COS asociados a los valores correspondientes de las 21 variables a ser evaluadas, por su capacidad indicadora en el almacenamiento de COS, y mediante la calibración del algoritmo de autoaprendizaje Random Forest (RF) con el *software Salford Predictive Modeler (SMP) 8.2* (Salford Systems a Minitab company, 2018), ver Figura 5.22. La distribución de los puntos de entrenamiento se observa en la Figura 5.23.

Salford Systems and Minitab Company (Salford Systems a Minitab company, 2018). A partir del archivo de entrenamiento en formato *.csv*, se configura el “*target*” que hace referencia al valor de COS conocido (variable dependiente - Y), también el “*predictor*” que corresponde a las variables que van a ser analizadas por su capacidad indicadora para la predicción de COS (variables independientes - X). El “*Target Type*” corresponde a la operación a realizar; ya que nuestro objetivo es realizar una regresión múltiple con el fin de predecir el valor de COS, se configuró una *regression* que resulta ser una predicción cuantitativa, ver Figura 5.24. El mecanismo de validación del algoritmo es el tipo *Out of bag data used for testing* que permite obtener un conjunto de las muestras de entrada que son escogidas en forma aleatoria para la validación, ver Figura 5.25. Finalmente, se configuraron 500 árboles de decisión y el número de predictores usados en los *Split* fue de 4, ver Figura 5.26.

Se evalúan en este estudio un total de 21 variables como posibles predictores en los ensayos para calibrar el algoritmo que constituirá el modelo de predicción de COS, incluyendo variables espectrales (EVI2, WDRVI, SAVI, NDVI, NDWI, VARI_G, NDSI, BI, NDMI, NBR, NBR2, temperatura de superficie terrestre), variables topográficas (Altura, Factor LS, pendiente y orientación), variables climáticas (temperatura y precipitación), pH del suelo y variables correspondientes a cartografía base del suelo del Ecuador (formación geológica y taxonomía del suelo). El uso de las variables fue en forma conjunta y así también a través de subgrupos combinados, con el fin de descartar variables no útiles. Como resultado de la calibración del algoritmo se obtiene un archivo con extensión *.grv*, proporcionado por el *software SMP 8.2* –algoritmo Random Forest. Este archivo denominado *grove* es el modelo que deberá ser utilizado para la predicción de COS.

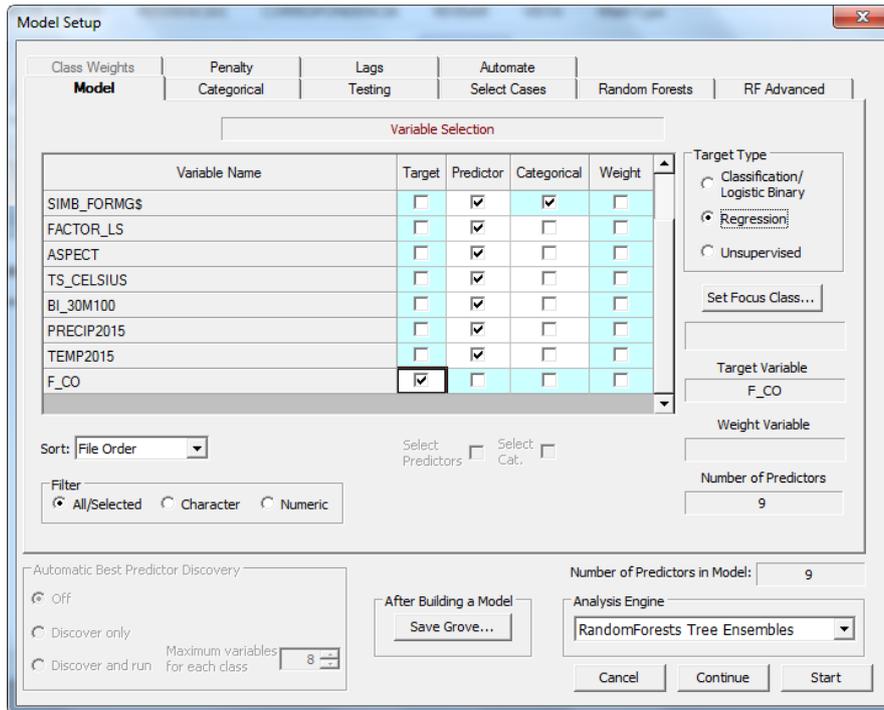


Figura 5. 24. Configuración del modelo RF

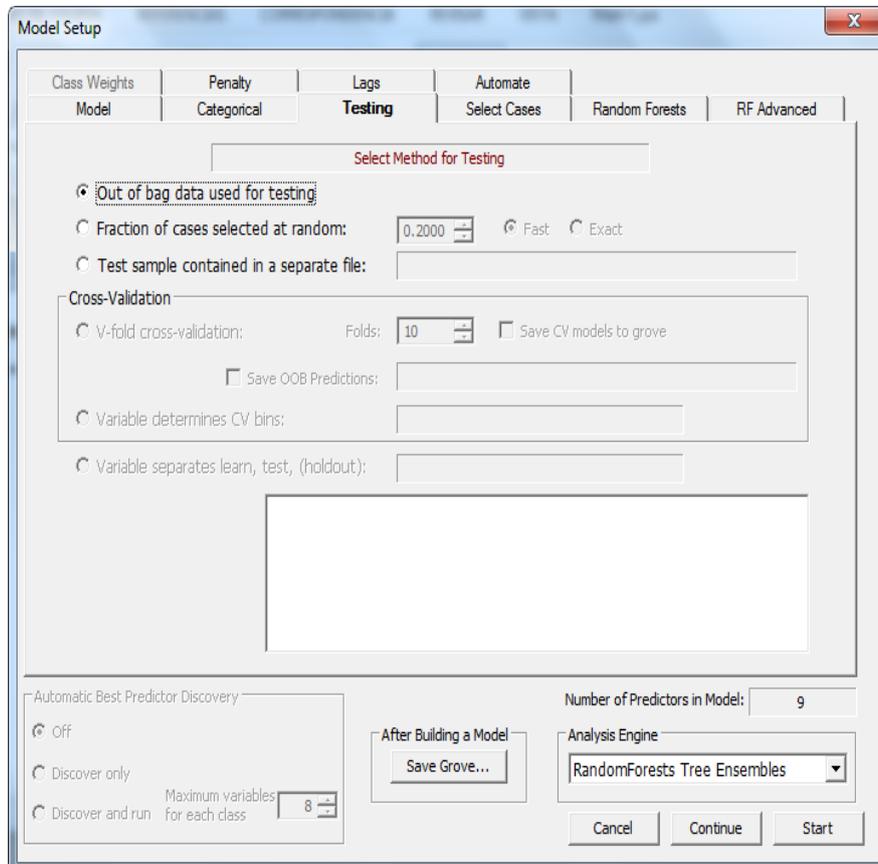


Figura 5. 25. Configuración de características de testeo para validación del modelo RF

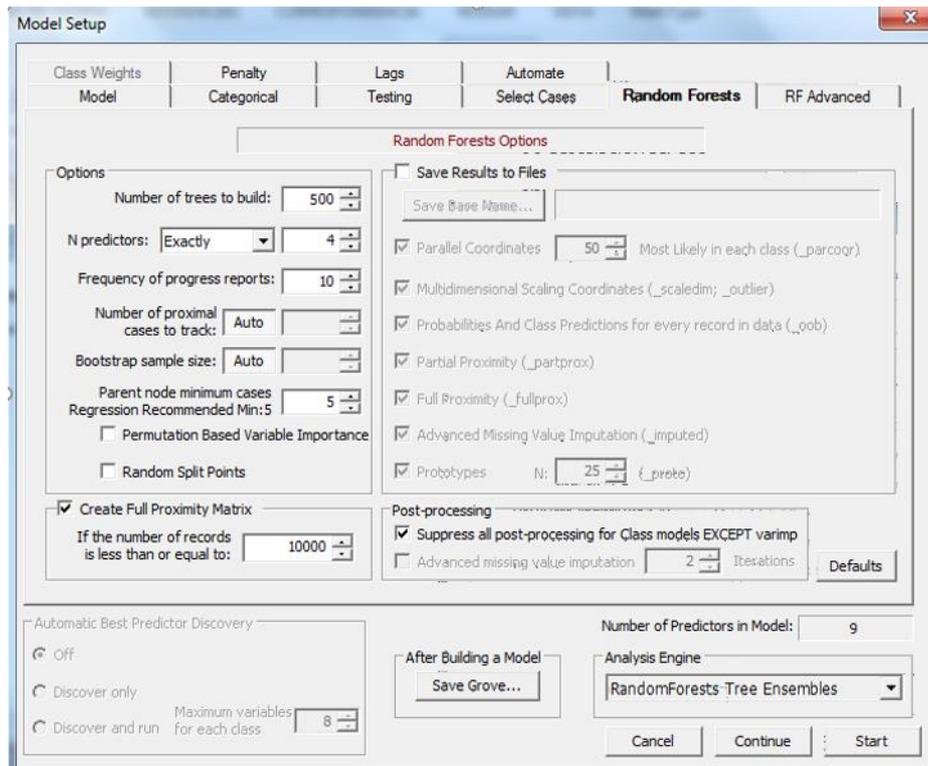


Figura 5. 26. Configuración de parámetros del modelo RF

5.5. OBTENCIÓN DE LA PREDICCIÓN DEL COS CON EL MODELO GENERADO (ALGORITMO RANDOM FOREST CALIBRADO)

El *software* SMP usado a través del algoritmo RF permite usar el modelo generado con la calibración previa del algoritmo; de esta manera se aplica el modelo a un conjunto de puntos de interés con las mismas variables que las que intervienen en el modelo generado, a través del procedimiento *score*, (ver Figura 5.27). La manera de realizar el *score* es introduciendo un archivo alfanumérico que contiene todas y cada una de las variables predictivas descubiertas a través del modelo excepto la variable COS ya que ésta es la variable que será predicha (*target variable*) en todos los puntos de interés en donde el COS no es conocido.

Se predicen un total de 1,686,503 registros, que corresponden a todos los píxeles de 30 m x 30 m que conforman la imagen Landsat 8 en la zona de estudio, identificados de manera puntual a través de una transformación de la estructura de datos ráster a vectorial. Estos 1,686,503 puntos con coordenadas de posición (X, Y) son utilizados como referencia espacial para la extracción de la información proveniente de las variables de capacidad predictiva halladas tras calibrar el modelo.

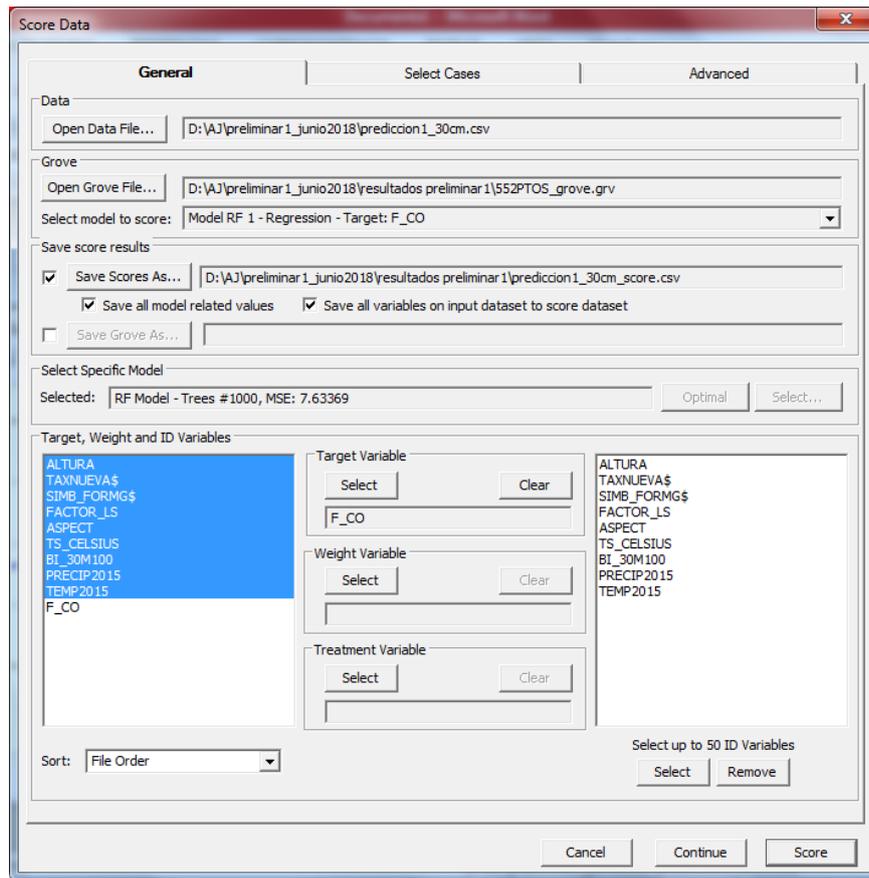


Figura 5. 27. Configuración de parámetros para la predicción

Como resultado se obtiene un archivo alfanumérico con la información resultante de la predicción de COS respecto la combinación en valor de las variables predictivas dispuesto en el archivo de entrada del proceso de predicción (*score*). El resultado es llevado a un SIG mediante el *software ArcGis 10.2* a través de su posición asociada, para la correspondiente evaluación de los resultados obtenidos y mapeo de los mismos.

5.6. VALIDACIÓN DE RESULTADOS POR MUESTREO DE CAMPO

La validación de los resultados se realiza por muestreo de campo, con el fin de constatar la precisión obtenida en el modelo. Para tal fin, se usan 29 puntos de validación ubicados dentro de la zona de estudio, mediante un muestreo aleatorio simple – M.A.S. (Galmés, 2011), Ec: 5.9.

$$n = \frac{Z^2 pq N}{d^2(N - 1) + Z^2 pq} \quad \text{Ec: 5.9}$$

En dónde:

n= cantidad de muestras de suelo a evaluar.

N= población representada por las unidades de muestreo utilizadas en el estudio, es decir, los puntos con información de COS utilizados en la obtención del modelo de predicción resultante.

p= probabilidad de éxito, el valor de p en este caso es de 0.95.

q= probabilidad de error, el valor de q es de 0.05.

Z= Valor correspondiente a la distribución t-Student con n-1 grados de libertad, es un valor constante relacionado a los intervalos de confianza sobre el cual se basa la precisión. Para el intervalo de confianza del 95% usado en este estudio se tiene un valor de Z de 1.96 basado en (Galmés, 2011) para M.A.S.

d= error de la precisión para el intervalo de confianza, el valor de d es de 0.05.

Por restricciones de accesibilidad y económicas, se realiza el muestreo de validación al 45 % del tamaño muestral (n) encontrado, las muestras a evaluarse son identificadas por un mecanismo de elección al azar, teniendo como resultado la extracción de 29 muestras aleatorias simples.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De al totalidad de las 21 variables usadas como posibles predictores, la Tabla 6.1 muestra los resultados más relevantes a los cuales denominaremos ensayos puesto que son previos a la obtención del modelo de predicción de COS. Los ensayos constituyen multiples pruebas de calibración del algoritmo de predicción; el objetivo es encontrar a los predictores descartando las variables no útiles al mismo tiempo que el coeficiente de determinación R^2 (rango 0 - 1) aumenta.

El ensayo A emplea 13 predictores sin embargo el valor de R^2 es inferior al de los otros ensayos. Calibraciones distintas en el algoritmo modificando como por ejemplo la cantidad de árboles de decisión y eliminando las variables de menor relevancia permiten mejorar los resultados como es el caso de los ensayos B y C. Es necesario indicar que las variables son descartadas por la información limitada que proporcionan en la calibración del modelo de regresión. Así, el algoritmo ordena las variables evaluadas según su importancia relativa con lo cual el usuario puede ubicar y elegir el descarte de una o más variables.

En el ensayo C, se incorpora la variable pH del suelo, dicha variable está relacionada a la cuantificación de COS ya que la MOS afecta la reacción del suelo (pH) (Martínez et al., 2008), aun así, ya que el obtener valores de pH implica muestrear *in situ*; con el fin de prescindir de dicha variable especialmente para aplicaciones de interés extendido del modelo se buscó

encontrar la mejor alternativa de calibración. De esta manera, se logró obtener un excelente modelo de predicción de COS con un R^2 de 0.82 y con un error cuadrático medio (RMSE) de 1.72 (ensayo D) usando para tal fin 500 nodos árbol.

La Figura 6.1, indica la importancia relativa de las variables predictivas según su aporte en el rendimiento del modelo, en orden descendente se tiene: Formación Geológica > Taxonomía > Precipitación > Altura > Orientación > Factor LS > Índice BI > Temperatura > Temperatura Superficial - TOA Brightness Temperature. Como resultado, el modelo generado con el ensayo D (*grove.grv*), fue utilizado para la predicción del contenido de COS en el perfil 0 - 30 cm, del área de estudio (ver Figura 6.2). La Figura 6.3 muestra el resultado de la predicción de COS en las unidades de Mg/ha por considerarse unidades más estandarizadas en el marco mundial para la representación de COS (FAO, 2017a).

Tabla 6. 1. Ensayos para la presentación del modelo de COS

Ensayo	Número de predictores	Variables con fines de predicción usadas ^a	RMSE (ODB)	R ² (ODB)
A	13	FG, Temp, Pre, Tx, Alt, VARIG, Asp, Slp, NDVI, NDWI, FLS, SAVI, EVI2	4.27	0.70
B	8	FG, Temp, Pre, Tx, Alt, VariG, Asp, Slp	3.88	0.75
C	10	Tx, FG, pH, Pre, Temp, Alt, BI, T, Asp, FLS	2.69	0.88
D	9	FG, Tx, , Pre, Alt, Asp, FLS, BI, Temp, T	1.72	0.82

^a Formación Geológica (FG), Temperatura (Temp), Precipitación (Pre), Taxonomía (Tx), Altura (Alt), Orientación (Asp), Pendiente (Slp), Índice NDVI (NDVI), Índice NDWI (NDWI), Temperatura Superficial - TOA Brightness Temperature (T) Factor LS (FLS), Índice SAVI (SAVI), Índice EVI2 (EVI2), Índice de suelo desnudo-Bare Index (BI)

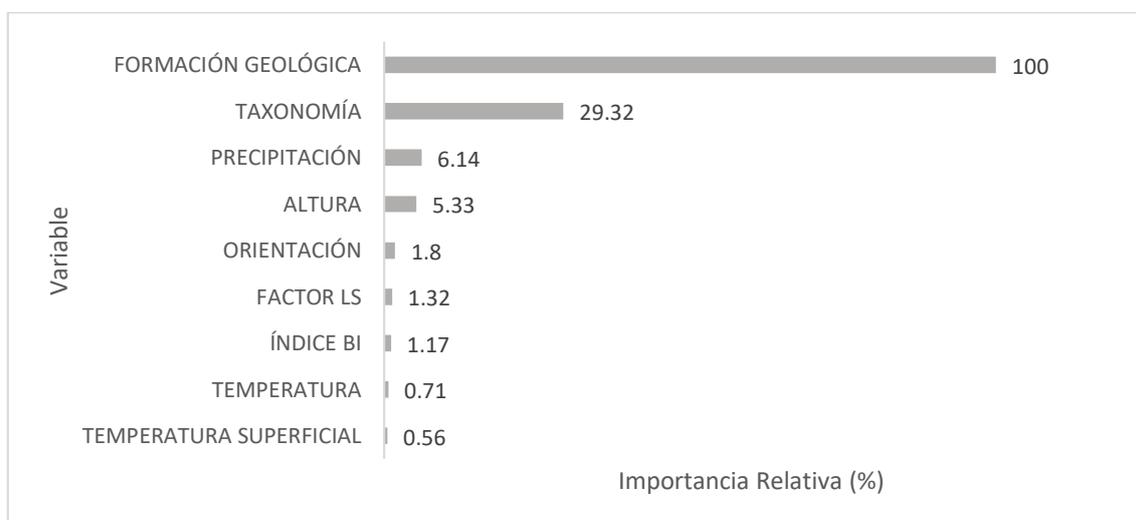


Figura 6. 1. Importancia de las variables de predicción

PREDICCIÓN DE COS EN EL ECOSISTEMA HERBAZAL DEL PARAMO DE LA PROVINCIA DE CHIMBORAZO, ECUADOR

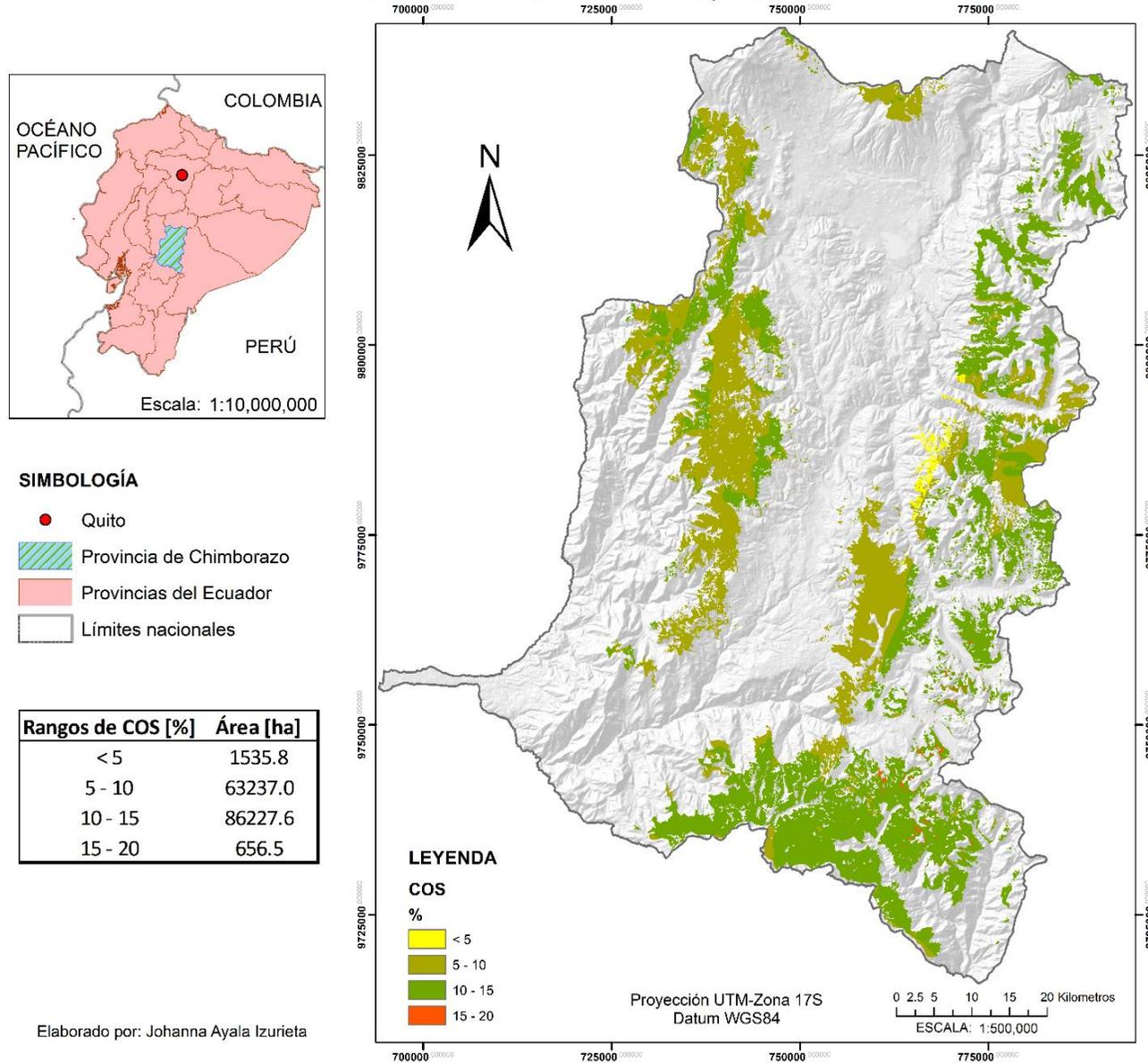
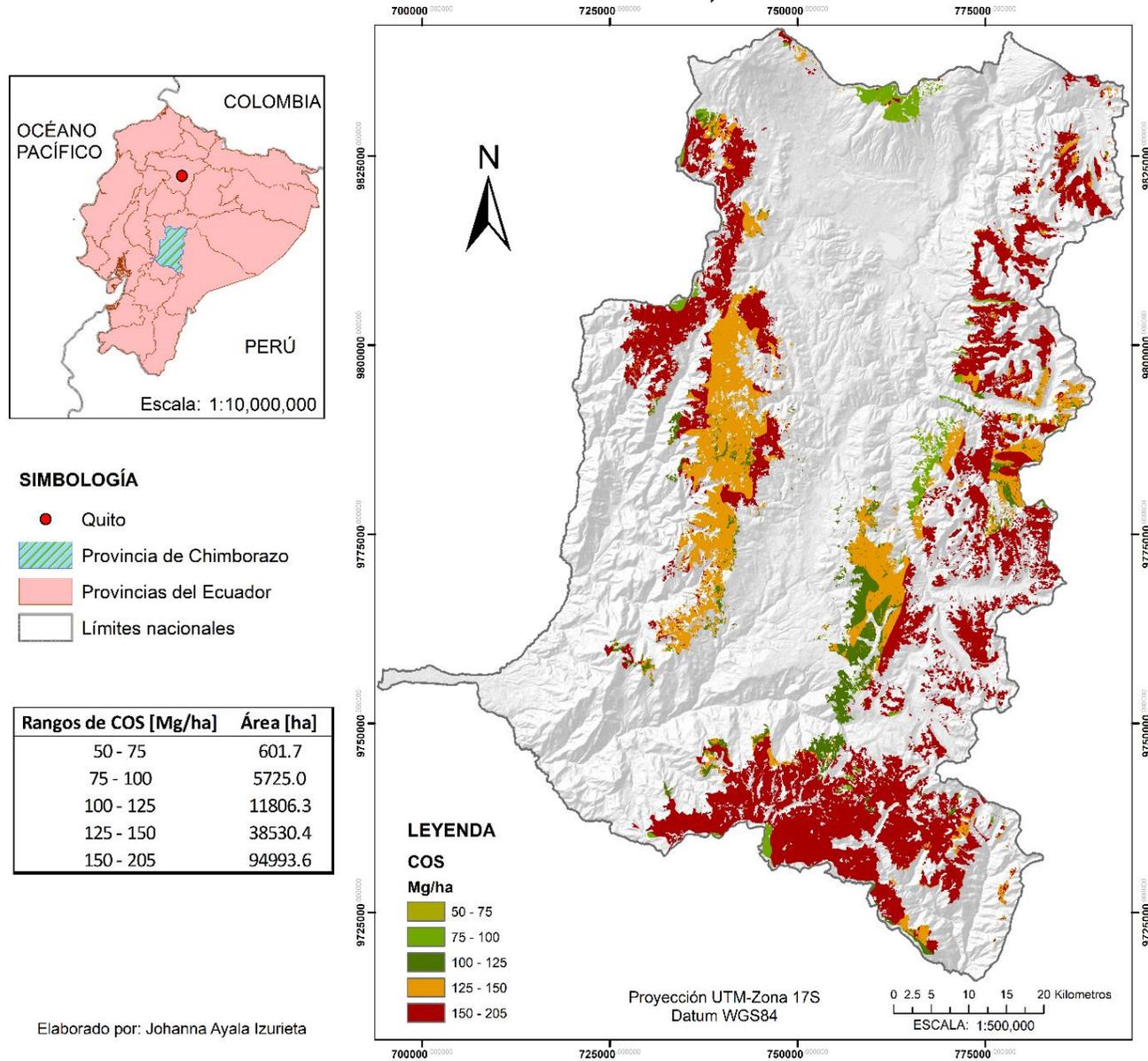


Figura 6. 2. Mapa resultado de la predicción de COS [%]

PREDICCIÓN DE COS EN EL ECOSISTEMA HERBAZAL DEL PÁRAMO DE LA PROVINCIA DE CHIMBORAZO, ECUADOR



Elaborado por: Johanna Ayala Izurieta

Figura 6. 3. Mapa de resultado de la predicción de COS [Mg/ha]

De los 9 predictores encontrados, la formación geológica, taxonomía, precipitación y altura fueron las variables que aportan mayor información en el modelo de predicción de COS, esto concuerda con (Lal, 2004) en su análisis sobre los procesos que afectan la dinámica del COS considera que la textura y estructura del suelo, la precipitación, la temperatura, tienen mucha incidencia; del mismo modo variables como la altura, encontrada como predictor de COS apoyan la teoría en que los sitios sin intervención antrópica suelen ser más dependientes de variables más locales (Tan et al., 2004). En fin, se pudo encontrar que las variables que forman parte del modelo de predicción de COS hallado mantienen una relación físico-químico con la dinámica de secuestro de carbono (FAO, 2017b; Stockmann et al., 2013), en donde, la composición, características de los suelos y su cubierta, así como el entorno climático juegan un papel muy importante, ahora es posible conocer el grado de importancia en torno a la cantidad de secuestro de COS.

Los resultados muestran que el mayor porcentaje del área de estudio, equivalente al 57 % tiene altas concentraciones de COS entre los 150-205 Mg/ha (ver Figura 6.3). Estudios distintos de reservas de COS en entornos tropicales y templados, han encontrado niveles de COS que están entre los 50-60 Mg/ha (Andriulo et al., 2012); el contenido de SOC presente en los suelos es mayor en latitudes más altas, disminuye en las latitudes medias y aumenta en los trópicos (Batjes, 1999), lo cual queda evidenciado con el presente estudio, así como la importancia de conocer las reservas de COS en los ecosistemas de mayor relevancia por la capacidad de almacenamiento de COS, así es el caso del ecosistema páramo.

La importancia de conocer las reservas de COS a nivel mundial hace que la FAO inicie un programa con el fin de reunir toda la información existente a nivel mundial GSOC (FAO, 2018), resultados como el del presente estudio y los resultados que serán conocidos tras extender el modelo generado en todo el ecosistema herbazal del páramo del Ecuador, constituirá información geográfica de gran interés y que podrá ponerse a disposición del proyecto GSOC con el fin de colaborar en el avance del objetivo del programa.

La zona alto andina es un gran desafío por la dinámica cambiante del suelo a la hora de determinar predictores y evitar posibles errores en la información para la calibración del modelo. Usar *Random Forest* al ser robusto ante una posible inclusión de predictores con información limitada o información con cierto nivel de ruido (Ließ et al., 2016), minimiza el error en la predicción.

6.1. RESULTADOS DEL MUESTREO DE VALIDACIÓN

La figura 6.4 muestra la distribución de los 29 puntos de validación ubicados en la zona de estudio.

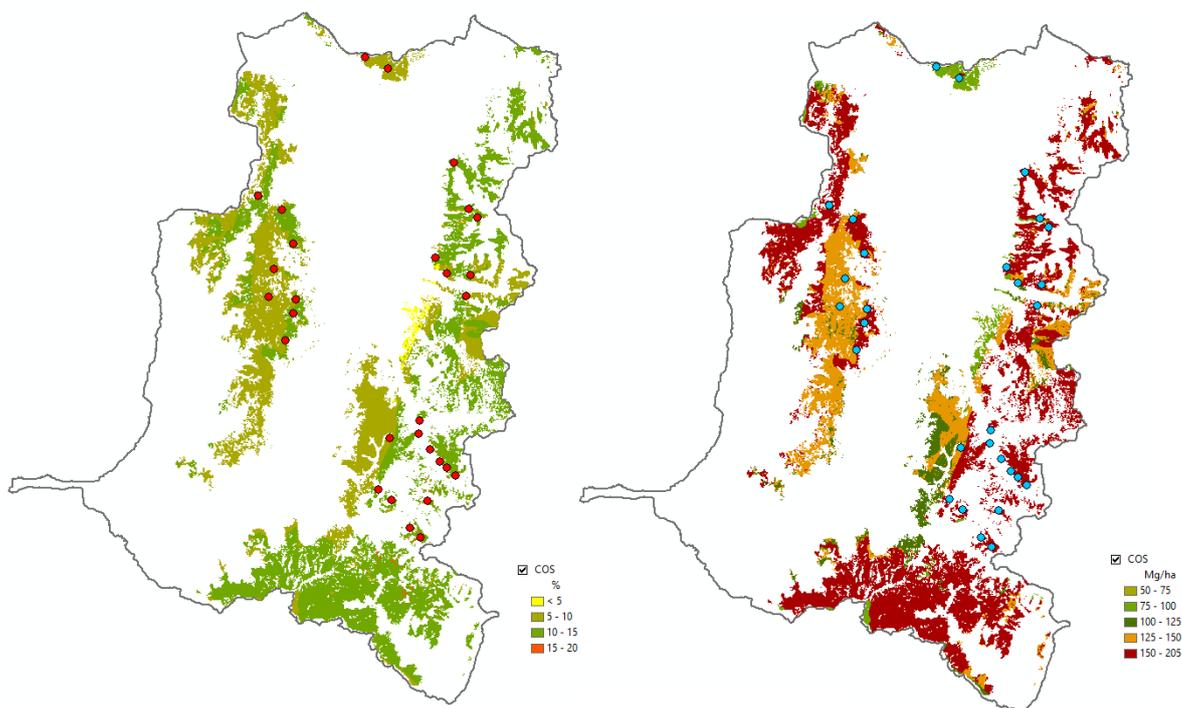


Figura 6. 4. Ubicación de puntos de validación en la zona de estudio

Luego de comparar los resultados de la predicción con los resultados de los muestreos de COS en los 29 puntos de validación, ver Figuras 6.5 y 6.7; la mediana del error absoluto porcentual obtenido de los resultados provenientes del muestreo de COS para la validación y el encontrado mediante el algoritmo de predicción está por debajo del 10 % para el COS expresado en [%] y del 11.5 % en los resultados de COS en [Mg/ha]. El modelo generado alcanzó un R^2 de 0.82 en su calibración y prueba, mientras que, en la validación a través del error medio, se alcanza un R^2 de 0.85, con lo cual el modelo de predicción de COS y su precisión son verificados. La distribución del error para cada una de las muestras se observa en Figura 6.6 y Figura 6.8.

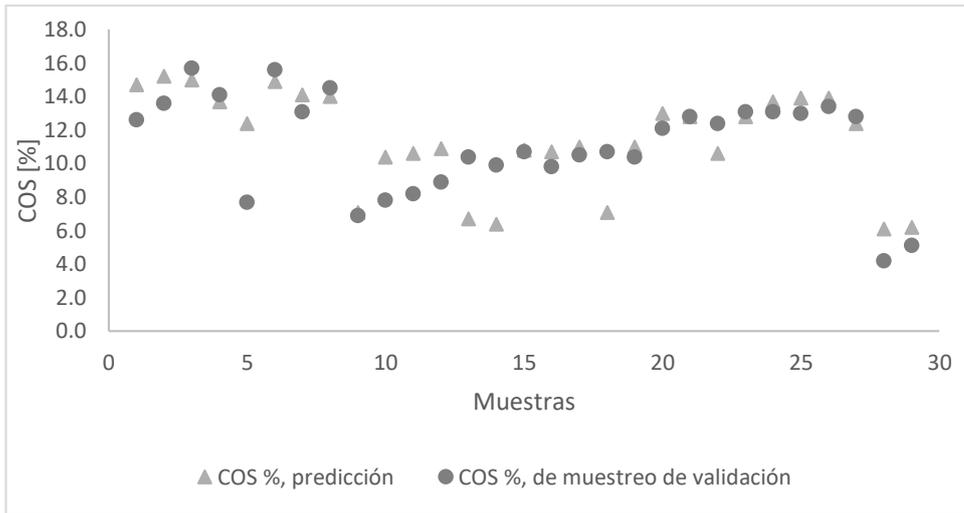


Figura 6. 5. Valores de COS en los puntos de validación vs COS predicho, unidades [%]

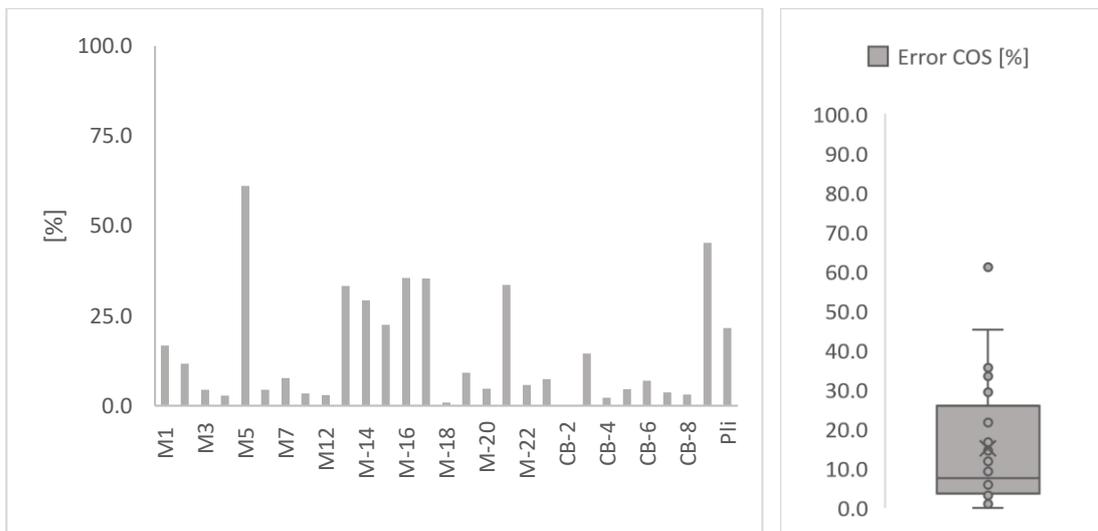


Figura 6. 6. Gráficas de error de COS [%] en función de las muestras de validación

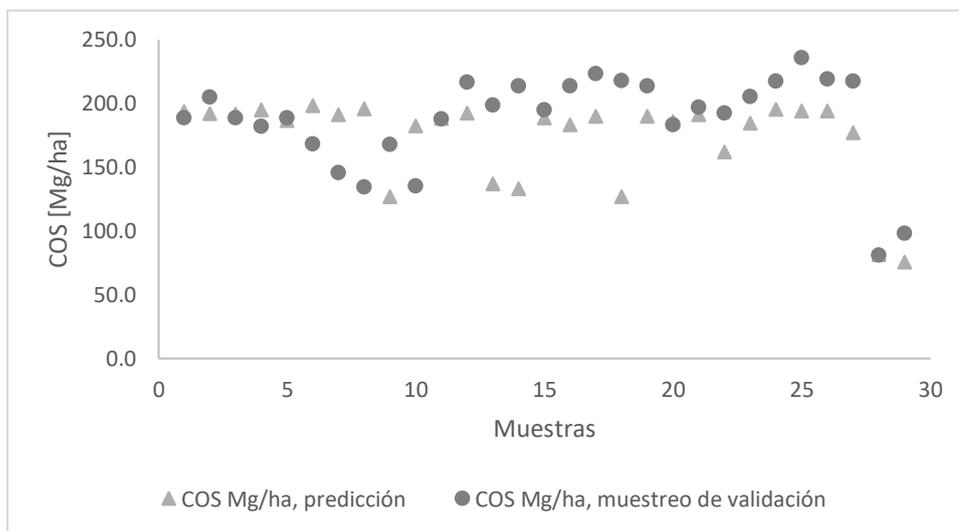


Figura 6. 7. Valores de COS de puntos de validación vs COS predicho, unidades [Mg/ha]

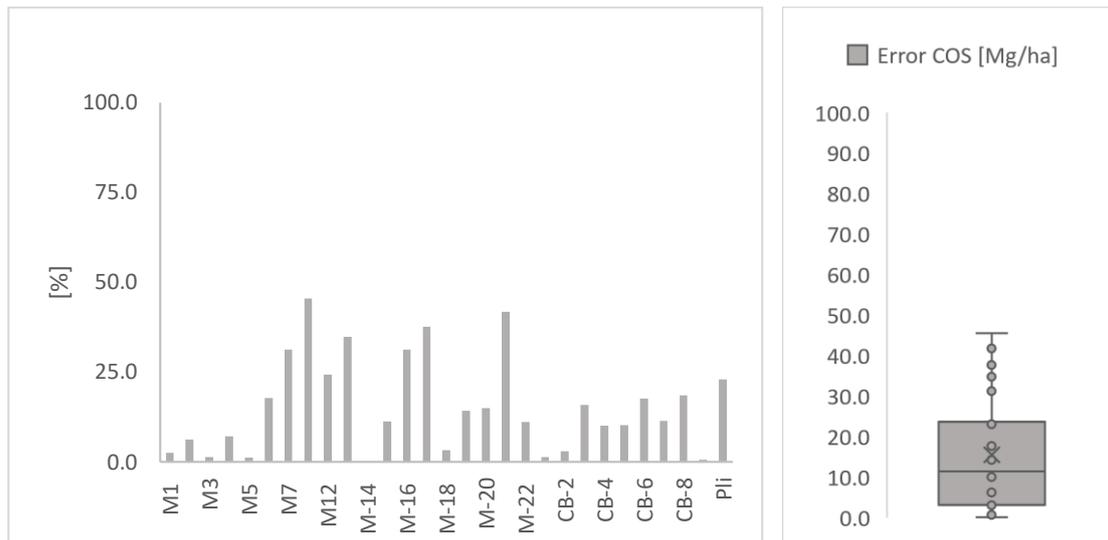


Figura 6. 8. Gráficas de error de COS [Mg/ha] en función de las muestras de validación

7. CONCLUSIONES

En esta investigación se calibró un modelo de predicción de carbono orgánico del suelo con un nivel de precisión del 82%. Muy difícil de lograr en zonas complejas desde el punto de vista climático, variabilidad topográfica, diversidad geológica, entre otros. Para tal fin, *Random Forest* como algoritmo de aprendizaje automático permitió detectar las 9 variables ambientales con información valiosa en la dinámica del secuestro del COS. La aplicabilidad de este tipo de algoritmos reduce grandes costes económicos, que conllevan levantar la información en zonas con dificultades de acceso o de gran extensión. También pueden ser utilizados como una nueva alternativa metodológica con presupuestos limitados.

Se encontró que las variables: formación geológica, taxonomía del suelo, precipitación, altura, orientación, factor LS, índice BI, temperatura y temperatura superficial - *TOA Brightness Temperature*; tienen gran relevancia en la cuantificación de COS. Las variables encontradas en conjunto con el modelo logrado con RF reducen la necesidad de muestreos intensivos en campo. Estas variables se pueden obtener con la metodología desarrollada en el presente estudio.

La predicción de carbono orgánico del suelo (COS) es influenciada principalmente por la formación geológica y la taxonomía del suelo, seguidas de la precipitación y altura. La complejidad topográfica del terreno de estudio, así como, la heterogeneidad geológica en el área de estudio, hacen que, información adicional con menor importancia relativa sea relevante en el incremento de la precisión del modelo. Así es el caso de las variables obtenidas a través de los sensores remotos OLI y TIRS, así como la variable meteorológica temperatura.

A través del modelo de predicción y SIG se logró mapear de manera digital el COS en la capa superficial (0-30 cm) del ecosistema Herbazal del Páramo de toda la provincia de Chimborazo – Ecuador, descubriendo en él las elevadas reservas de COS. Más del 50% del área de estudio tiene concentraciones de COS entre los 150-205 Mg/ha. De esta manera, los resultados ubican al HP como un ecosistema de relevancia en las reservas de COS a nivel nacional y mundial.

El uso de imágenes Landsat 8 en este estudio de gran extensión superficial con distribución irregular y dispersa del ecosistema HP fue un reto. Las condiciones climáticas extremas por la presencia de clima frío-húmedo a lo largo del año, así como el elevado gradiente altitudinal de las zonas de páramo, provocan en las imágenes satelitales, escenas con gran porcentaje de nubosidad en pequeñas y grandes áreas. Por tal motivo, el tiempo dedicado en la selección de imágenes, el tratamiento y detección de zonas nubosas, así como el relleno es un proceso laborioso, minucioso, crítico y de gran importancia en éstos entornos; en donde, muchas de las veces el uso de imágenes satelitales ópticas no resulta viable. Aun así, la metodología empleada en el procesamiento de imágenes y generación de información geográfica fue útil y fue posible lograr información valiosa para el modelo. Futuras líneas de investigación en estos entornos podrían considerar alternativas en donde la influencia atmosférica pueda ser minimizada tal es el caso de los sensores RADAR- *Radio Detection And Ranging*, mismos que trabajan con microondas.

La metodología propuesta es un gran aporte a la comunidad científica, especialmente a los grupos de investigación en escenarios de tal complejidad como son las zonas alto andinas. Los resultados de la cuantificación y mapeo del COS en el HP son de vital importancia para el objetivo mundial de conocer las reservas de COS. Así mismo, los resultados hicieron evidente la gran capacidad de secuestro de carbono que tiene el ecosistema estudiado debido la composición del suelo, las condiciones físico-químicas del suelo y las de su entorno.

Se ha desarrollado una alternativa de cuantificación de COS, el modelo puede ser extendido sin necesidad de muestreo *in situ*. Así mismo, los resultados obtenidos mediante el mapeo digital de COS y el descubrimiento de las elevadas reservas de COS, existentes en el ecosistema de estudio, representan un gran aporte en la caracterización de los suelos del territorio nacional. Con lo cual podrá ser posible establecer normativas provinciales y nacionales que eviten la degradación del suelo en este tipo de ecosistemas, por la importancia que estos tienen, en la estabilización de las estructuras del suelo y regulación hídrica. También por su aporte en la

mitigación del cambio climático, por su participación en el proceso de reducción de las concentraciones de CO₂ de la atmósfera.

8. RECOMENDACIÓN

El proyecto SOCEPE da inicio tras la reunión con un representante de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) (UNESCO, 2019), en donde se estudia la mitigación y adaptabilidad al cambio climático. Se evidenció la necesidad de crear un programa científico con 5 líneas de trabajo o proyectos: *“Soil Organic Carbon Sequestration in Ecuadorian Paramo Ecosystems”*, *“Vulnerability assessment of the social-ecological system”*, *“Development of ecosystem-based adaptations strategies”*, *“Cost-benefits analyses from carbon sequestration through conservation to the various options of adaptations”*, *“Simulations of the future scenarios (and how they can be perceived by actors)”*.

Dentro del proyecto SOCEPE, en el área de SIG y teledetección, se encuentra enmarcada la presente investigación dentro de la componente 3 (Validación y Diseño del mapa digital de carbono orgánico del suelo en el páramo). Los resultados de la investigación entregados serán usados como estudio base en la componente 4 (Diseño del modelo digital para mapeo del carbono en toda el área del corredor interandino del Ecuador). Paralelamente el área ambiental del proyecto SOCEPE, lleva permanentemente actividades de socialización y capacitación con las comunidades. Las comunidades son los actores que viven dentro del área de estudio y que sin el consentimiento de ellos no es posible el acceso y mucho menos realizar muestreos. También dentro de la socialización, la Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH) genera reportes continuos al Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE), como parte de los requerimientos que permiten a la universidad obtener y mantener el permiso de investigación en áreas protegidas.

Sin embargo, con la finalidad de elevar los resultados obtenidos en pro de la conservación del ecosistema Herbazal del Páramo, se recomienda aplicar inteligencia territorial mediante la elaboración de agendas científicas con mesas de trabajo permanentes (Bozzano & Canevari, 2018). En las que se incluyen a los actores involucrados: científicos, políticos e instituciones, comunitarios y empresarios como ejes de participación y acción. Con estas mesas de trabajo se espera activar y generar un intercambio de ideas, que se orienten a la construcción del conocimiento en el marco de la mitigación y adaptabilidad al cambio climático global. Así mismo, de manera conjunta es posible realizar acuerdos que constituyan las bases para las regulaciones y normativas necesarias.

Así, dentro de la componente socialización del proyecto SOCEPE. Se recomienda la agenda de investigación operacionalizada mediante la mesa de trabajo permanente con la temática “Preservación y mantenimiento del ecosistema Páramo”. Los actores involucrados constituyen: el área ambiental del proyecto SOCEPE e investigadores asociados, los presidentes de las juntas parroquiales de la provincia de Chimborazo, los representantes de las comunidades y representantes del MAE.

Considerando la constitución de la República del Ecuador bajo el Art. 406 (“El Estado regulará la conservación, manejo y uso sustentable, recuperación, y limitaciones de dominio de los ecosistemas frágiles y amenazados; entre otros, los páramos, humedales, bosques nublados, bosques tropicales secos y húmedos y manglares, ecosistemas marinos y marinos-costeros.”) (República del Ecuador, 2008), se tiene al ecosistema páramo dentro del Marco normativo del Ecuador relacionado con las áreas protegidas. Aun así, es necesario contar con un instrumento legal específico para el páramo. Es decir, una “Ley sobre conservación y uso de páramos” o bien un “Reglamento sobre conservación y uso de páramos” (Hofstede et al., 2011).

En este contexto, se contempla que las mesas de trabajo deben ser periódicas y deben regular las actividades antrópicas que contribuyen a la pérdida del ecosistema y la degradación de los suelos. También se contemple encontrar las acciones preventivas, correctivas, así como sus consecuencias a corto, mediano y largo plazo. Como resultado de las mesas de trabajo se puede tener en corto plazo convenios y acuerdos a nivel de actores. Esto sería un adelanto positivo que evidencia una aplicación favorable de la investigación, que repercute en la conservación del ecosistema.

Los instrumentos técnicos, científicos y socio ambientales -productos de la mesa de trabajo y la investigación- serán socializados y llevados a la siguiente instancia en el MAE con el objetivo de estructurar el proyecto de ley para su presentación y aprobación, enmarcado en el contexto del uso soberano de la inteligencia territorial (Bozzano et al., 2012).

Ahora bien, el ecosistema páramo en América Latina tiene una superficie aproximada de 1,6663,03 ha. Se distribuye de manera ininterrumpida desde la cordillera de Mérida en Venezuela hasta la depresión de Huancabamba en el norte del Perú, también se ubica en los páramos centroamericanos de Costa Rica, Panamá y la Sierra Nevada de Santa Marta en Colombia (Hofstede et al., 2014). En tal virtud, se considera investigar la posibilidad de replicabilidad del presente estudio en entornos similares, favoreciendo el conocimiento y la ciencia integral, de todos y para todos (Boaventura, 2009). El estudio puede ser replicado

fuera del territorio nacional, incrementando el alcance y proyección del proyecto SOCEPE en los próximos años. Del mismo modo, se pueden establecer vínculos con otros proyectos, pudiendo llegar también a organizaciones internacionales y a los ministerios del ambiente de los países correspondientes. Se considera también, el evaluar la implementación de una agenda científica participativa que abra la puerta a una política de estado. En este sentido se contempla usar el método Territorii por su adaptabilidad en todas las líneas de interés territorial (Ferrari & Bozzano, 2016).

NOMENCLATURA

A

árboles de decisión: Es un método usado en RF como modelo de predicción. Se denominan árboles ya que poseen una estructura nodo rama, resultado de una partición recursiva bajo la cual se obtiene un árbol de regresión en el caso del estudio, el árbol es usado para obtener las predicciones de COS en base a las variables independientes consideradas., 25, 50, 55

B

barrenación: Insertar el instrumento barreno (especie de pala metálica) en el suelo para obtener el porcentaje de muestra requerida, 18

bootstrap: Muestra aleatoria basada en los registros de los datos de entrenamiento del algoritmo Random Forest de SMP. Se usan para generar un algoritmo de autoaprendizaje y finalmente lograr un modelo de predicción de COS del suelo., 26

C

COS: Carbono Orgánico del Suelo, 27

D

DEM: Modelo Digital de Elevación, 19, 29, 31, 41, 44, 49

E

ENMASCARAMIENTO: DELimitación de las zonas en la imagen bajo determinada regla., 33

EP: Ecosistema de Páramo, 10

EPE: Ecosistema de Páramo en el Ecuador, 10, 12, 13, 14, 17

F

ferralíticos: Suelo rico en hierro y aluminio, debido al lavado de otros cationes como consecuencia de un largo período de condiciones climáticas húmedas., 21

G

geosistemas: Conjunto de entidades bióticas (biósfera), abióticas (litósfera, atmósfera e hidrósfera) y antrópicas (sociedad), entre las

cuales se producen permanentes interrelaciones que originan cambios cualitativos y cuantitativos que caracterizan finalmente la estructura terrestre., 2, 21, 62

GEOTIFF: Es un estándar de metadatos de dominio público que permite que información georreferenciada sea encajada en un archivo de imagen de formato TIFF., 29

grove: Archivo generado en el *software* SMP, algoritmo Random Forest con extensión .grv, constituye el modelo de predicción generado con el *software* al concluir el entrenamiento del algoritmo de autoaprendizaje., 51, 55

H

helio-sincrónica: Es una órbita geocéntrica que combina altitud e inclinación para lograr que un objeto en esa órbita pase sobre una determinada latitud terrestre a un mismo tiempo solar local. Es retrógrada es decir el satélite orbita en forma opuesta al giro direccional de la Tierra., 24

HsSn02: Ecosistema de páramo tipo Herbazal del Páramo codificado según el Ministerio del Ambiente del Ecuador, 14, 15, 17, 27

I

IGM: El Instituto Geográfico Militar del Ecuador gestiona, aprueba y controla todas las actividades encaminadas a la elaboración de la cartografía oficial y del archivo de datos geográficos y cartográficos del país, elabora especies valoradas y documentos de seguridad como único organismo autorizado y difunde las ciencias geoespaciales, 29, 30, 49, 67

INAMHI: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador, 14, 44, 45, 46

INFOPLAN: es una herramienta que consolida información estadística y geográfica de las instituciones públicas y la pone a disposición de la ciudadanía a través del sitio www.sni.gob.ec. Se dispone información estadística y geográfica elaborada por fuentes oficiales, 19

K

KRIGING: Usado en el Krigeado, es un método geoestadístico para la estimación de puntos. Utiliza un modelo de variograma para la obtención de los ponderadores que se darán a cada punto de referencias usados en la estimación. Esta técnica de interpolación se basa en la premisa de que la variación espacial continúa con el mismo patrón. Utilizado en el estudio para la estimación de superficies climáticas y de pH., 44

M

mineralización: Referente a un proceso biológico que ocurre mediante la conversión de la materia orgánica a un estado inorgánico, a través de la acción de microorganismos., 10, 24

MO: Materia orgánica presente en las muestras de suelo, 18, 24

MODELO: Referente al algoritmo final de predicción entrenado y calibrado, mismo que es usado para la predicción de COS en el área de estudio., 52

P

pH: Potencial de hidrogeno unidad de medida que sirve para establecer el nivel de acidez o alcalinidad de una sustancia., 17, 28, 48, 49, 55

píxeles: De pixel, es la menor unidad homogénea en color que forma parte de una imagen digital., 31, 32, 33

R

radiancia: Es el flujo radiante, es la magnitud que detecta el sensor en la plataforma del satélite. Cuando la radiancia se refiere a una porción., 30, 31, 40; Es el flujo radiante, es la magnitud que detecta el sensor en la plataforma del satélite. Cuando la radiancia se refiere a una porción. concreta del espectro electromagnético se le denomina radiancia espectral, 30

S

score: Procedimiento en el software Random Forest para realizar la predicción de una variable utilizando un modelo previamente entrenado *grove.*, 52, 53

SIG: Sistemas de Información Geográfica, 11, 12, 13, 53

SOCEPE: Soil Organic Carbon Evaluation and Sequestration in Ecuadorian Páramo Ecosystems. Es un proyecto que estudia el almacenaje de COS en el ecosistema de páramo en el Ecuador, 11, 12, 14, 17, 18

V

variables predictivas: Son variables que proporcionan información suficiente para la predicción de la variable de interés (COS), estas variables estarían controlando la dinámica de distribución y almacenaje del COS en la zona de estudio., 13, 25, 52, 53, 55

BIBLIOGRAFÍA

- Africano, K., Cely, G., & Serrano, P. (2016). Potencial de captura de CO₂ asociado al componente edáfico en páramos Guantiva-La Rusia, departamento de Boyacá, Colombia. *Perspectiva Geografica*, 21(1), 91–110.
- Aguilar Arias, H., Mora Zamora, R., & Vargas Bolaños, C. (2014). Metodología Para La Corrección Atmosférica De Imágenes Aster, Rapideye, Spot 2 Y Landsat 8 Con El Módulo Flaash Del Software Envi. *Revista Geográfica de América Central*, 53, 39–59. <https://doi.org/10.15359/rgac.2-53.2>
- Andriulo, A., Galantini, J., Studdert, G., Sasal, M., Wilson, M., Basanta, M., ... Restovich, S. (2012). Existencias de carbono orgánico edáfico bajo diferentes usos y tipos de suelo. *Xix Congreso Latinoamericano De La Ciencia Del Suelo*, (January), 5.
- Arbelo, C., Rodríguez, A., Sánchez, J., Notario, J., Recalata, L., Mora, J., ... Armas, C. (2008). CARACTERIZACIÓN EN ENTORNO SIG DE LOS SUELOS DEL PARQUE NACIONAL DEL TEIDE. DINÁMICA DE NUTRIENTES Y CARBONO EN LOS SUELOS. In *Proyectos de investigación en parques nacionales 2005-2008* (pp. 43–72).
- Ayala, J. E., Márquez, C. O., García, V. J., Recalde, C. G., Rodríguez, M.-V., & Damián, D. A. (2017). Land cover classification in an ecuadorian mountain geosystem using a random forest classifier, spectral vegetation indices, and ancillary geographic data. *Geosciences (Switzerland)*, 7(2). <https://doi.org/10.3390/geosciences7020034>
- Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., & Huete, A. R. (1995). A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, 13(1), 95–120. <https://doi.org/10.1080/02757259509532298>
- Batjes, N. H. (1999). Management options for reducing CO₂ - concentrations in the atmosphere by increasing carbon sequestration in the soil. *Options*, (952282), 126.
- Beltrán, K., Salgado, S., Cuesta, F., León-Yáñez, S., Romoleroux, K., Ortiz, E., ... Velástegui, A. (2009). Distribución espacial, sistemas ecológicos y caracterización florística de los páramos en el Ecuador. *EcoCiencia*, 72–150.
- Blanco, A., Alonso, F., & Gomariz, F. (2014). Elaboración de un mapa de carbono orgánico del suelo en la Región de Murcia. In *XVI Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica* (p. 9).
- Boaventura, D. S. S. (2009). *Una epistemología del Sur La reinención del conocimiento y la*

emancipación social. México: CLACSO y Siglo XXI.

Bozzano, H., & Canevari, T. (2018). *Estrategias para la Gestión Integral del Territorio*.

Bozzano, H., Girardot, J. ., Cirio, G., Barrionuevo, C. ., & Gliemmo, F. (2012). *Inteligencia Territorial: teoría, métodos e iniciativas en Europa y América Latina*.

Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32.
<https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>

Breiman, L., Friedman, J., Olshen, R., & Stone, C. (2017). *Classification and Regression Trees* (19 October). <https://doi.org/10.1201/9781315139470>

Chartin, C., Stevens, A., Goidts, E., Krüger, I., Carnol, M., & van Wesemael, B. (2017). Mapping Soil Organic Carbon stocks and estimating uncertainties at the regional scale following a legacy sampling strategy (Southern Belgium, Wallonia). *Geoderma Regional*, 9, 73–86.
<https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2016.12.006>

Chen, W., Liu, L., Zhang, C., Wang, J., Wang, J., & Pan, Y. (2004). Monitoring the seasonal bare soil areas in Beijing using multi-temporal TM images, (October), 1–5.
<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2004.1370429>

Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos De Teledeteccion Espacial* (Segunda. E). Madrid.
<https://doi.org/23.304-1995>

Chuvieco, E. (2008). *Teledeteccion ambiental.pdf* (Tercera ed). Barcelona.

CONAE. (2016). Índices Espectrales derivados de imágenes satelitales Landsat 8 Sensor OLI. *Guía de Usuario CONAE*.

Desmet, J., & Govers, G. (1996). A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*, 51(5).

Exelis Visual Information Solutions. (2013). ENVI tutorial.

FAO. (2017a). *Mapa de Carbono Orgánico del Suelo*.

FAO. (2017b). *Soil Organic Carbon: the hidden potential*. Rome, Italy.
<https://doi.org/10.1038/nrg2350>

FAO. (2018). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Farley, K. A., Bremer, L. L., Harden, C. P., & Hartsig, J. (2012). Changes in carbon storage under alternative land uses in biodiverse Andean grasslands: Implications for payment for

- ecosystem services. *Conservation Letters*, 6(1), 21–27. <https://doi.org/10.1111/j.1755-263X.2012.00267.x>
- Farley, K. A., Kelly, E. F., & Hofstede, R. G. M. (2004). Soil Organic Carbon and Water Retention after Conversion of Grasslands to Pine Plantations in the Ecuadorian Andes. *Ecosystems*, 7(7), 729–739. <https://doi.org/10.1007/s10021-004-0047-5>
- Ferrari, M. P., & Bozzano, H. (2016). APPLICATION OF TERRITORII METHOD IN TWO SPONTANEOUS SETTLEMENTS OF PUERTO MADRYN , ARGENTINA. *Geography Papers*, 62. <https://doi.org/dx.doi.org/10.6018/geografia/2016/260061>
- Galmés, M. (2011). Métodos de muestreo. In *Taller Regional sobre el uso de Muestreo en las Encuestas Agrícolas*. Montevideo.
- González, M., Jurado, E., González, S., Aguirre, Ó., Jiménez, J., & Navar, J. (2003). Cambio climático mundial: origen y consecuencias. *Ciencia Uanl*, 3, 377–385.
- Herrán, C. (2012). El cambio climático y sus consecuencias para América Latina. *Revista de La Bolsa de Comercio de Rosario*, 6–10.
- Hofstede, R. (2004). Health state of Páramos : an effort to correlate science and practice. *Lyonia*, 6(December), 61–73.
- Hofstede, R., Josse, C., Lasso, S., Medina, G., Ochoa, N., & Ortiz, D. (2011). *Páramo. Paisaje habitado, manejado e institucionalizado*. (EcoCiencia, Abya-Yala, & ECOBONA, Eds.).
- Hofstede, R., Calles, J., López, V., Polanco, R., Torres, F., Ulloa, J., ... Cerra, M. (2014). *Los páramos Andinos ¿Qué Sabemos? Estado de conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema páramo*. UICN, Quito, Ecuador.
- IGM. (2016). Geoportal IGM. Retrieved from <http://www.igm.gob.ec/index.php/en/servicios>
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global change and food security. *Science* 304: 1623-1627., 304(June), 1623–1627.
- Li, S., & Chen, X. (2014). A NEW BARE-SOIL INDEX FOR RAPID MAPPING DEVELOPING AREAS USING LANDSAT 8 DATA. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (Vol. XL, pp. 14–16). Suzhou-China. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-4-139-2014>
- Ließ, M., Schmidt, J., & Glaser, B. (2016). Improving the spatial prediction of soil organic carbon stocks in a complex tropical mountain landscape by methodological specifications in

- machine learning approaches. *PLoS ONE*, 11(4), 1–22.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0153673>
- López, M. J., & Caselles, V. (1991). Mapping burns and natural reforestation using thematic Mapper data Mapping Burns and Natural Reforestation Using Thematic Mapper Data. *Geocarto International*, 6(1), 31–37.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1080/10106049109354290>
- MAE. (2012). Sistema de clasificación de los ecosistemas del Ecuador continental. Subsecretaría de Patrimonio Natural (a), 143. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- MAE. (2013). *Sistema de Clasificación de Ecosistemas del Ecuador Continental*.
- Martínez, E., Fuentes, J. P., & Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de La Ciencia Del Suelo y Nutrición Vegetal*, 8(1), 68–96.
<https://doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006>
- Mccool, D., Brown, L. ., Foster, G. ., Mutchler, C. ., & Meyer, L. . (1987). *Revised Slope Length Factor for the Universal Soil Loss Equation*. <https://doi.org/10.13031/2013.30576>
- Mcknight, J. Y. (2015). *Linking soil moisture and carbon-cycle processes in two understudied terrestrial ecosystems: Ecuadorian páramo grasslands and constructed agricultural wetlands*. University of Tennessee, Knoxville.
- Mena, P., Josse, C., & Medina, G. (2000). Los suelos de los Páramos del Ecuador. *Los Suelos Del Páramo*, 1–75. <https://doi.org/ISSN 1390-1222>
- Minasny, B., McBratney, A. B., Malone, B. P., Lacoste, M., & Walter, C. (2014). Soil Carbon. *Progress in Soil Science. Springer International Publishing Switzerland 2014*, (December).
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-04084-4>
- Moreno, J., Yerovi, F., Herrera, M., Yáñez, D., & José, E. (2018). *The Soils of Ecuador*.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-25319-0_3
- Panagos, P., Borrelli, P., & Meusburger, K. (2015). A New European Slope Length and Steepness Factor (LS-Factor) for Modeling Soil Erosion by Water. *Geosciences*, 5(2), 117–126.
<https://doi.org/10.3390/geosciences5020117>
- Ramifehiarivo, N., Brossard, M., Grinand, C., Andriamananjara, A., Razafimbelo, T., Rasolohery, A., ... Razakamanarivo, H. (2017). Mapping soil organic carbon on a national scale: Towards an improved and updated map of Madagascar. *Geoderma Regional*, 9, 29–38.

<https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2016.12.002>

República del Ecuador. Constitución de la República del Ecuador 2008 (2008). Ecuador.

Rouse, J. W., Hass, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *Third Earth Resources Technology Satellite (ERTS) Symposium*, 1, 309–317. <https://doi.org/citeulike-article-id:12009708>

SALFOR SYSTEMS A MINITAB. (2017). Improve Your Regression Models. In *Improve Your Regression Models*.

Segura, M., Sánchez, P., Ortiz, C., & Gutiérrez, M. de C. (2005). Organic Carbon of Mexican Soils. *TERRA Latinoamericana*, 23(1), 21–28. <https://doi.org/ISSN:2395-8030>

SNI ECUADOR - INFOPLAN. (2011). INFOPLAN. Retrieved from <http://sni.gob.ec/inicio>

Stockmann, U., Adams, M. A., Crawford, J. W., Field, D. J., Henakaarchchi, N., Jenkins, M., ... Zimmermann, M. (2013). The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 164(2013), 80–99. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.10.001>

Survey, U. S. G. (2016). *Landsat 8 (L8) Data Users Handbook. America* (Vol. 2). <https://doi.org/http://www.webcitation.org/6mu9r7riR>

Tan, Z. X., Lal, R., Smeck, N. E., & Calhoun, F. G. (2004). Relationships between surface soil organic carbon pool and site variables. *Geoderma*, 121(3–4), 187–195. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.11.003>

UNACH. (2016). Proyectos de Investigación. Retrieved from <http://investigacion.unach.edu.ec/proyectos.php>

UNESCO. (2019). Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. Retrieved from <https://es.unesco.org>

USDA, & NRCS. (2014). *Claves para la Taxonomía de Suelos*.

USGS-USA. (2018). USGS Landsat Missions-USGS EROS GCP Library. Retrieved from <https://landsat.usgs.gov/landsat-8-ground-control-point-search>

USGS, U. (2017). USGS GloVis. Retrieved from <https://glovis.usgs.gov>

Van Bemmelen, J. M. (1891). Über Die Bestimmung Des Wassers, Des Humus, Des Schwefels, Der in Den Colloïdalen Silikaten Gebundenen Kieselsäure, Des Mangans U. S. W. Im

Ackerboden. *Die Landwirtschaftlichen Versuchs-Stationen*, 37, 279–290.

Vico, G., & Porporato, A. (2009). Probabilistic description of topographic slope and aspect. *Journal de Geophysical Research*, 114(February), 1–13. <https://doi.org/10.1029/2008JF001038>

Zhang, G., LIU, F., & Song, X. (2017). Recent progress and future prospect of digital soil mapping : A review. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(0). [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61762-3](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61762-3)

ANEXOS

Anexo A

TABLA DE DATOS DE UBICACIÓN DE PUNTOS DE MUESTREO RECIBIDA DEL PROYECTO SOCEPE PARA EL MAPEO DIGITAL DE COS vs GEOLOGÍA Y TAXONOMÍA DEL SUELO

ID LABORATORIO	X	Y	FORMACIÓN GEOLOGICA/TAXONÓMICA	TAXONOMÍA	GEOLOGÍA	SIM_TAXONOMÍA	SIMB_FORMACIÓN GEOLOGICA
317	777130	9805444	Edg	Entisol	Depósito Glacial	E	dg
318	777283	9805507	Edg	Entisol	Depósito Glacial	E	dg
319	777416	9805602	Edg	Entisol	Depósito Glacial	E	dg
320	777511	9805764	Edg	Entisol	Depósito Glacial	E	dg
321	777641	9805676	Edg	Entisol	Depósito Glacial	E	dg
322	777762	9805764	Edg	Entisol	Depósito Glacial	E	dg
323	777871	9805838	Edg	Entisol	Depósito Glacial	E	dg
324	778048	9805851	Edg	Entisol	Depósito Glacial	E	dg
325	778217	9805772	Edg	Entisol	Depósito Glacial	E	dg
326	778421	9805700	Edg	Entisol	Depósito Glacial	E	dg
297	777800	9805644	EJAa	Entisol	Unidad Alao	E	JAA
298	778009	9805659	EJAa	Entisol	Unidad Alao	E	JAA
299	778318	9805568	EJAa	Entisol	Unidad Alao	E	JAA
300	778591	9805545	EJAa	Entisol	Unidad Alao	E	JAA
301	777980	9805053	EJAa	Entisol	Unidad Alao	E	JAA
302	778146	9805024	EJAa	Entisol	Unidad Alao	E	JAA
303	778394	9805081	EJAa	Entisol	Unidad Alao	E	JAA
304	778575	9805164	EJAa	Entisol	Unidad Alao	E	JAA
305	778722	9805235	EJAa	Entisol	Unidad Alao	E	JAA
306	778901	9805251	EJAa	Entisol	Unidad Alao	E	JAA
73	771394	9792908	EJAp	Entisol	Unidad Pelpetec	E	JAp
74	771181	9792399	EJAp	Entisol	Unidad Pelpetec	E	JAp
75	771428	9792717	EJAp	Entisol	Unidad Pelpetec	E	JAp
76	772547	9791913	EJAp	Entisol	Unidad Pelpetec	E	JAp
77	772140	9791569	EJAp	Entisol	Unidad Pelpetec	E	JAp
78	772298	9791366	EJAp	Entisol	Unidad Pelpetec	E	JAp
79	772656	9791138	EJAp	Entisol	Unidad Pelpetec	E	JAp
80	771189	9792520	EJAp	Entisol	Unidad Pelpetec	E	JAp
81	768863	9784578	EJAp	Entisol	Unidad Pelpetec	E	JAp
82	768993	9785139	EJAp	Entisol	Unidad Pelpetec	E	JAp
83	769353	9785611	EJAp	Entisol	Unidad Pelpetec	E	JAp
84	769267	9785353	EJAp	Entisol	Unidad Pelpetec	E	JAp
85	767279	9781280	EJAp	Entisol	Unidad Pelpetec	E	JAp
86	766959	9780959	EJAp	Entisol	Unidad Pelpetec	E	JAp

87	766607	9780302	EJAp	Entisol	Unidad Pelpetec	E	JAp
88	766398	9779869	EJAp	Entisol	Unidad Pelpetec	E	JAp
89	766138	9779289	EJAp	Entisol	Unidad Pelpetec	E	JAp
90	766307	9779634	EJAp	Entisol	Unidad Pelpetec	E	JAp
127	765094	9779073	EJGc	Entisol	Unidad Cebadas	E	JGc
128	764793	9779485	EJGc	Entisol	Unidad Cebadas	E	JGc
129	765512	9779658	EJGc	Entisol	Unidad Cebadas	E	JGc
130	766169	9780236	EJGc	Entisol	Unidad Cebadas	E	JGc
131	765898	9780555	EJGc	Entisol	Unidad Cebadas	E	JGc
132	765373	9781444	EJGc	Entisol	Unidad Cebadas	E	JGc
133	765569	9781853	EJGc	Entisol	Unidad Cebadas	E	JGc
134	765975	9782551	EJGc	Entisol	Unidad Cebadas	E	JGc
135	766763	9782130	EJGc	Entisol	Unidad Cebadas	E	JGc
136	766980	9782991	EJGc	Entisol	Unidad Cebadas	E	JGc
137	765873	9783244	EJGc	Entisol	Unidad Cebadas	E	JGc
138	767628	9787685	EJGc	Entisol	Unidad Cebadas	E	JGc
139	768168	9788014	EJGc	Entisol	Unidad Cebadas	E	JGc
140	769659	9789893	EJGc	Entisol	Unidad Cebadas	E	JGc
141	769294	9789728	EJGc	Entisol	Unidad Cebadas	E	JGc
142	770961	9792557	EJGc	Entisol	Unidad Cebadas	E	JGc
143	770225	9792946	EJGc	Entisol	Unidad Cebadas	E	JGc
144	769106	9793140	EJGc	Entisol	Unidad Cebadas	E	JGc
19	766475	9779361	EMTq	Entisol	Formación Tarqui	E	MTq
20	766408	9779264	EMTq	Entisol	Formación Tarqui	E	MTq
21	766759	9779843	EMTq	Entisol	Formación Tarqui	E	MTq
22	766507	9779493	EMTq	Entisol	Formación Tarqui	E	MTq
23	770779	9762210	EMTq	Entisol	Formación Tarqui	E	MTq
24	771038	9762119	EMTq	Entisol	Formación Tarqui	E	MTq
25	770834	9762067	EMTq	Entisol	Formación Tarqui	E	MTq
26	771369	9762113	EMTq	Entisol	Formación Tarqui	E	MTq
27	771555	9761873	EMTq	Entisol	Formación Tarqui	E	MTq
28	772500	9760794	EMTq	Entisol	Formación Tarqui	E	MTq
29	772686	9760958	EMTq	Entisol	Formación Tarqui	E	MTq
30	772237	9761059	EMTq	Entisol	Formación Tarqui	E	MTq
31	772906	9760070	EMTq	Entisol	Formación Tarqui	E	MTq
32	771428	9761439	EMTq	Entisol	Formación Tarqui	E	MTq
33	771135	9762659	EMTq	Entisol	Formación Tarqui	E	MTq
34	771947	9760425	EMTq	Entisol	Formación Tarqui	E	MTq
35	772480	9760491	EMTq	Entisol	Formación Tarqui	E	MTq
36	771683	9762356	EMTq	Entisol	Formación Tarqui	E	MTq
307	776783	9805808	EPA	Entisol	Volcánicos del Altar	E	PA
308	777016	9805781	EPA	Entisol	Volcánicos del Altar	E	PA
309	777201	9805866	EPA	Entisol	Volcánicos del Altar	E	PA
310	777424	9805972	EPA	Entisol	Volcánicos del Altar	E	PA
311	777874	9806062	EPA	Entisol	Volcánicos del Altar	E	PA
312	779272	9805433	EPA	Entisol	Volcánicos del Altar	E	PA
313	779350	9805152	EPA	Entisol	Volcánicos del Altar	E	PA
314	777251	9804378	EPA	Entisol	Volcánicos del Altar	E	PA
315	779061	9803900	EPA	Entisol	Volcánicos del Altar	E	PA
316	777740	9804402	EPA	Entisol	Volcánicos del Altar	E	PA

437	737102	9829907	EPC3	Entisol	Piroclásticos del Chimborazo	E	PC3
438	737568	9830088	EPC3	Entisol	Piroclásticos del Chimborazo	E	PC3
439	737466	9830387	EPC3	Entisol	Piroclásticos del Chimborazo	E	PC3
440	737810	9830553	EPC3	Entisol	Piroclásticos del Chimborazo	E	PC3
441	738830	9830556	EPC3	Entisol	Piroclásticos del Chimborazo	E	PC3
442	737616	9830818	EPC3	Entisol	Piroclásticos del Chimborazo	E	PC3
443	737124	9830802	EPC3	Entisol	Piroclásticos del Chimborazo	E	PC3
444	736616	9830644	EPC3	Entisol	Piroclásticos del Chimborazo	E	PC3
445	736822	9831116	EPC3	Entisol	Piroclásticos del Chimborazo	E	PC3
446	737481	9831096	EPC3	Entisol	Piroclásticos del Chimborazo	E	PC3
237	777489	9793552	HJAa	Histosol	Unidad Alao	H	JAA
238	777767	9793750	HJAa	Histosol	Unidad Alao	H	JAA
239	778038	9793922	HJAa	Histosol	Unidad Alao	H	JAA
240	778204	9794180	HJAa	Histosol	Unidad Alao	H	JAA
241	777807	9794140	HJAa	Histosol	Unidad Alao	H	JAA
242	777193	9804736	HJAa	Histosol	Unidad Alao	H	JAA
243	777498	9804806	HJAa	Histosol	Unidad Alao	H	JAA
244	777796	9804952	HJAa	Histosol	Unidad Alao	H	JAA
245	778279	9804736	HJAa	Histosol	Unidad Alao	H	JAA
246	778856	9804774	HJAa	Histosol	Unidad Alao	H	JAA
1	779956	9784563	HMTq	Histosol	Formación Tarqui	H	MTq
2	775272	9758314	HMTq	Histosol	Formación Tarqui	H	MTq
3	779607	9784462	HMTq	Histosol	Formación Tarqui	H	MTq
4	773238	9758142	HMTq	Histosol	Formación Tarqui	H	MTq
5	780181	9784499	HMTq	Histosol	Formación Tarqui	H	MTq
6	775260	9758041	HMTq	Histosol	Formación Tarqui	H	MTq
7	773417	9758121	HMTq	Histosol	Formación Tarqui	H	MTq
8	775957	9758663	HMTq	Histosol	Formación Tarqui	H	MTq
9	779005	9784423	HMTq	Histosol	Formación Tarqui	H	MTq
10	778936	9784091	HMTq	Histosol	Formación Tarqui	H	MTq
11	780265	9784903	HMTq	Histosol	Formación Tarqui	H	MTq
12	779213	9784019	HMTq	Histosol	Formación Tarqui	H	MTq
13	779840	9784733	HMTq	Histosol	Formación Tarqui	H	MTq
14	775206	9758160	HMTq	Histosol	Formación Tarqui	H	MTq
15	775530	9758263	HMTq	Histosol	Formación Tarqui	H	MTq
16	775870	9758453	HMTq	Histosol	Formación Tarqui	H	MTq
17	779350	9784493	HMTq	Histosol	Formación Tarqui	H	MTq
18	780282	9784631	HMTq	Histosol	Formación Tarqui	H	MTq
277	775529	9805130	HPA	Histosol	Volcánicos del Altar	H	PA
278	775781	9805119	HPA	Histosol	Volcánicos del Altar	H	PA
279	776126	9805035	HPA	Histosol	Volcánicos del Altar	H	PA
280	776305	9804749	HPA	Histosol	Volcánicos del Altar	H	PA
281	776656	9804583	HPA	Histosol	Volcánicos del Altar	H	PA
282	777106	9804509	HPA	Histosol	Volcánicos del Altar	H	PA
283	777662	9804588	HPA	Histosol	Volcánicos del Altar	H	PA
284	778347	9804204	HPA	Histosol	Volcánicos del Altar	H	PA
285	778823	9804035	HPA	Histosol	Volcánicos del Altar	H	PA
286	779374	9804903	HPA	Histosol	Volcánicos del Altar	H	PA

457	763498	9832431	IDa	Inceptisol	Depósito Aluvial	I	Da
458	763131	9833267	IDa	Inceptisol	Depósito Aluvial	I	Da
459	763197	9832682	IDa	Inceptisol	Depósito Aluvial	I	Da
460	762476	9832666	IDa	Inceptisol	Depósito Aluvial	I	Da
461	762526	9833386	IDa	Inceptisol	Depósito Aluvial	I	Da
462	762157	9833118	IDa	Inceptisol	Depósito Aluvial	I	Da
463	761487	9833202	IDa	Inceptisol	Depósito Aluvial	I	Da
464	761554	9833695	IDa	Inceptisol	Depósito Aluvial	I	Da
465	762157	9833705	IDa	Inceptisol	Depósito Aluvial	I	Da
466	762294	9834243	IDa	Inceptisol	Depósito Aluvial	I	Da
199	778203	9783748	Idg	Inceptisol	Depósito Glacial	I	dg
200	778103	9782124	Idg	Inceptisol	Depósito Glacial	I	dg
201	777270	9782094	Idg	Inceptisol	Depósito Glacial	I	dg
202	776378	9782214	Idg	Inceptisol	Depósito Glacial	I	dg
203	775804	9782078	Idg	Inceptisol	Depósito Glacial	I	dg
204	775981	9784237	Idg	Inceptisol	Depósito Glacial	I	dg
205	770415	9778001	Idg	Inceptisol	Depósito Glacial	I	dg
206	770297	9778447	Idg	Inceptisol	Depósito Glacial	I	dg
207	768179	9779683	Idg	Inceptisol	Depósito Glacial	I	dg
208	771569	9781382	Idg	Inceptisol	Depósito Glacial	I	dg
209	771484	9780788	Idg	Inceptisol	Depósito Glacial	I	dg
210	777479	9786700	Idg	Inceptisol	Depósito Glacial	I	dg
211	777137	9786987	Idg	Inceptisol	Depósito Glacial	I	dg
212	776854	9787621	Idg	Inceptisol	Depósito Glacial	I	dg
213	776783	9787929	Idg	Inceptisol	Depósito Glacial	I	dg
214	776675	9788158	Idg	Inceptisol	Depósito Glacial	I	dg
215	776987	9788541	Idg	Inceptisol	Depósito Glacial	I	dg
216	776990	9783928	Idg	Inceptisol	Depósito Glacial	I	dg
327	774940	9802211	Idg	Inceptisol	Depósito Glacial	I	dg
328	775152	9802072	Idg	Inceptisol	Depósito Glacial	I	dg
329	775469	9801867	Idg	Inceptisol	Depósito Glacial	I	dg
330	775807	9801788	Idg	Inceptisol	Depósito Glacial	I	dg
331	776118	9801662	Idg	Inceptisol	Depósito Glacial	I	dg
332	774629	9802793	Idg	Inceptisol	Depósito Glacial	I	dg
333	774934	9802945	Idg	Inceptisol	Depósito Glacial	I	dg
334	774987	9803210	Idg	Inceptisol	Depósito Glacial	I	dg
335	775199	9803095	Idg	Inceptisol	Depósito Glacial	I	dg
336	775699	9803256	Idg	Inceptisol	Depósito Glacial	I	dg
163	773605	9757329	IG	Inceptisol	Rocas Intrusivas	I	G
164	774502	9757493	IG	Inceptisol	Rocas Intrusivas	I	G
165	774013	9757777	IG	Inceptisol	Rocas Intrusivas	I	G
166	773793	9758278	IG	Inceptisol	Rocas Intrusivas	I	G
167	774066	9758946	IG	Inceptisol	Rocas Intrusivas	I	G
168	774180	9759754	IG	Inceptisol	Rocas Intrusivas	I	G
169	774721	9760161	IG	Inceptisol	Rocas Intrusivas	I	G
170	771111	9763629	IG	Inceptisol	Rocas Intrusivas	I	G
171	771958	9762130	IG	Inceptisol	Rocas Intrusivas	I	G
172	774254	9763220	IG	Inceptisol	Rocas Intrusivas	I	G
173	775216	9783266	IG	Inceptisol	Rocas Intrusivas	I	G
174	775533	9785846	IG	Inceptisol	Rocas Intrusivas	I	G

175	776142	9789180	IG	Inceptisol	Rocas Intrusivas	I	G
176	776353	9790212	IG	Inceptisol	Rocas Intrusivas	I	G
177	775440	9787619	IG	Inceptisol	Rocas Intrusivas	I	G
178	770905	9775214	IG	Inceptisol	Rocas Intrusivas	I	G
179	772337	9774427	IG	Inceptisol	Rocas Intrusivas	I	G
180	777165	9775415	IG	Inceptisol	Rocas Intrusivas	I	G
247	777289	9793205	IG	Inceptisol	Rocas Intrusivas	I	G
248	776938	9793213	IG	Inceptisol	Rocas Intrusivas	I	G
249	776650	9793373	IG	Inceptisol	Rocas Intrusivas	I	G
250	776469	9793551	IG	Inceptisol	Rocas Intrusivas	I	G
251	775268	9794623	IG	Inceptisol	Rocas Intrusivas	I	G
252	775502	9794793	IG	Inceptisol	Rocas Intrusivas	I	G
253	775768	9794932	IG	Inceptisol	Rocas Intrusivas	I	G
254	776086	9794865	IG	Inceptisol	Rocas Intrusivas	I	G
255	776159	9794607	IG	Inceptisol	Rocas Intrusivas	I	G
256	776206	9794326	IG	Inceptisol	Rocas Intrusivas	I	G
181	775183	9775532	IJAa	Inceptisol	Unidad Alao	I	JAA
182	774964	9776138	IJAa	Inceptisol	Unidad Alao	I	JAA
183	774951	9776722	IJAa	Inceptisol	Unidad Alao	I	JAA
184	775910	9777201	IJAa	Inceptisol	Unidad Alao	I	JAA
185	775251	9777941	IJAa	Inceptisol	Unidad Alao	I	JAA
186	775601	9778770	IJAa	Inceptisol	Unidad Alao	I	JAA
187	778540	9779067	IJAa	Inceptisol	Unidad Alao	I	JAA
188	777771	9779892	IJAa	Inceptisol	Unidad Alao	I	JAA
189	775356	9781736	IJAa	Inceptisol	Unidad Alao	I	JAA
190	775785	9782965	IJAa	Inceptisol	Unidad Alao	I	JAA
191	776919	9781588	IJAa	Inceptisol	Unidad Alao	I	JAA
192	777497	9790259	IJAa	Inceptisol	Unidad Alao	I	JAA
193	778922	9790773	IJAa	Inceptisol	Unidad Alao	I	JAA
194	784800	9791592	IJAa	Inceptisol	Unidad Alao	I	JAA
195	785009	9792848	IJAa	Inceptisol	Unidad Alao	I	JAA
196	785792	9793529	IJAa	Inceptisol	Unidad Alao	I	JAA
197	780725	9790322	IJAa	Inceptisol	Unidad Alao	I	JAA
198	776620	9788846	IJAa	Inceptisol	Unidad Alao	I	JAA
257	777723	9793183	IJAa	Inceptisol	Unidad Alao	I	JAA
258	778193	9793151	IJAa	Inceptisol	Unidad Alao	I	JAA
259	778650	9793317	IJAa	Inceptisol	Unidad Alao	I	JAA
260	778974	9792770	IJAa	Inceptisol	Unidad Alao	I	JAA
261	779406	9792910	IJAa	Inceptisol	Unidad Alao	I	JAA
262	779946	9792561	IJAa	Inceptisol	Unidad Alao	I	JAA
263	780390	9792675	IJAa	Inceptisol	Unidad Alao	I	JAA
264	781083	9792288	IJAa	Inceptisol	Unidad Alao	I	JAA
265	781540	9792078	IJAa	Inceptisol	Unidad Alao	I	JAA
266	781996	9791963	IJAa	Inceptisol	Unidad Alao	I	JAA
91	767959	9768430	IJAa	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	JAm
92	768374	9768125	IJAa	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	JAm
93	767993	9768732	IJAa	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	JAm
94	766894	9772718	IJAa	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	JAm
95	767704	9771038	IJAa	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	JAm
96	767734	9770858	IJAa	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	JAm

97	768449	9780737	IJAm	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	Jam
98	769624	9781208	IJAm	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	Jam
99	772984	9780343	IJAm	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	Jam
100	773004	9779803	IJAm	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	Jam
101	773171	9778608	IJAm	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	Jam
102	775718	9789012	IJAm	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	Jam
103	775710	9789190	IJAm	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	Jam
104	774425	9790780	IJAm	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	Jam
105	770213	9782971	IJAm	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	Jam
106	771202	9785145	IJAm	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	Jam
107	771413	9783306	IJAm	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	Jam
108	773732	9785687	IJAm	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	Jam
217	773521	9793370	IJAm	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	Jam
218	773768	9793220	IJAm	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	Jam
219	774011	9793161	IJAm	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	Jam
220	774375	9793104	IJAm	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	Jam
221	774791	9793101	IJAm	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	Jam
222	773938	9793706	IJAm	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	Jam
223	774216	9794067	IJAm	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	Jam
224	774444	9794255	IJAm	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	Jam
225	774467	9794444	IJAm	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	Jam
226	774398	9794715	IJAm	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	Jam
347	763746	9763955	IJAm	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	Jam
348	766074	9763743	IJAm	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	Jam
349	764416	9766524	IJAm	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	Jam
350	764783	9768720	IJAm	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	Jam
351	765108	9769558	IJAm	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	Jam
352	764854	9770677	IJAm	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	Jam
353	765207	9770859	IJAm	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	Jam
354	765461	9770350	IJAm	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	Jam
355	764108	9765011	IJAm	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	Jam
356	764650	9769996	IJAm	Inceptisol	Unidad Manguazo	I	Jam
55	765640	9774555	IJAp	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp
56	765908	9774661	IJAp	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp
57	766722	9772868	IJAp	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp
58	765480	9774287	IJAp	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp
59	765484	9774346	IJAp	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp
60	765373	9777110	IJAp	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp
61	765646	9777975	IJAp	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp
62	766051	9779051	IJAp	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp
63	767622	9782192	IJAp	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp
64	767273	9781609	IJAp	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp
65	768664	9784238	IJAp	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp
66	769508	9785871	IJAp	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp
67	771822	9789359	IJAp	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp
68	770952	9788933	IJAp	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp
69	770291	9788230	IJAp	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp
70	770478	9786850	IJAp	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp
71	771466	9787645	IJAp	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp
72	771871	9788702	IJAp	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp

227	759714	9757581	IJA	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp
228	761027	9760099	IJA	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp
229	761848	9762228	IJA	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp
230	762955	9764357	IJA	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp
231	763700	9767430	IJA	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp
232	763449	9768372	IJA	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp
233	763491	9769267	IJA	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp
234	763887	9769918	IJA	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp
235	764398	9770926	IJA	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp
236	764413	9771648	IJA	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp
357	773459	9793497	IJA	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp
358	773275	9793714	IJA	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp
359	773194	9794352	IJA	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp
360	773014	9794723	IJA	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp
361	773263	9794588	IJA	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp
362	773126	9794938	IJA	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp
363	772885	9795034	IJA	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp
364	772544	9795100	IJA	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp
365	772250	9795127	IJA	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp
366	771856	9795295	IJA	Inceptisol	Unidad Pelpetec	I	JAp
145	765001	9777139	IJG	Inceptisol	Unidad Cebadas	I	JGc
146	765100	9777827	IJG	Inceptisol	Unidad Cebadas	I	JGc
147	765309	9779027	IJG	Inceptisol	Unidad Cebadas	I	JGc
148	764814	9778609	IJG	Inceptisol	Unidad Cebadas	I	JGc
149	764968	9778873	IJG	Inceptisol	Unidad Cebadas	I	JGc
150	765857	9780714	IJG	Inceptisol	Unidad Cebadas	I	JGc
151	765504	9780849	IJG	Inceptisol	Unidad Cebadas	I	JGc
152	765708	9780851	IJG	Inceptisol	Unidad Cebadas	I	JGc
153	767111	9783139	IJG	Inceptisol	Unidad Cebadas	I	JGc
154	766000	9783543	IJG	Inceptisol	Unidad Cebadas	I	JGc
155	767102	9783428	IJG	Inceptisol	Unidad Cebadas	I	JGc
156	767286	9785189	IJG	Inceptisol	Unidad Cebadas	I	JGc
157	767181	9785605	IJG	Inceptisol	Unidad Cebadas	I	JGc
158	767278	9785299	IJG	Inceptisol	Unidad Cebadas	I	JGc
159	765553	9787652	IJG	Inceptisol	Unidad Cebadas	I	JGc
160	765461	9787962	IJG	Inceptisol	Unidad Cebadas	I	JGc
161	769057	9789335	IJG	Inceptisol	Unidad Cebadas	I	JGc
162	768999	9789131	IJG	Inceptisol	Unidad Cebadas	I	JGc
367	762719	9768258	IJG	Inceptisol	Unidad Guasuntos	I	JGp
368	762668	9768766	IJG	Inceptisol	Unidad Guasuntos	I	JGp
369	762916	9769344	IJG	Inceptisol	Unidad Guasuntos	I	JGp
370	762458	9769547	IJG	Inceptisol	Unidad Guasuntos	I	JGp
371	762370	9770063	IJG	Inceptisol	Unidad Guasuntos	I	JGp
372	762058	9770531	IJG	Inceptisol	Unidad Guasuntos	I	JGp
373	761341	9770188	IJG	Inceptisol	Unidad Guasuntos	I	JGp
374	761646	9771242	IJG	Inceptisol	Unidad Guasuntos	I	JGp
375	760299	9770214	IJG	Inceptisol	Unidad Guasuntos	I	JGp
376	761201	9770988	IJG	Inceptisol	Unidad Guasuntos	I	JGp
407	740326	9806525	IKy	Inceptisol	Unidad Yunguilla	I	Ky
408	739204	9808448	IKy	Inceptisol	Unidad Yunguilla	I	Ky

409	740616	9810901	IKy	Inceptisol	Unidad Yunguilla	I	Ky
410	740829	9812841	IKy	Inceptisol	Unidad Yunguilla	I	Ky
411	741595	9813586	IKy	Inceptisol	Unidad Yunguilla	I	Ky
412	742295	9813806	IKy	Inceptisol	Unidad Yunguilla	I	Ky
413	741212	9814888	IKy	Inceptisol	Unidad Yunguilla	I	Ky
414	741967	9815660	IKy	Inceptisol	Unidad Yunguilla	I	Ky
415	741450	9816466	IKy	Inceptisol	Unidad Yunguilla	I	Ky
416	742268	9817054	IKy	Inceptisol	Unidad Yunguilla	I	Ky
377	760869	9771475	IMcn	Inceptisol	Formación Cisarán	I	Mcn
378	759889	9772876	IMcn	Inceptisol	Formación Cisarán	I	Mcn
379	743465	9780056	IMcn	Inceptisol	Formación Cisarán	I	Mcn
380	743514	9785971	IMcn	Inceptisol	Formación Cisarán	I	Mcn
381	741121	9790021	IMcn	Inceptisol	Formación Cisarán	I	Mcn
382	742089	9795189	IMcn	Inceptisol	Formación Cisarán	I	Mcn
383	742753	9800008	IMcn	Inceptisol	Formación Cisarán	I	Mcn
384	740928	9801284	IMcn	Inceptisol	Formación Cisarán	I	Mcn
385	740918	9803570	IMcn	Inceptisol	Formación Cisarán	I	Mcn
386	742115	9806166	IMcn	Inceptisol	Formación Cisarán	I	Mcn
37	774294	9758209	IMTq	Inceptisol	Formación Tarqui	I	MTq
38	766776	9775359	IMTq	Inceptisol	Formación Tarqui	I	MTq
39	771047	9774994	IMTq	Inceptisol	Formación Tarqui	I	MTq
40	770499	9765614	IMTq	Inceptisol	Formación Tarqui	I	MTq
41	770227	9764599	IMTq	Inceptisol	Formación Tarqui	I	MTq
42	770753	9763523	IMTq	Inceptisol	Formación Tarqui	I	MTq
43	777378	9775203	IMTq	Inceptisol	Formación Tarqui	I	MTq
44	774756	9758123	IMTq	Inceptisol	Formación Tarqui	I	MTq
45	765861	9746463	IMTq	Inceptisol	Formación Tarqui	I	MTq
46	766360	9745945	IMTq	Inceptisol	Formación Tarqui	I	MTq
47	766939	9745462	IMTq	Inceptisol	Formación Tarqui	I	MTq
48	774435	9758113	IMTq	Inceptisol	Formación Tarqui	I	MTq
49	766718	9748057	IMTq	Inceptisol	Formación Tarqui	I	MTq
50	774578	9758115	IMTq	Inceptisol	Formación Tarqui	I	MTq
51	775189	9788701	IMTq	Inceptisol	Formación Tarqui	I	MTq
52	778218	9784673	IMTq	Inceptisol	Formación Tarqui	I	MTq
53	768609	9746247	IMTq	Inceptisol	Formación Tarqui	I	MTq
54	766609	9774560	IMTq	Inceptisol	Formación Tarqui	I	MTq
337	760296	9753777	IMTq	Inceptisol	Formación Tarqui	I	MTq
338	760963	9754952	IMTq	Inceptisol	Formación Tarqui	I	MTq
339	762106	9753798	IMTq	Inceptisol	Formación Tarqui	I	MTq
340	763323	9753142	IMTq	Inceptisol	Formación Tarqui	I	MTq
341	763415	9761899	IMTq	Inceptisol	Formación Tarqui	I	MTq
342	763598	9763020	IMTq	Inceptisol	Formación Tarqui	I	MTq
343	764063	9760852	IMTq	Inceptisol	Formación Tarqui	I	MTq
344	764064	9752930	IMTq	Inceptisol	Formación Tarqui	I	MTq
345	766415	9761516	IMTq	Inceptisol	Formación Tarqui	I	MTq
346	766914	9760942	IMTq	Inceptisol	Formación Tarqui	I	MTq
267	771260	9795908	IPA	Inceptisol	Volcánicos del Altar	I	PA
268	771699	9798610	IPA	Inceptisol	Volcánicos del Altar	I	PA
269	772482	9798906	IPA	Inceptisol	Volcánicos del Altar	I	PA
270	773370	9803176	IPA	Inceptisol	Volcánicos del Altar	I	PA

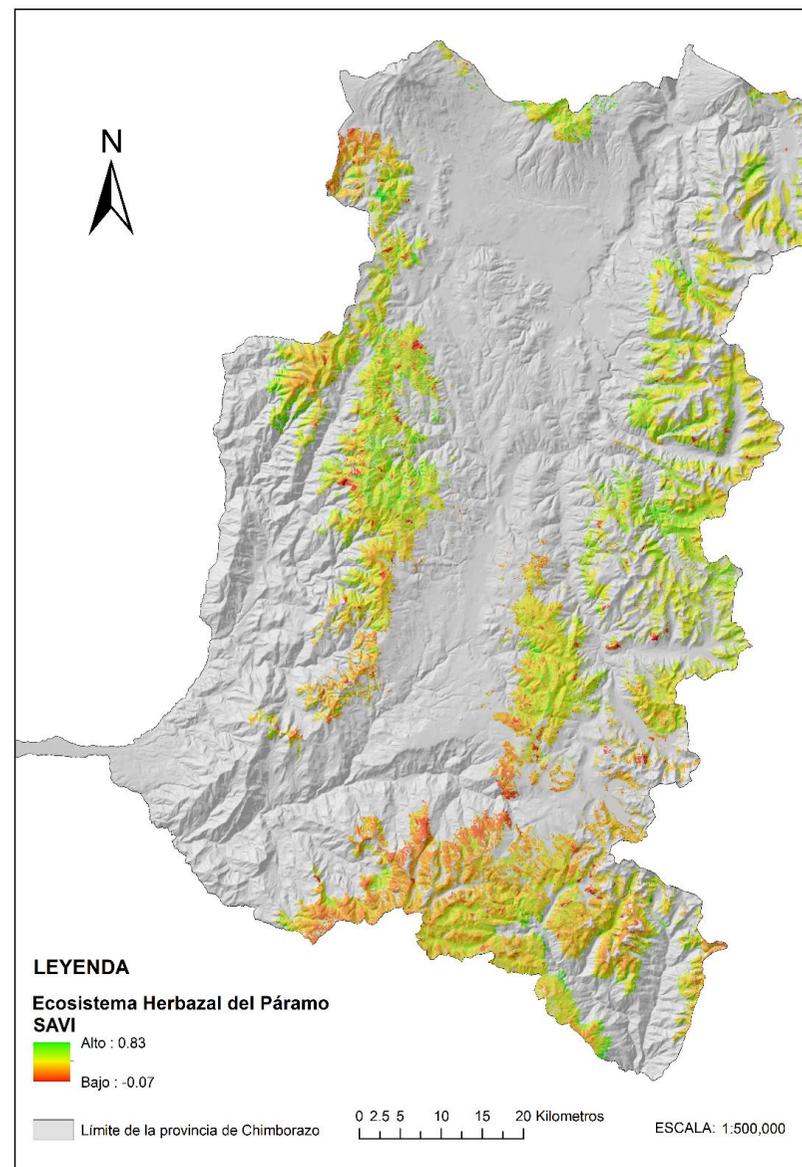
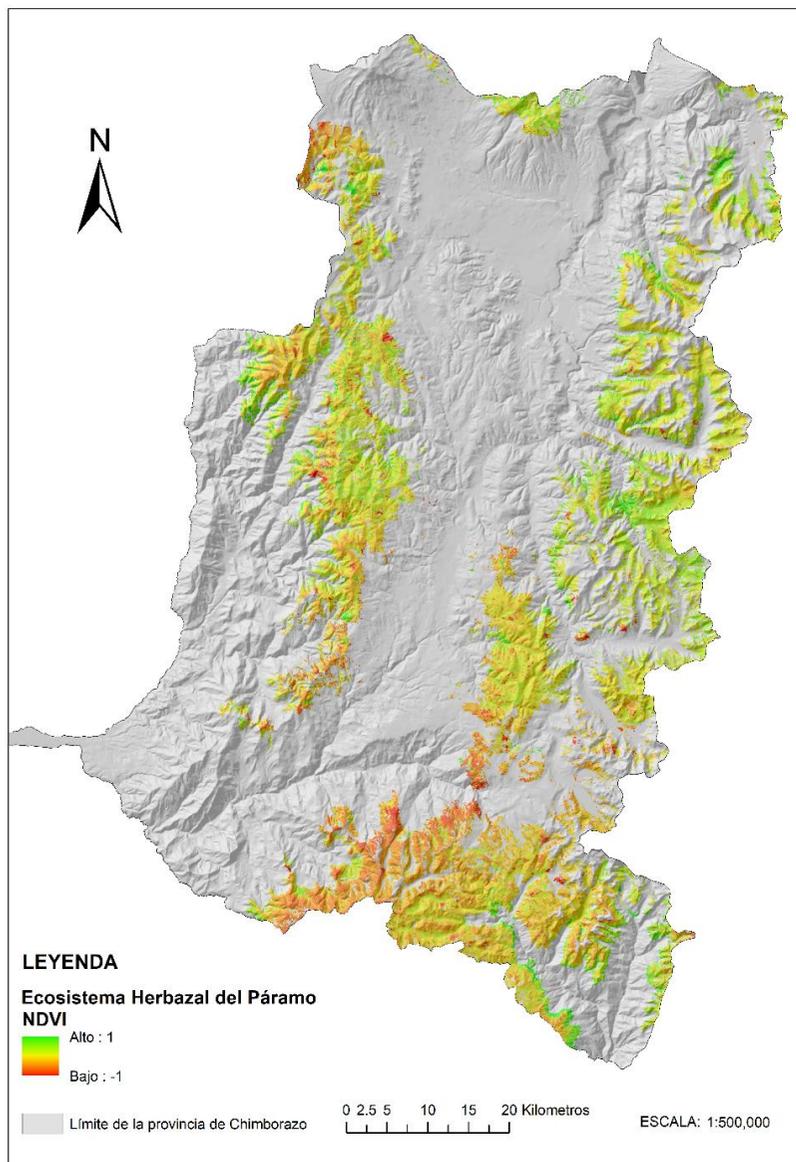
271	775256	9802918	IPA	Inceptisol	Volcánicos del Altar	I	PA
272	775826	9802137	IPA	Inceptisol	Volcánicos del Altar	I	PA
273	773753	9802739	IPA	Inceptisol	Volcánicos del Altar	I	PA
274	774283	9805887	IPA	Inceptisol	Volcánicos del Altar	I	PA
275	775093	9806178	IPA	Inceptisol	Volcánicos del Altar	I	PA
276	775923	9805920	IPA	Inceptisol	Volcánicos del Altar	I	PA
427	741776	9828719	IPC3	Inceptisol	Piroclásticos del Chimborazo	I	PC3
428	740723	9828092	IPC3	Inceptisol	Piroclásticos del Chimborazo	I	PC3
429	739715	9827991	IPC3	Inceptisol	Piroclásticos del Chimborazo	I	PC3
430	739337	9828821	IPC3	Inceptisol	Piroclásticos del Chimborazo	I	PC3
431	738629	9829313	IPC3	Inceptisol	Piroclásticos del Chimborazo	I	PC3
432	740095	9829013	IPC3	Inceptisol	Piroclásticos del Chimborazo	I	PC3
433	740524	9829328	IPC3	Inceptisol	Piroclásticos del Chimborazo	I	PC3
434	740338	9829773	IPC3	Inceptisol	Piroclásticos del Chimborazo	I	PC3
435	739680	9829804	IPC3	Inceptisol	Piroclásticos del Chimborazo	I	PC3
436	739919	9830251	IPC3	Inceptisol	Piroclásticos del Chimborazo	I	PC3
417	738064	9810322	IPCEa	Inceptisol	Grupo Angamarca (Formación Apagua)	I	PcEa
418	739894	9812798	IPCEa	Inceptisol	Grupo Angamarca (Formación Apagua)	I	PcEa
419	740565	9818753	IPCEa	Inceptisol	Grupo Angamarca (Formación Apagua)	I	PcEa
420	740858	9820455	IPCEa	Inceptisol	Grupo Angamarca (Formación Apagua)	I	PcEa
421	741189	9821852	IPCEa	Inceptisol	Grupo Angamarca (Formación Apagua)	I	PcEa
422	742240	9823222	IPCEa	Inceptisol	Grupo Angamarca (Formación Apagua)	I	PcEa
423	741549	9824837	IPCEa	Inceptisol	Grupo Angamarca (Formación Apagua)	I	PcEa
423	741401	9825846	IPCEa	Inceptisol	Grupo Angamarca (Formación Apagua)	I	PcEa
424	743656	9825680	IPCEa	Inceptisol	Grupo Angamarca (Formación Apagua)	I	PcEa
426	742273	9827082	IPCEa	Inceptisol	Grupo Angamarca (Formación Apagua)	I	PcEa
447	758490	9833784	IPLi	Inceptisol	Volcánicos del Mulmul, Huilsa e Igualata	I	Pli
448	758922	9832397	IPLi	Inceptisol	Volcánicos del Mulmul, Huilsa e Igualata	I	Pli
449	760753	9832849	IPLi	Inceptisol	Volcánicos del Mulmul, Huilsa e Igualata	I	Pli
450	761507	9832104	IPLi	Inceptisol	Volcánicos del Mulmul, Huilsa e Igualata	I	Pli
451	762627	9831744	IPLi	Inceptisol	Volcánicos del Mulmul, Huilsa e Igualata	I	Pli
452	762778	9830285	IPLi	Inceptisol	Volcánicos del Mulmul, Huilsa e Igualata	I	Pli
453	764268	9829676	IPLi	Inceptisol	Volcánicos del Mulmul, Huilsa e Igualata	I	Pli
454	764890	9830570	IPLi	Inceptisol	Volcánicos del Mulmul, Huilsa e Igualata	I	Pli
455	766026	9831560	IPLi	Inceptisol	Volcánicos del Mulmul, Huilsa e Igualata	I	Pli
456	765902	9833181	IPLi	Inceptisol	Volcánicos del Mulmul, Huilsa e Igualata	I	Pli
397	743153	9778898	IQc	Inceptisol	Cangagua	I	Qc

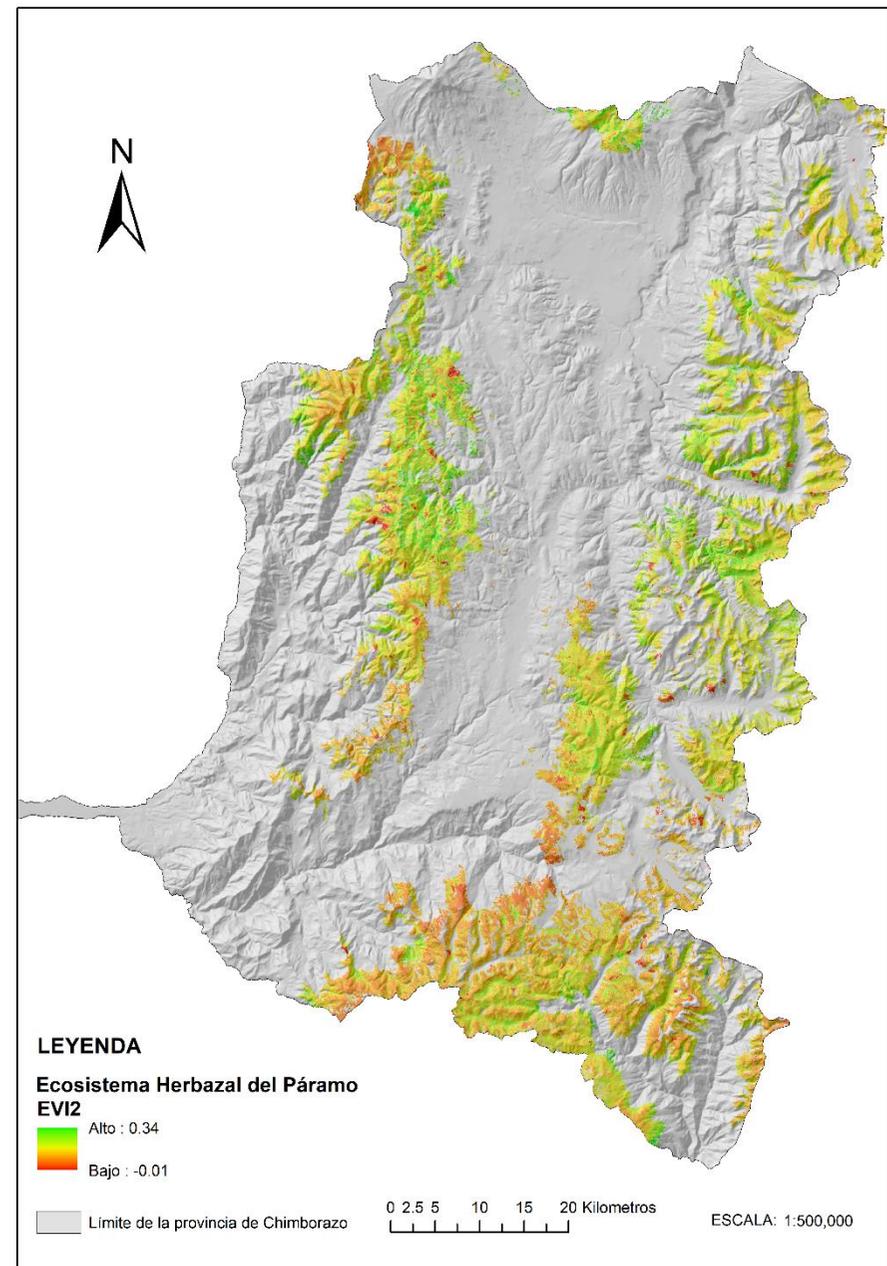
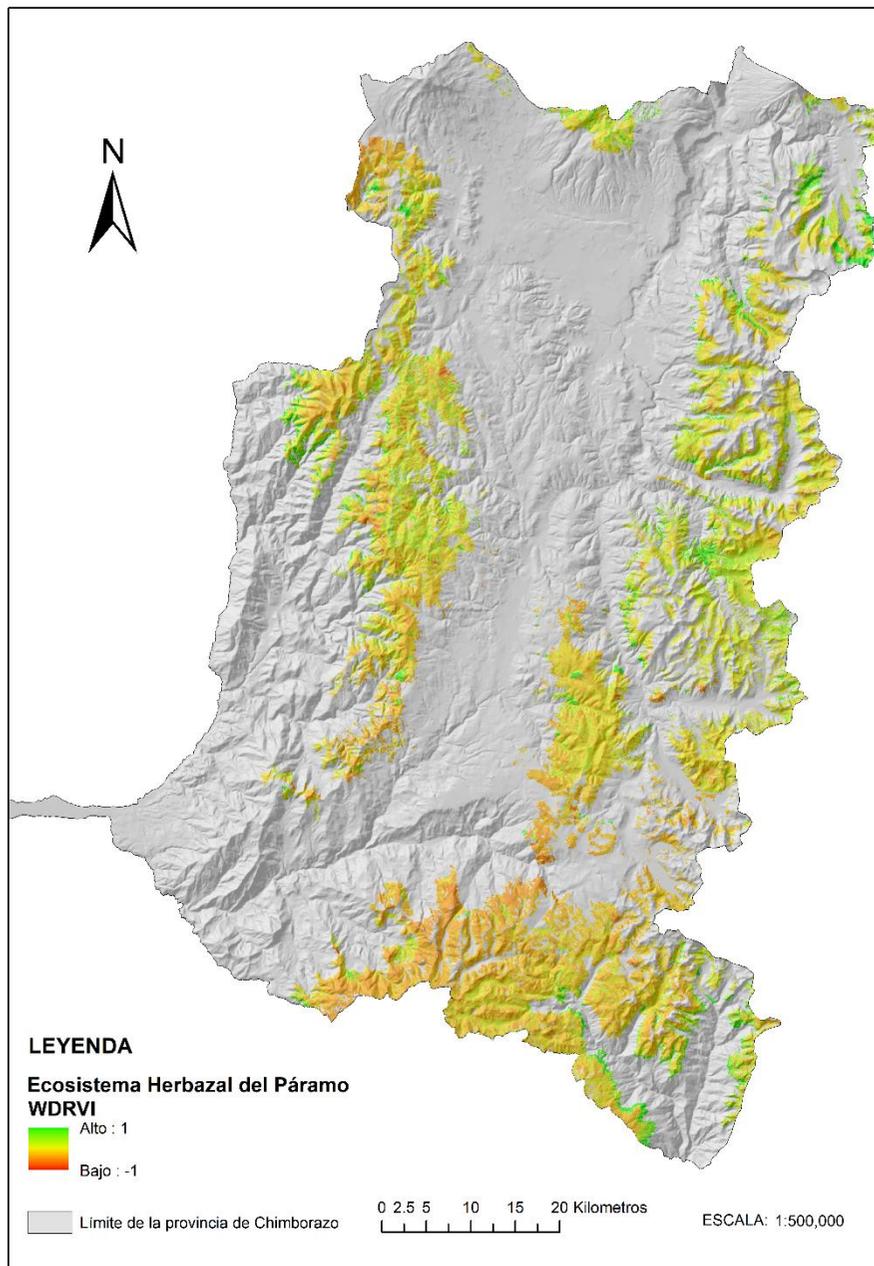
398	744149	9779400	IQc	Inceptisol	Cangagua	I	Qc
399	744110	9782176	IQc	Inceptisol	Cangagua	I	Qc
400	745228	9784848	IQc	Inceptisol	Cangagua	I	Qc
401	745487	9787158	IQc	Inceptisol	Cangagua	I	Qc
402	745495	9799780	IQc	Inceptisol	Cangagua	I	Qc
403	743746	9802240	IQc	Inceptisol	Cangagua	I	Qc
404	744650	9803324	IQc	Inceptisol	Cangagua	I	Qc
405	744574	9804799	IQc	Inceptisol	Cangagua	I	Qc
406	743538	9805983	IQc	Inceptisol	Cangagua	I	Qc
109	764970	9787888	MJGc	Mollisol	Unidad Cebadas	M	JGc
110	765051	9788009	MJGc	Mollisol	Unidad Cebadas	M	JGc
111	765388	9787989	MJGc	Mollisol	Unidad Cebadas	M	JGc
112	765500	9787673	MJGc	Mollisol	Unidad Cebadas	M	JGc
113	765953	9789191	MJGc	Mollisol	Unidad Cebadas	M	JGc
114	766117	9789003	MJGc	Mollisol	Unidad Cebadas	M	JGc
115	766090	9788624	MJGc	Mollisol	Unidad Cebadas	M	JGc
116	766878	9788946	MJGc	Mollisol	Unidad Cebadas	M	JGc
117	766773	9788626	MJGc	Mollisol	Unidad Cebadas	M	JGc
118	767492	9788181	MJGc	Mollisol	Unidad Cebadas	M	JGc
119	767511	9788297	MJGc	Mollisol	Unidad Cebadas	M	JGc
120	768667	9789814	MJGc	Mollisol	Unidad Cebadas	M	JGc
121	769310	9789586	MJGc	Mollisol	Unidad Cebadas	M	JGc
122	769767	9789683	MJGc	Mollisol	Unidad Cebadas	M	JGc
123	770401	9789760	MJGc	Mollisol	Unidad Cebadas	M	JGc
124	769042	9789439	MJGc	Mollisol	Unidad Cebadas	M	JGc
125	768585	9790407	MJGc	Mollisol	Unidad Cebadas	M	JGc
126	768495	9790289	MJGc	Mollisol	Unidad Cebadas	M	JGc
387	758505	9771480	MMcn	Mollisol	Formación Cisarán	M	Mcn
388	757453	9773058	MMcn	Mollisol	Formación Cisarán	M	Mcn
389	759233	9773550	MMcn	Mollisol	Formación Cisarán	M	Mcn
390	758597	9774235	MMcn	Mollisol	Formación Cisarán	M	Mcn
391	758694	9775800	MMcn	Mollisol	Formación Cisarán	M	Mcn
392	759461	9776468	MMcn	Mollisol	Formación Cisarán	M	Mcn
393	758495	9777446	MMcn	Mollisol	Formación Cisarán	M	Mcn
394	760077	9777193	MMcn	Mollisol	Formación Cisarán	M	Mcn
395	759230	9778176	MMcn	Mollisol	Formación Cisarán	M	Mcn
396	760128	9779030	MMcn	Mollisol	Formación Cisarán	M	Mcn
287	770840	9795698	MPA	Mollisol	Volcánicos del Altar	M	PA
288	771257	9798894	MPA	Mollisol	Volcánicos del Altar	M	PA
289	771004	9799011	MPA	Mollisol	Volcánicos del Altar	M	PA
290	771709	9798693	MPA	Mollisol	Volcánicos del Altar	M	PA
291	771964	9798934	MPA	Mollisol	Volcánicos del Altar	M	PA
292	772345	9798775	MPA	Mollisol	Volcánicos del Altar	M	PA
293	772747	9802733	MPA	Mollisol	Volcánicos del Altar	M	PA
294	772469	9802887	MPA	Mollisol	Volcánicos del Altar	M	PA
295	773234	9802892	MPA	Mollisol	Volcánicos del Altar	M	PA
296	772800	9803093	MPA	Mollisol	Volcánicos del Altar	M	PA
F1	759179	9740087	Edg	Andosoles	Formación Alausí	A	Pg
F2	759429	9739837	Edg	Andosoles	Formación Alausí	A	Pg
F3	759179	9739837	Edg	Andosoles	Formación Alausí	A	Pg

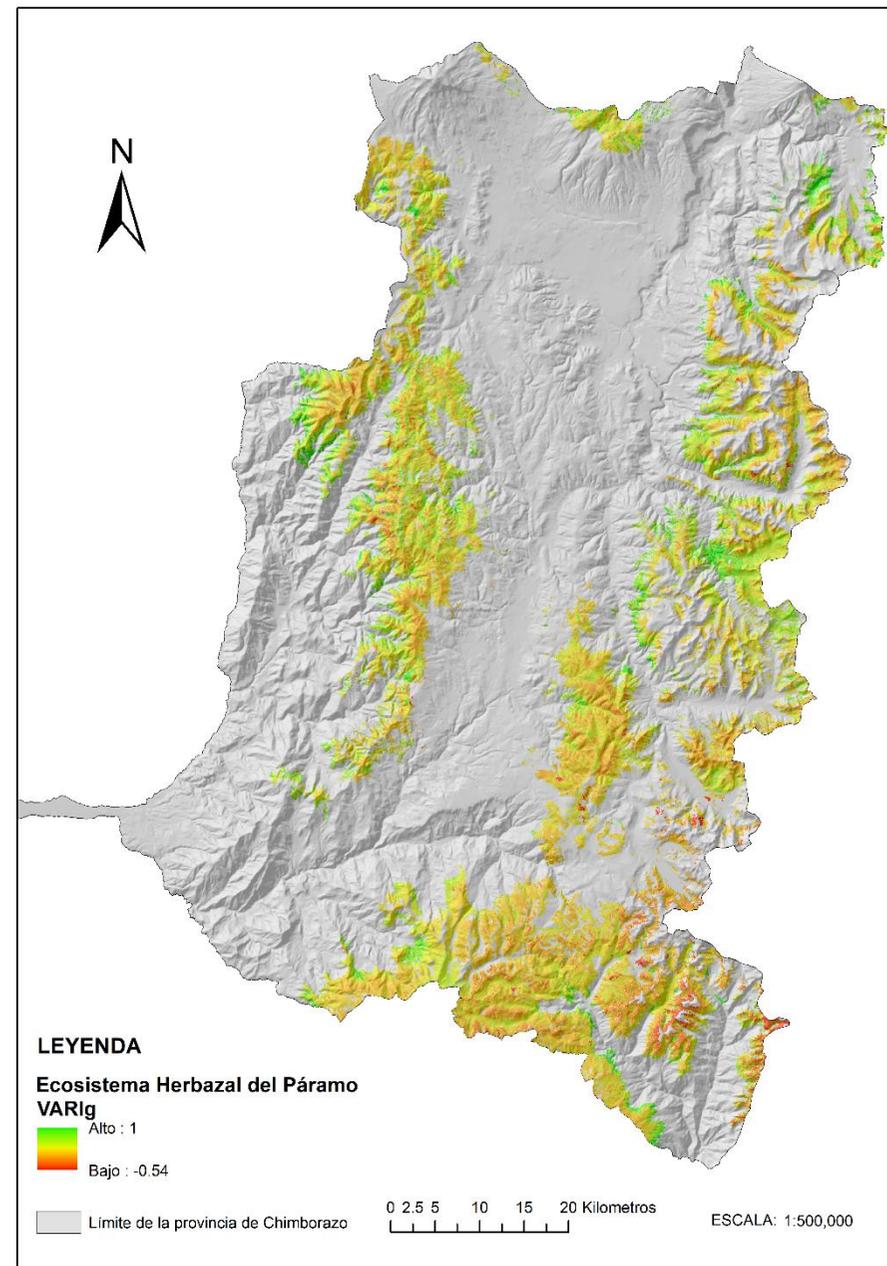
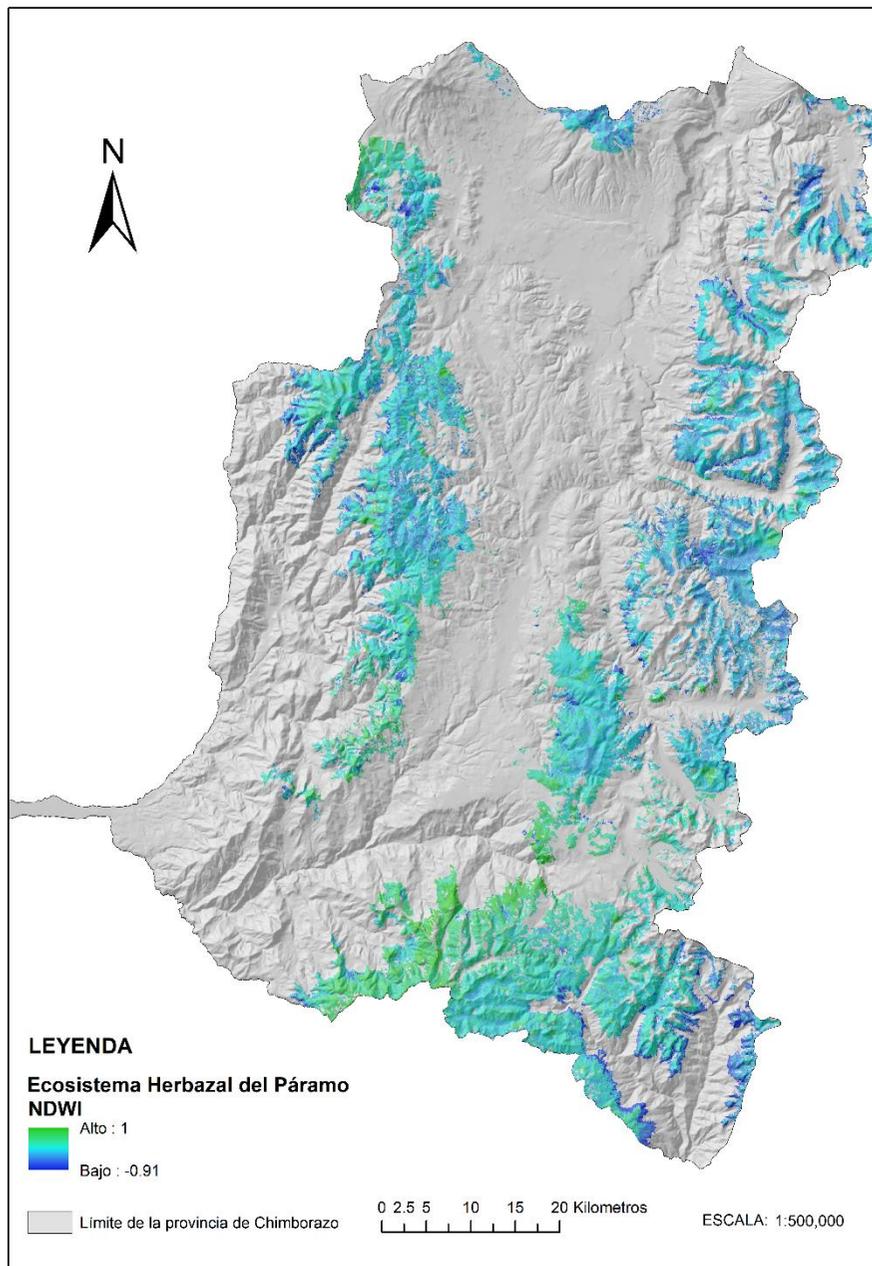
F4	759038	9736130	Edg	Andosoles	Formación Alausí	A	Pg
F5	758786	9736382	Edg	Andosoles	Formación Alausí	A	Pg
F6	758788	9736132	Edg	Andosoles	Formación Alausí	A	Pg
F7	767484	9749854	Edg	Andosoles	Formación Alausí	A	Pg
F8	767483	9750105	Edg	Andosoles	Formación Alausí	A	Pg
F9	767734	9749853	Edg	Andosoles	Formación Alausí	A	Pg
F10	764921	9749597	Edg	Andosoles	Formación Alausí	A	Pg
F11	764921	9749347	Edg	Andosoles	Formación Alausí	A	Pg
F12	765171	9749347	Edg	Andosoles	Formación Alausí	A	Pg
F13	747973	9743065	Edg	Andosoles	Formación Alausí	A	Pg
F14	747723	9743064	Edg	Andosoles	Formación Alausí	A	Pg
F15	747723	9743315	Edg	Andosoles	Formación Alausí	A	Pg
F16	758771	9733251	Edg	Andosoles	Formación Alausí	A	Pg
F17	758771	9733001	Edg	Andosoles	Formación Alausí	A	Pg
F18	759021	9733001	Edg	Andosoles	Formación Alausí	A	Pg
F19	753673	9738616	Edg	Andosoles	Formación Alausí	A	Pg
F20	753925	9738613	Edg	Andosoles	Formación Alausí	A	Pg
F21	753671	9738866	Edg	Andosoles	Formación Alausí	A	Pg
F22	755726	9732916	Edg	Andosoles	Formación Alausí	A	Pg
F23	755726	9732665	Edg	Andosoles	Formación Alausí	A	Pg
F24	755981	9732663	Edg	Andosoles	Formación Alausí	A	Pg
F25	763050	9737830	Edg	Andosoles	Formación Alausí	A	Pg
F26	763047	9738086	Edg	Andosoles	Formación Alausí	A	Pg
F27	763302	9737829	Edg	Andosoles	Formación Alausí	A	Pg
F28	755925	9744597	Edg	Andosoles	Formación Alausí	A	Pg
F29	755678	9744592	Edg	Andosoles	Formación Alausí	A	Pg
F30	755678	9744845	Edg	Andosoles	Formación Alausí	A	Pg
F31	760796	9747358	Edg	Andosoles	Formación Alausí	A	Pg
F32	760793	9747609	Edg	Andosoles	Formación Alausí	A	Pg
F33	761042	9747358	Edg	Andosoles	Formación Alausí	A	Pg

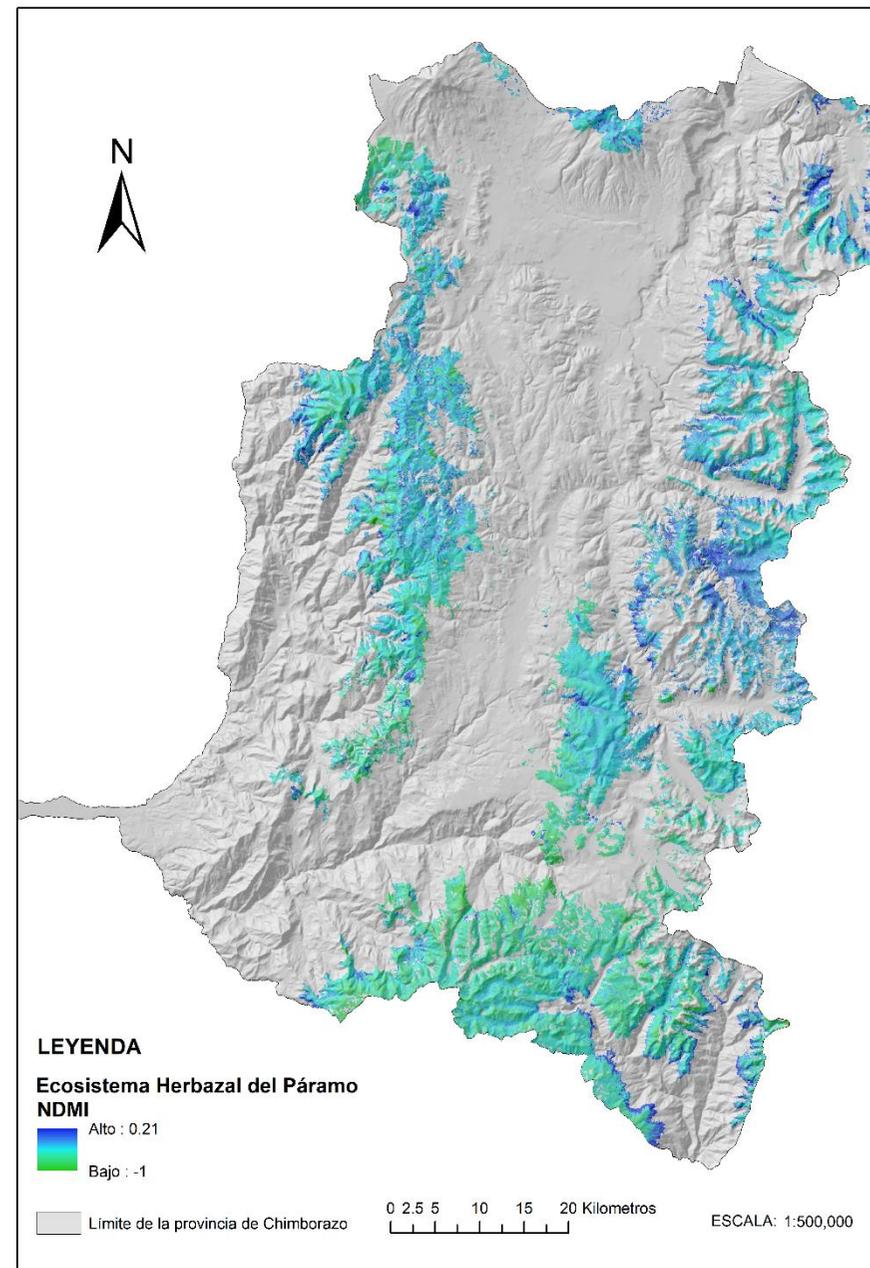
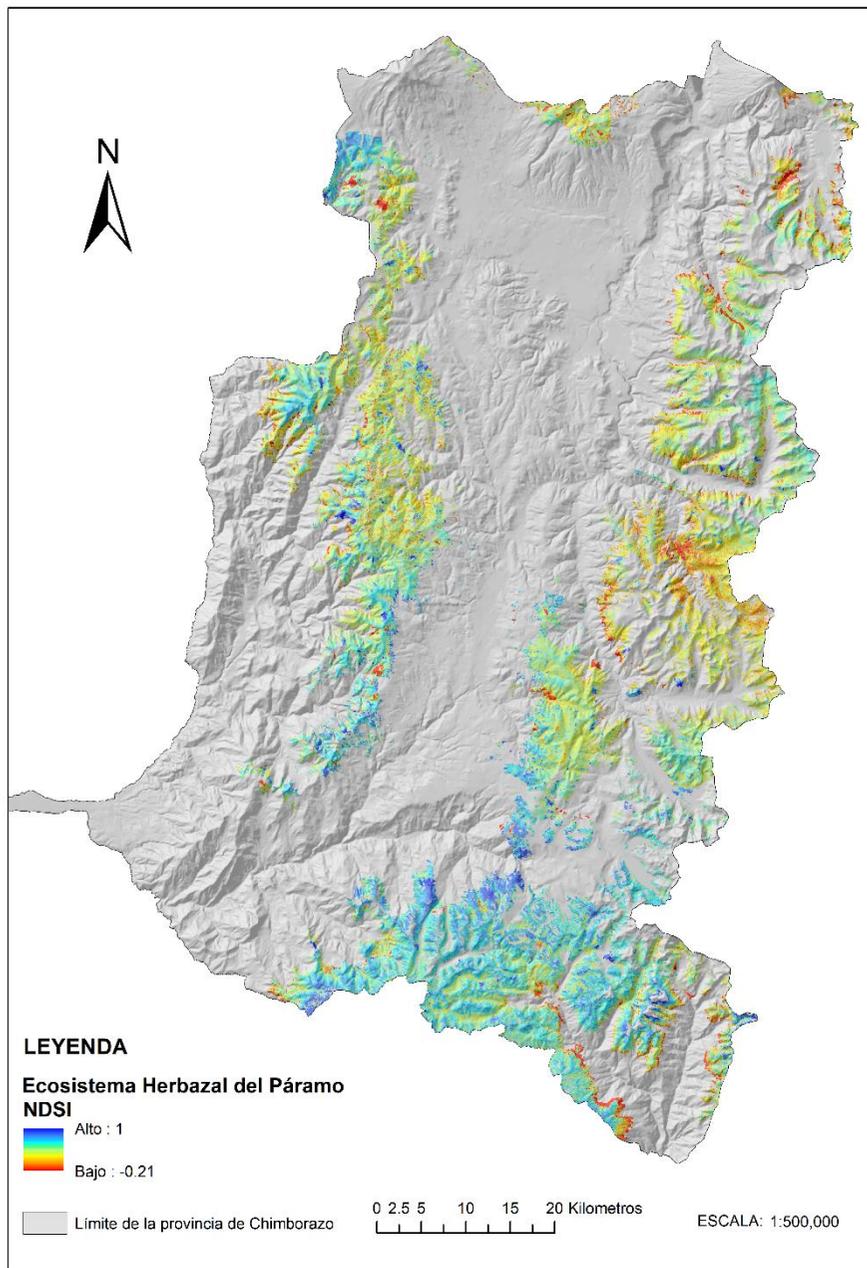
Anexo B

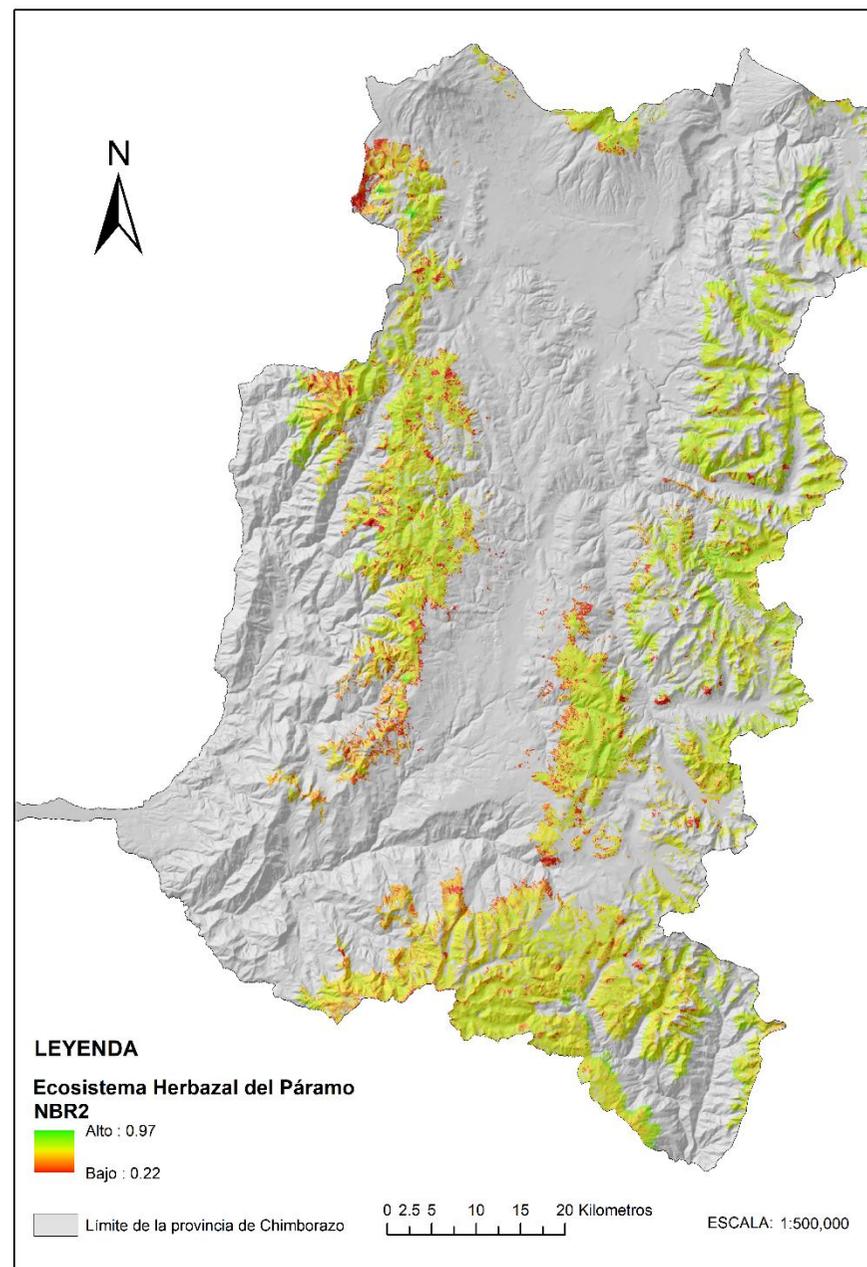
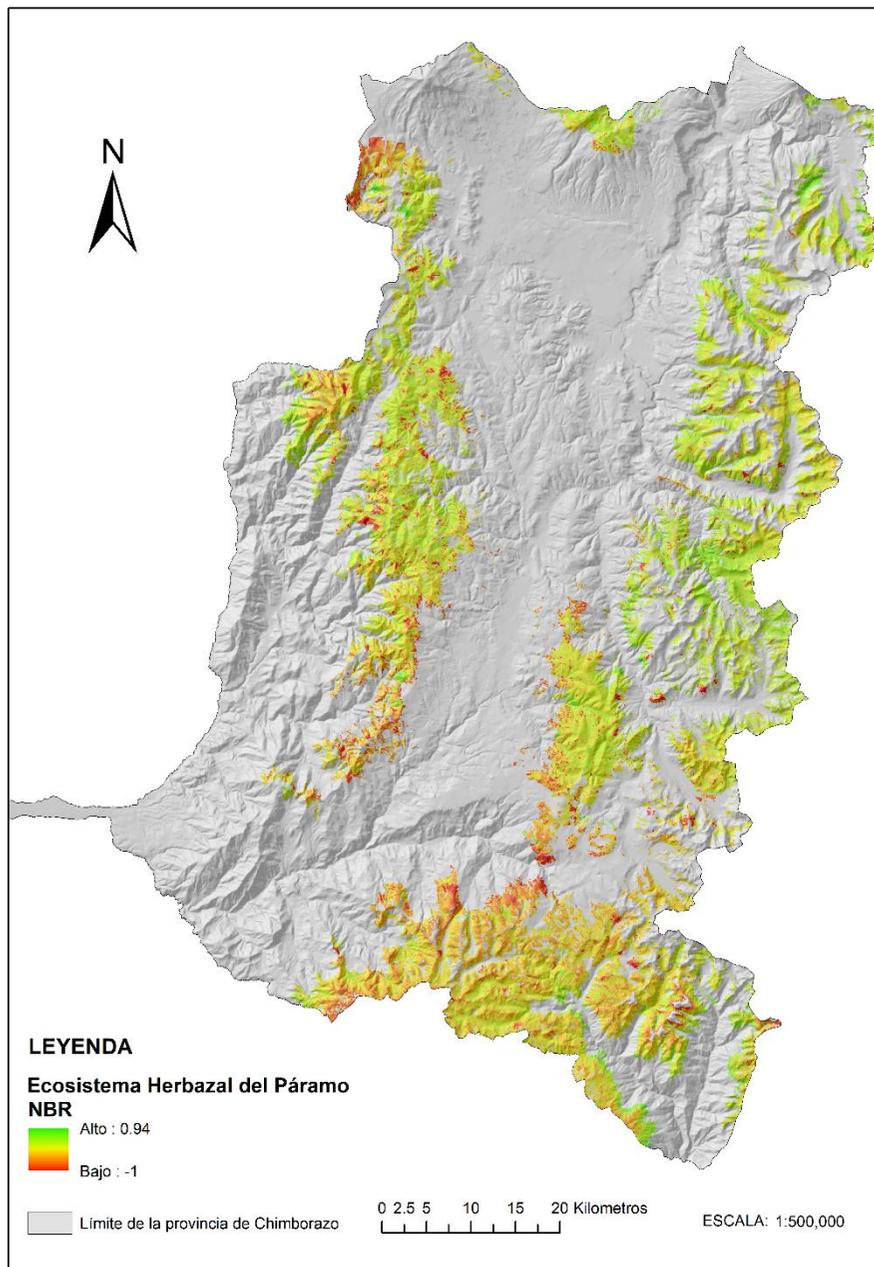
Índices Espectrales











Anexo C

Estaciones meteorológicas usadas para la estimación de la superficie de temperatura en el Ecosistema Herbazal del Páramo - HP

CÓDIGO ID	ALTITUD	ALTITUD (msnm)	INTITUCIÓN PROPIETARIO
M0129	CALUMA	350	INAMHI
M0130	CHILLANES	2330	INAMHI
M0136	CHUNCHI	2177	INAMHI
M0391	PALLATANGA	1523	INAMHI
M1117	INSTITUTO TECNICO 3 DE MARZO	2504	INAMHI
M1095	INGENIO AZTRA (LA TRONCAL)	50	INAMHI
M0031	CAÑAR	3083	INAMHI
M1260	QUIMIAG	2725	INAMHI
M1261	ILAPO	3466	INAMHI
M0029	BAÑOS	1695	INAMHI
M0126	PATATE	2220	INAMHI
M0128	PEDRO FERMIN CEVALLOS(COLEGIO)	2910	INAMHI
M0133	GUASLAN	2850	INAMHI
M0258	QUEROCHACA(UTA)	2865	INAMHI
M1036	RIOBAMBA POLITECNICA-SPOCH	2850	INAMHI
M1069	CALAMACA CONVENIO INAMHI HCPT	3402	INAMHI
M1130	SHIRY XII	3028	INAMHI
M1209	TOTORILLAS	3207	INAMHI
M1243	CUNCHIBAMBA-ITLAM (INST.LUIS A. MARTINEZ)	2688	INAMHI
M0137	BIBLIAN	2640	INAMHI
M0189	GUALAQUIZA INAMHI	750	INAMHI
M1040	MACAS SAN ISIDRO-PNS	1110	INAMHI
M1265	SAN JOSE DE MORONA-INAMHI-COL.REAL AUDIENCIA	200	INAMHI
M5140	ACHUPALLAS	3376	UNACH
M5138	JUBAL	3462	UNACH
M5139	OZOGOCHÉ	3790	UNACH

Estaciones meteorológicas con pluviómetro, usadas para la estimación de la superficie de precipitación en el Ecosistema Herbazal del Páramo - HP

CÓDIGO	NOMBRE	ALTITUD (msnm)	INSTITUCIÓN PROPIETARIO
M0029	BAÑOS	1695	INAMHI
M0031	CAÑAR	3083	INAMHI
M0126	PATATE	2220	INAMHI
M0128	PEDRO FERMIN CEVALLOS(COLEGIO)	2910	INAMHI
M0129	CALUMA	350	INAMHI
M0130	CHILLANES	2330	INAMHI
M0133	GUASLAN	2850	INAMHI

M0136	CHUNCHI	2177	INAMHI
M0137	BIBLIAN	2640	INAMHI
M0189	GUALAQUIZA INAMHI	750	INAMHI
M0197	JACARIN (SOLANO)	2700	INAMHI
M0258	QUEROCHACA(UTA)	2865	INAMHI
M0376	PILAHUIN	3314	INAMHI
M0377	TISALEO	3266	INAMHI
M0378	RIO VERDE	1529	INAMHI
M0380	HUAMBALO	2880	INAMHI
M0383	ECHEANDIA	308	INAMHI
M0385	SALINAS-BOLIVAR	3600	INAMHI
M0388	RIO SAN ANTONIO-MONJAS	2200	INAMHI
M0390	URBINA	3610	INAMHI
M0391	PALLATANGA	1523	INAMHI
M0392	HUIGRA	1331	INAMHI
M0393	SAN JUAN-CHIMBORAZO	3220	INAMHI
M0395	CEBADAS	2930	INAMHI
M0396	ALAO	3200	INAMHI
M0397	COMPUD	2402	INAMHI
M0399	ACHUPALLAS-CHIMBORAZO	3178	INAMHI
M0402	CHIMBO DJ PANGOR	2266	INAMHI
M0403	ALAUSI	2267	INAMHI
M0404	CAÑI-LIMBE	2800	INAMHI
M0405	GUASUNTOS	2438	INAMHI
M0407	LICTO	2865	INAMHI
M0408	GUANO	2620	INAMHI
M0409	PANGOR-J.DE VELASCO(H.TEPEYAC)	3109	INAMHI
M0410	RIO MAZAR-RIVERA	2450	INAMHI
M0411	INGAPIRCA	3100	INAMHI
M0412	SUSCALPAMBA(CAPILLA DOLOROSA)	2620	INAMHI
M0414	CHANIN	3270	INAMHI
M0415	ANGAS LA UNION	2900	INAMHI
M0501	MENDEZ INAMHI	665	INAMHI
M0535	LAS HERRERIAS	3650	INAMHI
M0794	LAS NAVES	108	INAMHI
M1036	RIOBAMBA POLITECNICA-SPOCH	2850	INAMHI
M1040	MACAS SAN ISIDRO-PNS	1110	INAMHI
M1069	CALAMACA CONVENIO INAMHI HCPT	3402	INAMHI
M1095	INGENIO AZTRA (LA TRONCAL)	50	INAMHI
M1107	LAGUACOTO-GUARANDA	2608	INAMHI
M1117	INSTITUTO TECNICO 3 DE MARZO	2504	INAMHI
M1130	SHIRY XII	3028	INAMHI
M1155	LAS MONJAS (CEDEGE)	1497	INAMHI
M1209	TOTORILLAS	3207	INAMHI
M1243	CUNCHIBAMBA-ITLAM (INST.LUIS A. MARTINEZ)	2688	INAMHI
M1260	QUIMIAG	2725	INAMHI

M1261	ILAPO SAN JOSE DE MORONA-INAMHI-COL.REAL	3466	INAMHI
M1265	AUDIENCIA	200	INAMHI
M5140	ACHUPALLAS	3376	UNACH
M5138	JUBAL	3462	UNACH
M5139	OZOGOCHÉ	3790	UNACH
