

## IDENTIFICACIÓN DE LA HOJA DE RUTA Y PROCEDIMIENTOS PARA LA ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS DE PÁRAMOS Y HUMEDALES

Contrato No.: 07-17/051-14/331-137PS para “Prestar los servicios profesionales para identificar la hoja de ruta y procedimientos para estimar el contenido de carbono en páramos y humedales a través del análisis de los datos disponibles en estudios semidetallados en suelos de páramos y humedales”

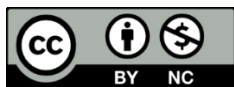
1

### **Autores por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi:**

Angie Fernanda Arias Monsalve, Arturo Agustín Chávez, Carlos Julio Fernández, Diana Jiseth Querubín Gonzales, Ignacio Arias Burgos, Joan Sebastián Gutiérrez, Johans Sebastián Molina Acosta, Leidy Catalina Camacho, Lizet Jimena Robayo Rocha, Ruby Hernández, Silvia Marcela Caguasango Eraso, Yamid Manuel Moreno Torres (Profesionales Temáticos), Camilo Andrés Camacho Hilarión (Profesionales de Apoyo (GIT Geomática))

Juan Antonio Nieto Escalante (Director General), Germán Darío Álvarez Lucero (Subdirector de Agrología), Napoleón Ordóñez Delgado (Coordinador GIT de Levantamientos y Aplicaciones Agrológicas), Adriana Bolívar Gamboa (Responsable de Proyecto), Erika Alejandra Medina Castellanos (Líder del Proyecto).

Supervisor: Juan Pablo Romero Rodríguez, Investigador Asistente III, Proyecto Páramos, Biodiversidad y Recursos Hídricos en los Andes del Norte



[Atribución-No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

### **Entidades financiadores**



**MINAMBIENTE**

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible



Delegación de la Unión Europea en Colombia

Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt  
Bogotá, D.C., 2018

Identificación de la hoja de ruta y procedimientos para la estimación del contenido de carbono orgánico en suelos de páramos y humedales = Identification of the roadmap and procedures for estimating organic carbon content in páramos and wetland soils – Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 2018.

150 p.

Incluye bibliografía, tablas, mapas, fotos a color

1. Carbono orgánico 2. Carbono 3. Páramo 4. Humedal 5. Suelo  
6. Biodiversidad 7. Cambio climático 8. Gestión de páramos I. Arias Monsalve, Angie Fernanda II. Chávez, Arturo Agustín III. Fernández, Carlos Julio IV. Querubín Gonzales, Diana Jiseth V. Arias Burgos, Ignacio VI. Gutiérrez, Joan Sebastián VII. Molina Acosta, Johans Sebastián VIII. Camacho, Leidy Catalina IX. Robayo Rocha, Lizet Jimena X. Hernández, Ruby XI. Caguasango Eraso, Silvia Marcela XII. Moreno Torres, Yamid Manuel XIII. Camacho Hilarión, Camilo Andrés XIV. Instituto Geográfico Agustín Codazzi XV. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt

## 1. Resumen

El documento presenta un marco conceptual robusto que muestra la relación entre la estructura del suelo los contenidos de carbono orgánico del mismo y con base en este desarrolla un grupo de procedimientos técnicos divididos en tres fases; pre campo, campo y post campo. El resultado de estos procedimientos es el carbono orgánico que contienen los suelos de Páramos y Humedales del área que se esté trabajando.

3

**Palabras clave:** Carbono orgánico, carbono, páramo, humedal, suelo, biodiversidad, cambio climático, campo, procedimiento, gestión de páramos

## 2. Abstract

The document presents a robust conceptual framework that shows the relationship between the soil structure and its organic carbon contents and, based on this, develops a group of technical procedures divided into three phases; pre field, field and post field. The result of these procedures is the organic carbon contained in the soils of Páramos and Humedales of the area that is being worked on.

**Keywords:** Organic carbon, carbon, moor, wetland, soil, biodiversity, climate change, field, procedure, moors management

## CONTENIDO

1.	Resumen.....	3
2.	Abstract .....	3
3.	OBJETO Y ALCANCE .....	10
4.	MARCO CONCEPTUAL .....	10
4.1	CARBONO ORGÁNICO EN EL SUELO COMO PARTE DEL CICLO GLOBAL .....	11
4.2	MONITOREO Y VERIFICACIÓN DE COS .....	12
4.2.1	Medición, reporte y verificación (MRV) .....	12
4.3	IMPORTANCIA DEL COS EN ECOSISTEMAS DE PÁRAMOS Y HUMEDALES .....	13
5.	GLOSARIO Y UNIDADES .....	14
5.1	GLOSARIO .....	14
5.2	UNIDADES.....	19
4.	ACRÓNIMOS Y SIGLAS .....	20
5.	DESARROLLO .....	20
5.1	FASE DE PRECAMPO .....	20
5.1.1	Definición y localización geográfica del área de estudio .....	20
5.1.2	Elaboración del cronograma y plan de trabajo .....	23
5.1.3	Recopilación y análisis de información e insumos .....	24
5.1.4	Establecimiento de la línea base para la cuantificación de carbono a partir de estudios existentes.....	25
5.1.5	Establecimiento de zonas homogéneas para monitoreo de carbono (ZHM) .....	28
5.1.6	Tipos de puntos de muestreo para cuantificación de carbono.....	35
5.1.7	Establecimiento de número de puntos y sitios de muestreo para cuantificación de carbono	37
5.1.8	Mapa de puntos de muestreo proyectado (monitoreo y densificación) .....	46
5.1.9	Socialización del proyecto en el área de estudio .....	48
5.1.10	Cronograma de campo.....	49
5.1.11	Insumos y materiales requeridos para campo .....	50
5.1.12	Control de calidad .....	50
5.1.13	Formatos necesarios en la fase pre-campo .....	50

5.2	FASE DE CAMPO .....	51
5.2.1	Reconocimiento preliminar.....	51
5.2.2	Ubicación del PPMG (Punto Permanente de Muestreo Georreferenciado).....	51
5.2.3	Registro de información .....	53
5.2.4	Toma de muestras.....	54
5.2.5	Fragmentos de roca.....	61
5.2.6	Envío de muestras .....	63
5.2.7	Registro fotográfico.....	63
5.3	FASE POSCAMPO .....	63
5.3.1	Análisis de muestras de suelo en laboratorio .....	63
5.3.2	Consolidación de base de datos campo y base de datos de laboratorio .....	66
5.3.3	Consolidación de base de datos final .....	66
5.3.4	Análisis de datos y generación del mapa .....	67
5.3.5	Informe técnico .....	76
5.3.6	Generación de metadato. ....	77
5.3.7	Socialización de resultados obtenidos .....	77
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	79
7.	ANEXOS .....	86

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 5.1.</b> Información de suelos recopilada del contrato 4340 de 2013 IGAC-IAvH a. Páramos y b. Humedales. Fuente: IGAC, 2018. ....	21
<b>Tabla 5.2.</b> Esquema general del cronograma de trabajo para la determinación de stock de carbono orgánico en suelos de ecosistemas de páramos y humedales. Fuente: IGAC, 2018 .....	24
<b>Tabla 5.3.</b> Número de puntos de monitoreo y densificación para ecosistemas de páramos y humedales. Fuente: IGAC, 2018 .....	37
<b>Tabla 5.4.</b> Nivel de detalle método edafológico. Fuente: IGAC, 2018 .....	38
<b>Tabla 5.5.</b> Fortalezas y debilidades método edafológico. Fuente: IGAC, 2018.....	39
<b>Tabla 5.6.</b> Correlación espacial (I de Moran) para diferentes densidades de muestreo en el distrito de páramo de Boyacá. Fuente: IGAC, 2018.....	44
<b>Tabla 5.7.</b> Fortalezas y debilidades método estadístico espacial. Fuente: IGAC, 2018 .....	45
<b>Tabla 5.8.</b> Ejemplo de cronograma de campo. Fuente: IGAC, 2018. ....	49
<b>Tabla 5.9.</b> Periodo de monitoreo en años para cada ecosistema. Fuente: IGAC, 2018.....	52
<b>Tabla 5.10.</b> Tipos de fragmentos de roca en el suelo. Fuente: IGAC, 2018.....	62
<b>Tabla 5.11.</b> Ejemplo base de datos laboratorio. Fuente: IGAC, 2018.....	66
<b>Tabla 5.12.</b> Ejemplo base de datos campo. Fuente: IGAC, 2018.....	66
<b>Tabla 5.13.</b> Ejemplo base de datos final. Fuente: IGAC, 2018 .....	67
<b>Tabla 5.14.</b> Parámetros requeridos para el cálculo de stock de COS a 30 cm de profundidad en el software R. Fuente: IGAC, 2018.....	70

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 5.1.</b> Localización geográfica de los ecosistemas de páramo en Colombia. Fuente: IGAC, 2018.....	22
<b>Figura 5.2.</b> Localización geográfica de los ecosistemas de humedales en Colombia. Fuente: IGAC, 2018.....	23
<b>Figura 5.3</b> Perfiles modales de suelos en ecosistemas de humedales en Colombia. Fuente: IGAC, 2018.....	27
<b>Figura 5.4.</b> Perfiles modales de suelos en ecosistemas de páramos en Colombia. Fuente: IGAC, 2018.....	28
<b>Figura 5.5.</b> Ejemplo de cruce de capas de cobertura y suelos. Fuente: IGAC, 2018 .....	29
<b>Figura 5.6.</b> Capas temáticas de suelos y coberturas. Fuente: IGAC, 2018. ....	30
<b>Figura 5.7.</b> Diagrama muestreo aleatorio estratificado (MAE). Fuente: IGAC, 2018 .....	31
<b>Figura 5.8.</b> Unión espacial de capas UCS y Coberturas. Fuente: IGAC, 2018 .....	31
<b>Figura 5.9.</b> Identificación de ZHM y reclasificación de polígonos. Fuente: IGAC, 2018 .....	32
<b>Figura 5.10.</b> Reclasificación de polígonos: Identificación de ZHM0, cuerpos de agua y zonas urbanas. Fuente: IGAC, 2018.....	34
<b>Figura 5.11.</b> Shape temático de Zonas Homogéneas de Monitoreo. Fuente: IGAC, 2018. ....	35
<b>Figura 5.12.</b> Diagrama de las líneas de muestreo. Fuente: IGAC, 2018. ....	36
<b>Figura 5.13.</b> Modelo general para establecimiento de puntos de densificación por método estadístico espacial. Fuente: IGAC, 2018 .....	40
<b>Figura 5.14.</b> Esquema secuencial para obtención de puntos de muestreo del universo 2. Fuente: IGAC, 2018.....	41
<b>Figura 5.15.</b> Ejemplo Mapa de puntos proyectados para etapa de campo. Fuente: IGAC, 2018.....	47
<b>Figura 5.16.</b> Esquema general de socialización del proyecto etapa pre-campo. Fuente: IGAC, 2018. ....	49
<b>Figura 5.17.</b> Ubicación y secuencia temporal para monitoreo en páramos y humedales. Fuente: IGAC, 2018.....	53
<b>Figura 5.18.</b> Profundidades de muestreo en cajuela. Fuente: IGAC, 2018 .....	55
<b>Figura 5.19.</b> Ubicación de pared de muestreo en zonas de pendiente. Fuente: IGAC, 2018 .....	55
<b>Figura 5.20.</b> Profundidades de muestreo en calicata. Adaptado de Fototeca IGAC, (2016).....	57
<b>Figura 5.21.</b> Calicata con nivel freático alto. Fototeca IGAC, (2015). ....	59
<b>Figura 5.22.</b> Esquema de muestreo barreno de aleta. Fuente: <a href="https://www.vanwalt.com/pdf/fact-sheets/Peat-or-Russian-Corer-Fact-Sheet.pdf">https://www.vanwalt.com/pdf/fact-sheets/Peat-or-Russian-Corer-Fact-Sheet.pdf</a> . ....	60
<b>Figura 5.23.</b> Muestreo densidad aparente con barreno de aleta. Fototeca IGAC, (2017). ....	61
<b>Figura 5.24.</b> Fragmentos de roca en calicata. Fototeca IGAC, (2016).....	61
<b>Figura 5.25.</b> Cuantificación de fragmentos de roca en campo. Fuente: IGAC, 2018 .....	62
<b>Figura 5.26.</b> Diagrama de flujo para el ajuste de la función de pedotransferencia para estimación de densidad aparente. Fuente: IGAC, 2018. ....	68
<b>Figura 5.27.</b> Diagrama de flujo para el ajuste del modelo de regresión, para estimación de carbono orgánico de suelos en páramos y humedales. Fuente: IGAC, 2018 .....	73
<b>Figura 5.28.</b> Ejemplo de adaptación de capa raster de variable categórica (orden de suelo) a variables dicotómicas o “dummy”. Fuente: IGAC, 2018.....	74

## Introducción

Esta introducción fue desarrollada por el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

El documento de línea base del Grupo de Trabajo Técnico en Incentivos a la Conservación – *GTT en Incentivos a la Conservación*<sup>1</sup> del Proyecto Páramos, Biodiversidad y Recursos Hídricos de los Andes del Norte financiado por la Unión Europea y coordinado por el Instituto Humboldt, identificó la necesidad de habilitar el carbono como fuente de financiación del páramo. Esto teniendo en cuenta que la gestión de este ecosistema estratégico tiene varios retos de gestión que para ser implementados requerirán de cuantiosos recursos.

En virtud de lo antes expuesto, el Instituto Humboldt y el Ministerio de ambiente firmaron convenio el convenio de cooperación 411 de 2017<sup>2</sup> que tenía como objetivo “aunar esfuerzos técnicos, administrativos y financieros entre el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt con el fin de diseñar el plan de acción para la implementación de la línea "Manejo y conservación de ecosistemas y servicios ecosistémicos para el desarrollo bajo en carbono y resiliente al clima" de la Política Nacional de Cambio Climático.

Para alcanzar el objetivo del convenio se realizó un proceso de articulación interinstitucional que estuvo en cabeza del Instituto Humboldt y que dio inicio con Parques Nacionales, posteriormente, se convocó a la institucionalidad del carbono en Colombia y así entraron en este esfuerzo la dirección de Cambio Climático del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. Este grupo de instituciones conformó el Grupo Interinstitucional para Carbono en Páramos.

Como parte de sus discusiones internas, del grupo decidió que para poder habilitar el carbono como fuente de financiación se debían desarrollar varias tareas, sin embargo, se observó que las metodologías de cuantificación de carbono disponibles estaban enfocadas a bosques y al ser el Páramo no bosque, se debía tener un procedimiento que tuviera en cuenta las complejidades de estos ecosistemas. Adicional a esto, se concluyó que este procedimiento tenía que trabajarse en dos grandes componentes; suelo y biomasa.

Para trabajar el componente de suelos se concluyó que se debía trabajar con la institución que tuviera dentro de sus labores misionales el análisis de suelos del país, razón por la cual se contrató al Instituto Geográfico Agustín Codazzi en el marco del convenio 411 de 2017 y uno de sus principales productos fue *La hoja de ruta y procedimientos para estimar el contenido de carbono orgánico en suelos de Páramos y Humedales de Colombia*.

<sup>1</sup> “La reducción de Gases de Efecto Invernadero es una fuente de ingresos potencial para los procesos de conservación, restauración y reconversión productiva en los nodos de páramo, por esta razón es de vital importancia que desde el proyecto páramos se exploren las posibilidades reales de esta fuente de ingresos y los costos potenciales de desarrollar acciones puntuales en el mercado voluntario de Carbono” <http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/9717>

<sup>2</sup> Numeración interna del Instituto Humboldt 17-051



Este documento no es aún una guía oficial en el tema de cuantificación de carbono orgánico en suelos, sin embargo, es una herramienta desarrollada con un alto rigor técnico, bajo una orientación temática desde la gestión por un grupo de instituciones claves para la gestión de los páramos.

Los pasos a seguir en este componente, suponen un trabajo interinstitucional conjunto con Instituciones como el IDEAM, el Ministerio de Ambiente y de Desarrollo Sostenible – MADS y la Cancillería entre otros, para la validación e implementación del plan de acción de la línea "Manejo y conservación de ecosistemas y servicios ecosistémicos para el desarrollo bajo en carbono y resiliente al clima" de la Política Nacional de Cambio Climático y dentro de este, buscar que se generen proyectos de reducción de GEI para el páramo.

### 3. OBJETO Y ALCANCE

Definir las actividades a realizar en las fases pre-campo, campo y pos-campo para la estimación y monitoreo del contenido de carbono orgánico en suelos de páramos y humedales de Colombia.

Esta hoja de ruta busca proporcionar insumos y lineamientos a las entidades, investigadores y demás personas que realicen labores relacionadas con la estimación y monitoreo del contenido de carbono orgánico en suelos de páramos y humedales, como una de las líneas dentro de la Política Nacional de Cambio Climático, relacionados con la recolección de información en campo, procesamiento, cuantificación y mapeo del carbono.

10

### 4. MARCO CONCEPTUAL

La materia orgánica en el suelo (MOS) es el producto de las etapas de descomposición de los tejidos de plantas y animales muertos, corresponden a materiales menores a 2 mm de tamaño, siendo primordial para la estabilización de la estructura del suelo, la retención y liberación de nutrientes para las plantas, y el mantenimiento de la capacidad de retención de agua. La descomposición de MOS libera diferentes nutrientes de origen mineral, lo cual es fundamental para el crecimiento de las plantas, garantizando la seguridad alimentaria (Gougoulas, *et al.*, 2014).

La MOS es el principal determinante de la actividad biológica; la cantidad, diversidad y dinámica de la fauna del suelo y de los microorganismos están directamente relacionadas con esta, generando influencia sobre las propiedades químicas y físicas de los suelos (Robert, 1996); además, es un indicador clave de la calidad del mismo, tanto en sus funciones agrícolas como en las ambientales, entre ellas se encuentran la captura de carbono y la calidad del aire.

De acuerdo a todas estas características es necesario disponer de una caracterización detallada de su composición, formas moleculares y cantidades. No obstante, existen factores externos (clima, cobertura vegetal, características del terreno) y factores internos (características físicas, químicas y biológicas) que inciden en su comportamiento y deben ser considerados (Allison, 1965).

La MOS contiene aproximadamente 55-60% de carbono (C) en masa. En la mayoría de suelos, este C abarca la mayor parte o la totalidad de las reservas del mismo, a excepción de cuando aparecen compuestos inorgánicos de C (FAO y GTIS, 2015). El carbono orgánico del suelo (COS) se encuentra en forma de residuos orgánicos poco alterados de vegetales, animales y microorganismos, en forma de humus y en formas muy condensadas de composición próxima al C elemental (Jackson, 1964). En condiciones naturales el C orgánico del suelo resulta del balance entre la incorporación al suelo del material orgánico fresco y la salida de C del suelo en forma de CO<sub>2</sub> a la atmósfera (Swift, 2001; Aguilera, 2000), erosión y lixiviación.

Este COS influye en las propiedades físicas, químicas y biológicas siendo indicador del estado de cualidades como la estructura, infiltración, retención de humedad, biomasa microbiana, respiración del suelo, actividad enzimática, entre otras (Araujo, *et al.*, 2007).

El carbono orgánico se divide en diferentes grupos en función de su estabilidad física y química (FAO y GTIS, 2015; O'Rourke *et al.*, 2015):

- Reserva rápida (reserva lábil o activa): después de la incorporación de carbono orgánico fresco al suelo, la descomposición da lugar a la pérdida de una gran proporción de la biomasa inicial en 1-2 años.
- Reserva intermedia: contiene carbono orgánico procesado por microbios que está parcialmente estabilizado en superficies minerales y/o protegido dentro de agregados, con tiempos de rotación en el rango de 10-100 años.
- Reserva lenta (reserva refractaria o estable): COS altamente estabilizado, ingresa en un período de muy lenta rotación de 100 a >1000 años.

#### 4.1 CARBONO ORGÁNICO EN EL SUELO COMO PARTE DEL CICLO GLOBAL

La dinámica de los ecosistemas terrestres depende de las interacciones entre diversos ciclos biogeoquímicos. La transferencia de carbono (tanto de CO<sub>2</sub> como de carbono orgánico e inorgánico) entre la biosfera, litosfera, océanos y atmósfera, constituye el ciclo de carbono (Sigman y Boyle, 2000) y depende de las interrelaciones entre una serie de sumideros y fuentes.

En el ciclo terrestre del carbono el COS ocupa un 69,8% del C orgánico de la biosfera (FAO, 2001), el cual almacena aproximadamente 1,500 Pg, el doble de lo que almacena la atmósfera (750 Pg) y la vegetación (650 Pg) (Batjes, 1996).

El suelo puede actuar como fuente o reservorio de C dependiendo de su uso y manejo (Lal *et al.*, 1990; Lal, 1997). Los suelos del mundo actúan como el sumidero de carbono más grande de la tierra, reduciendo los gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, lo que podría compensar significativamente las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. De hecho, en una decisión histórica sobre agricultura, la reciente conferencia sobre cambio climático en Bonn (COP 23) reconoció la necesidad de mejorar el carbono, la salud y la fertilidad del suelo (FAO, 2017).

Cuando se habla del suelo como fuente emisora de dióxido de carbono, se debe tener en cuenta que en el suelo el CO<sub>2</sub> se produce fundamentalmente a través del metabolismo de los microorganismos y de las raíces de las plantas, siendo la descomposición microbiana de compuestos orgánicos el proceso más importante que lo genera. Durante la descomposición una parte del carbono es devuelto a la atmósfera en forma de CO<sub>2</sub>, mientras que otra se transforma en otros compuestos más sencillos o se almacena en las propias estructuras microbianas; sin embargo la alta intervención del hombre en cuanto al cambio de uso del suelo y la transformación agrícola aumenta significativamente la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

La magnitud del almacenamiento de COS es espacial y temporalmente variable y determinada por diferentes factores abióticos y bióticos (Swift, 2001). A nivel mundial, las reservas de COS más grandes se encuentran en zonas críticas como humedales y turberas, la mayoría de las cuales ocurren en regiones de permafrost y en los trópicos (Galantini, 2002).

## 4.2 MONITOREO Y VERIFICACIÓN DE COS

En la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo celebrada en 1992 en Río de Janeiro (Brasil), más conocida como “Cumbre de la Tierra de Río”, se dieron a conocer tres tratados internacionales: La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), Convenio sobre la Diversidad Biológica (CNUDB) y la Convención de Lucha contra la Desertificación (CNULD); estas se conocen desde entonces con el nombre de Convenciones de Río.

En 1992 la CMNUCC, con el objetivo de examinar qué podían hacer para limitar el aumento de la temperatura mundial y el consiguiente cambio climático, y qué hacer frente a sus consecuencias, sin embargo en el año 1995, los países reconocieron que las disposiciones en materia de reducción de las emisiones recogidas en la Convención no eran suficientes. Por lo tanto, iniciaron negociaciones para reforzar la respuesta mundial al cambio climático y, en 1997, adoptaron el Protocolo de Kyoto.

Las tres Convenciones de Río están estrechamente relacionadas. El cambio climático afecta a la biodiversidad y a la desertificación. Cuanto más intenso sea el cambio climático y mayor sea su alcance, mayor será la pérdida de especies vegetales y animales, y las tierras secas y semiáridas en todo el mundo perderán vegetación y se deteriorarán, como consecuencia se establecieron acuerdos internacionales jurídicamente vinculantes que unen temas ambientales con desarrollo sustentable. En particular, los países de América Latina ratificaron la CMNUCC entre 1993 y 1995 y la CNULD, entre 1995 y 1999 (UNFCCC, 2014).

Por su parte Colombia ratificó su compromiso frente a CMNUCC el 27 de octubre, a través de la ley 164 de 1994, la CDB mediante la ley 165 de 1994 y entró en vigor para el país el 26 de febrero de 1995, y por último la CNULD mediante la ley 461 del 4 de agosto de 1998, entrando a ser parte a partir del 8 de septiembre de 1999. Nuestro país ha venido participando activamente en las negociaciones de la CMNUCC a fin de evitar el crecimiento de las emisiones de GEI que generen un incremento en la temperatura global promedio.

### 4.2.1 Medición, reporte y verificación (MRV)

La medición, reporte y verificación (MRV) es la recolección de datos e información de los diferentes países con el objetivo de compilar, analizar y comprobar la reducción o incremento de las reservas de carbono de acuerdo a la línea base establecida en cada zona.

El MRV permite asegurar que los inventarios de reservas de carbono sean: **a) Transparentes**, es decir, lo suficientemente documentados de forma clara y adecuada, que permitan que cualquier parte interesada comprenda la información reportada; **b) Completos**, que logre integrar la mayor cantidad de datos sobre el COS y en caso de información faltante sea documentado; **c) Consistentes**, de forma que las estimaciones puedan ser comparables en periodos de tiempo determinado y no estén sujetas a cambios resultantes de diferencias metodológicas; **d) Comparables**, así se podrá cotejar con inventarios de otros países; y **e) Precisas**, de forma que no

se den sobreestimaciones ni subestimaciones en la medida que se pueda determinar, o que se relacione la incertidumbre de los datos obtenidos (FAO,2017).

La CMNUCC, requiere que los países cuenten con un sistema nacional de acuerdos institucionales y legales para asegurar la adecuada y oportuna gestión de las emisiones de GEI a la atmósfera (por ejemplo, mediante la mineralización de la MOS) y de la absorción atmosférica (por ejemplo, secuestro de COS).

Las contribuciones que cada país estableció para conseguir el objetivo global, se denominan "contribuciones previstas determinadas a nivel nacional" (NDC). Dichas contribuciones deberán tener un informe cada cinco años y estar registradas por la secretaria de la CMNUCC. Para este fin Colombia ha adelantado acciones encaminadas al logro de un crecimiento económico sostenible, bajo en carbono y resiliente al cambio climático, las cuales requieren del desarrollo e implementación de un sistema de gestión de la información, que permita monitorear el avance e impacto de las medidas de mitigación para la reducción de emisiones, y de adaptación al cambio climático (MADS, GIZ, WRI, 2017).

Estos sistemas de información se denominan sistemas de monitoreo, reporte y verificación (MRV) en los cuales:

- El monitoreo (M) se refiere a las variaciones anuales en las reservas de COS debidas a actividades humanas, incluidas las medidas de mitigación, y las emisiones antropogénicas asociadas de GEI y su eliminación (UNFCCC, 2014).
- El informe (R) se refiere al análisis y compilación de datos medidos a través de varios reportes, como las Comunicaciones Nacionales, los Inventarios Nacionales de GEI e Informes Bienales de Actualización (BUR) en los cuales los países dan cuenta de los resultados de sus acciones para hacer frente al cambio climático (UNFCCC, 2014).
- La verificación (V) se refiere al proceso de verificación independiente de la transparencia, integridad, exactitud y consistencia de la información reportada y de los métodos utilizados para generar dicha información. Al proporcionar retroalimentación sobre la calidad de la información y los métodos, junto con sugerencias para su mejora, la verificación también proporciona garantía y el control de calidad (QA/QC) que mejora todo el proceso de MRV (FAO, 2015).

#### **4.3 IMPORTANCIA DEL COS EN ECOSISTEMAS DE PÁRAMOS Y HUMEDALES**

Los páramos, además de ser considerados ecosistemas estratégicos por su oferta de servicios ambientales, entre los que cabe resaltar la regulación hídrica, poseen un importante contenido de carbono acumulado que no sólo se encuentra en la biomasa (cobertura vegetal), sino también en la materia orgánica presente en el suelo, debido a las bajas tasas de descomposición en estos ecosistemas (Espinoza, 2005).

Este tipo de ecosistema almacena importantes cantidades de COS por aporte de materiales orgánicos provenientes de la vegetación, lo cual genera una mayor acumulación de carbono en las capas inferiores del suelo, permitiendo el almacenamiento que se da gracias a las condiciones ambientales del páramo, especialmente las bajas temperaturas. De esta manera, se convierte en un importante escenario de mitigación ante el efecto del cambio climático, principalmente mediante la

reducción de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, la progresiva conversión de áreas de páramo hacia cultivos, pasturas o ganadería, repercute directamente en la captura de carbono por parte del suelo (Forero *et al.*, 2015).

Por otra parte los ecosistemas de humedales, son considerados globalmente importantes por almacenar carbono, debido a la alta productividad de las plantas y a la baja descomposición de la materia orgánica que ocurre en sus suelos inundados. Estos ecosistemas tienen un potencial de secuestro de carbono, pero el drenado, quemadas y pastoreo provocan la liberación de CO<sub>2</sub>, por lo que la conservación de los humedales es un punto crítico en la regulación del ciclo de carbono en la tierra (Suárez *et al.*, 2016).

En general, a nivel mundial se están definiendo áreas de conservación y manejo de ecosistemas para mantener en buen estado su biodiversidad y servicios ambientales. Con ello se contribuye al almacenamiento de carbono y se evita las emisiones por deforestación y degradación (Busch y Grantham, 2013).

## 5. GLOSARIO Y UNIDADES

### 5.1 GLOSARIO

Área mínima de mapeo	Área mínima cartografiable o unidad más pequeña de superficie que puede ser delimitada en un mapa. Varía en función de la escala de presentación del trabajo (nivel de detalle) y del objeto del estudio (IGAC, 2017a).
Base de datos de suelos	Agrupación de datos de suelos almacenados, organizados, estructurados y relacionados entre sí, que representan algunos aspectos de su realidad física, química y geomorfológica; corresponde a un sistema de archivos digitales que permite la actualización, consulta, manipulación, interpretación y análisis de un conjunto de datos de suelos que tienen una representación espacial.(IGAC, 2017a).
Cajuela	Excavación de forma cúbica que se realiza en el suelo para identificar las características morfológicas de los primeros horizontes en sus tres dimensiones largo, alto y ancho (50x50x50 cm) la cual se asemeja a una caja pequeña. A partir de los 50 cm se realiza un barrenaje hasta 1,20 m (Cortés y Malagón, 1984).
Calicata	Apique o excavación de aproximadamente 1,50 m de largo, 1,10 m de ancho y 1,50 m de profundo, que se realiza para estudiar propiedades físicas, químicas, biológicas y mineralógicas del perfil del suelo, tomando además diversas muestras de sus diferentes capas u horizontes para su análisis en laboratorio (IGAC, 2017).
Carbonatos libres	Se refiere a carbonatos del suelo que no son recubrimientos, ni uniones, y que efervescen visible o audiblemente cuando se les trata con HCl diluido en frío. Sinónimo del término “calcáreo”. (USDA, 2014).
Carbono lábil	Sustancia que los microorganismos transforman o usan

	fácilmente. La materia orgánica lábil se asocia a menudo con carbono orgánico activo para regular la calidad del suelo (USDA, 2014).
Carbono orgánico	Componente importante del ciclo global del C, ocupando un 69,8% del C orgánico de la biosfera (FAO, 2001). Se encuentra en forma de residuos orgánicos poco alterados de vegetales, animales y microorganismos, en forma de humus y en formas muy condensadas de composición próxima al C elemental (Jackson, 1964). El suelo actúa como fuente o reservorio dependiendo de su uso y manejo (Lal et al., 1990; Lal, 1997) (Martínez, et al.2008).
Carbono recalcitrante	De muy lenta degradación (FAO, 2015).
Carbono secuestrado	Es el carbono almacenado en un depósito o componente del sistema climático diferente a la atmósfera. Constituyen ejemplos de depósitos de carbono la biomasa forestal, los productos de la madera y los suelos (IPCC, 2006; IPCC, 2006a).
Carbono total en el suelo	Es la suma del carbono orgánico e inorgánico. El total de todas las formas de carbono en el suelo. Si el pH del suelo es 6.5 o superior, todo el carbono total se considera carbono orgánico. El carbono total (TC) menos el carbón activo (AC) es igual al carbono pasivo (PC). El carbono total se compone de carbono microbiano, carbono orgánico particulado, ácido fúlvico, ácido húmico, humina, carbono no humificado (glucosa) y carbonatos de calcio y magnesio (IGAC, 2017a).
Compactación del suelo	Proceso por el que las partículas sólidas del suelo se reacomodan entre sí, disponiéndose más cerca unas de otras, lo que lleva a una reducción del espacio de poros y a un incremento de la densidad aparente. Es la densificación de un suelo mediante la aplicación de cargas mecánicas externas. (Zamudio, et al., 2006).
Contacto lítico	Límite entre el suelo y un material subyacente coherente, virtualmente continuo dentro de los límites de un pedón; el material subyacente debe ser suficientemente coherente en húmedo, para impedir ser cavado con un azadón, aunque sí raspado o astillado por este (IGAC, 2017a).
Control de calidad	Acción tomada por el responsable del proceso, para minimizar los riesgos y aumentar la probabilidad de alcanzar los objetivos y lograr las metas establecidas. Es un medio para detectar si se ha logrado la calidad y la adopción de medidas para corregir cualquier deficiencia (IGAC, 2017; Normas ISO-9000).
CORINE Land Cover	Metodología específica para realizar el inventario de la cobertura de la tierra, que permite describir, caracterizar, clasificar y comparar las características de la cobertura de la tierra, interpretadas a partir de la utilización de imágenes de satélite de resolución media (Landsat) (IDEAM, 2010).
Cuadrícula o red rígida	La unidad de tierra definida por los límites de una red o grilla imaginaria impuesta en un mapa. También se puede llamar una celda de trama o un píxel (IGAC, 2017a).
Dato espacial	Dato que incluye como uno de sus atributos, una referencia a una

	posición bidimensional o tridimensional (IGAC, 2017a).
Dato geográfico	Es la representación de información en una manera formalizada para facilitar la comunicación, interpretación y/o el procesamiento, que se encuentra directa o indirectamente referenciada a una localización sobre la superficie de la tierra (IGAC, 2017a).
Densidad aparente	Se define como la masa de una unidad de suelo seco (105°C); éste volumen incluye tanto los sólidos como los poros del suelo (Malagón, <i>et al.</i> , 2016).
Densidad real	Peso de las partículas sólidas del suelo, relacionado con el volumen que ocupan, obviando su organización en el suelo. (Jaramillo, 2002).
Descomposición	Se hace referencia a la descomposición de la materia orgánica, como el proceso biológico donde el colapso físico y la transformación bioquímica de las moléculas de los complejos orgánicos de los materiales muertos se convierten en moléculas simples e inorgánicas (Juma, 1998).
Ecosistema	Grupo de organismos que interactúan entre ellos y con su ambiente. Unidad de estudio de la ecología, constituida por una comunidad de seres vivos y el medio físico en que se desarrollan; se establecen ciclos de materia y energía que pueden recibir aportes del exterior (Fitzpatrick, 1996)
Error absoluto	Error máximo tolerable que se define como un rango real independiente del valor de la variable que se estima (IPCC, 2006).
Funciones de pedotransferencia	Son un concepto usado en la ciencia del suelo, para referirse a reglas predictivas de ciertas variables de un suelo a partir de otras de las que existe información disponible o sobre las que es más fácil, o más barato obtener el dato. El término función de pedotransferencia (FPT) fue acuñado por Bouma (1989) (Pineda y Vilorio, 1997).
Geoestadística	Se define como el conjunto de técnicas estadísticas utilizadas para el estudio de variables numéricas distribuidas espacialmente, partiendo de una muestra representativa del fenómeno en estudio (González <i>et al.</i> , 2007).
Huella de carbono	La Huella de Carbono es un indicador que representa la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera derivados de las actividades de producción o consumo de bienes y servicios (Espíndola y Valderrama, 2012)
Levantamiento Semi-detallado de suelos	Se realiza en áreas de mediano desarrollo, planas o ligeramente onduladas o moderadamente inclinadas, con potencial agropecuario, facilidades de accesos mayores a las requeridas en el estudio general y pocas limitaciones para su progreso y mejora, al igual que en áreas útiles para la ubicación de proyectos, su factibilidad y la implementación de programas de desarrollo. El nivel taxonómico para definir el contenido pedológico de las unidades de mapeo debe ser la familia, especialmente, la familia textural. Se debe procurar separar consociaciones de suelos hasta



	donde sea posible. Su escala de trabajo oscila entre 1:25.000 y 1:50.000 (Cortés y Malagón, 1984).
Litter	Incluye toda la biomasa no viva con un diámetro inferior a un diámetro mínimo elegido por el país para el depósito muerto (10 cm), en varios estados de descomposición por encima del suelo mineral u orgánico. Esto incluye las capas hojarasca, fúmicas y húmicas. Las raíces vivas (menos del límite de diámetro sugerido para la biomasa subterránea) se incluyen en la hojarasca, donde no pueden distinguirse empíricamente (IPCC, 2006).
Mapa temático	Representación gráfica de un tema específico, diseñado para mostrar ciertas características particulares y su distribución sobre la superficie terrestre (mapa de suelos, mapa geomorfológico, mapa de uso actual y cobertura vegetal, entre otros) (IGAC, 2017a).
Mapeo digital	Lagacherie y McBratney (2006), definen el mapeo digital de suelos (MDS) como la generación de información espacial a partir de información de laboratorio y campo acoplada con sistemas de inferencia espaciales; de igual manera se ha propuesto otra terminología para hacer referencia al MDS como cartografía de suelos asistida por computador, cartografía numérica, mapeo pedométrico y modelado para extrapolación geográfica (Franklin, 1995; McKenzie y Ryan, 1999; Scull et al., 2003; Legros, 2006; Kempen et al., 2010).
Matriz de confusión	La técnica convencional que establece una matriz que muestra, para cualquier clasificación dada de la tierra, la probabilidad de clasificación errónea por una de las otras clasificaciones de candidatos (IPCC, 2006).
Mineralización	Transformación de algunos elementos de compuestos orgánicos a compuestos inorgánicos; proceso dependiente de la dinámica de los organismos del suelo. Contrario a la humificación, la mineralización genera pérdidas netas de materia orgánica en el suelo (descomposición de materia orgánica). (Jaramillo, 2002).
Mitigación	Es una intervención destinada a reducir la degradación en curso en una etapa en que la degradación ya ha comenzado. El objetivo principal aquí es detener la degradación adicional y comenzar a mejorar los recursos y sus funciones (FAO, 2015).
Modelo digital de elevación (MDE)	Es una estructura numérica de datos que representan la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua; representa generalmente la topografía del terreno mediante las alturas en cada punto (pixel) de un territorio (Bernabé y López, 2012 y Bosque, 2000).
Modelo SCORPAN	El modelo “SCORPAN”, asume que la información existente de las propiedades del suelo en un lugar determinado puede ayudar a predecir y mapear otras propiedades del suelo o características del ambiente en zonas donde la información espacializada no está

	disponible a la escala que se requiere (McBratney <i>et al.</i> , 2003).
Nivel freático	Distancia existente entre el nivel del agua subterránea y la superficie. Lugar geométrico de los puntos donde la presión del agua es igual a la presión atmosférica. (IGAC, 2017a).
Perfil de suelo	Conjunto de horizontes o capas superpuestas diferenciadas en color, dureza, textura, producto de la evolución genética del suelo a partir del material de origen; representa la población de suelos de un sitio o zona en específico. (IGAC, 2017).
Perfil modal de suelo	Componente de suelos que ocupa el mayor porcentaje dentro de la unidad cartográfica de suelos. Constituye la pieza fundamental para entender, descifrar e interpretar la capacidad y potencialidad de las tierras para uso antrópico. Instructivo etapa de campo para levantamiento de suelos (IGAC, 2017).
Polígono	Figura plana cerrada delimitada por líneas. Es la unidad básica de los mapas temáticos, de forma generalmente irregular y de tamaño variable. Instructivo etapa de campo para levantamiento de suelos (IGAC, 2017).
Punto Permanente de Monitoreo Georeferenciado (PPMG)	Punto permanente georreferenciado para la cuantificación y monitoreo de COS a través del tiempo. En la etapa de monitoreo corresponden a los perfiles de suelos preexistentes y que conforman la línea base. En la etapa de densificación, hacen referencia a los nuevos puntos establecidos que a futuro serán monitoreados.*
Rehabilitación	Acción para restaurar el suelo ya degradado a tal punto que el uso original ya no es posible y la tierra se ha vuelto prácticamente improductiva. En general, se necesitan inversiones a largo plazo y con frecuencia costosas para mostrar cualquier impacto (FAO, 2015).
Solum	Comprende la capa superficial y las capas del subsuelo que han sido alteradas por la formación del suelo (USDA, 1993). Serie de horizontes A, E y B, con sus respectivos horizontes transicionales; incluye horizontes de acumulación de carbonatos o de sales más solubles si se encuentran en horizontes genéticos o cercanos a estos (USDA, 2017).
Suelo	Cuerpo natural que comprende a sólidos (minerales y materia orgánica), líquidos y gases que ocurren en la superficie de las tierras, ocupan un espacio y se caracterizan 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, 2017).
Sumidero de Carbono	Todo proceso, actividad o mecanismo que elimine de la

	atmósfera un gas de efecto invernadero, un aerosol o un precursor de un gas de efecto invernadero (IPCC, 2006a)
Unidad cartográfica de suelo (UCS)	Descripción de las características químicas, físicas, biológicas y mineralógicas de una agrupación de suelos que delimita una población homogénea y/o heterogénea, con relación a su entorno geomorfológico y climático; las unidades de suelos presentan componentes taxonómicos que se distribuyen en una o varias clases de la pirámide taxonómica. Dichas agrupaciones o unidades se representan cartográficamente, por un conjunto de delineaciones que identifica cada una por medio de un símbolo único, por un color o por un achurado en el respectivo mapa (IGAC, 2017).
Unidad climática	Delimitaciones cartográficas hechas con base en los pisos térmicos en interrelación con las zonas de vida, en las que se tienen en cuenta las condiciones de humedad (IGAC, 2017a).
Validación	Se define como la actividad en la cual las predicciones del mapa de suelos son comparadas con valores medidos en la realidad. Con esta comparación, la calidad del mapa puede ser cuantificada y resumida con medidas de calidad. Estas medidas indican qué tan exacto es el mapa en promedio para el área de mapeo, es decir, cuál es el error esperado en una ubicación seleccionada al azar en el área mapeada (IPCC, 2006).
Zona Homogénea de Monitoreo	Área geográfica o sector delimitado para la cuantificación y monitoreo de COS que se caracteriza por una unidad cartográfica de suelos y una cobertura y/o uso de la tierra específicos*

\* Definición específica para el proyecto

## 5.2 UNIDADES

Megagramo de Carbono	Mg C	Equivale a $10^6$ g. o 1 tonelada de carbono.
Gigagramo de carbono	Gg C	Equivale a $10^9$ g. o 1000 millones de g. de carbono o 1000 t.
Teragramo de carbono	Tg C	Equivale a $10^{12}$ g. o 1 billón de g. de carbono o 100000 t.
Peta gramo de carbono	Pg C	Equivale a $10^{15}$ g. o 1000 billones de g. de carbono o 1000 millones de t
Megatonelada de carbono	Mt C	Equivale a $10^6$ t. o 1 millón de toneladas de carbono.
Giga tonelada de carbono	Gt C	Equivale a $10^9$ t., o 1000 millones de toneladas de carbono.
Teratonelada	Tt C	Equivale a $10^{12}$ t., o 1 billón de t. de carbono
Petatonelada	Pt C	Equivale a $10^{15}$ t., 1000 billones de t. de carbono

#### 4. ACRÓNIMOS Y SIGLAS

C	Carbono
CNUDB	Convenio de las Naciones Unidas sobre la Diversidad Biológica
CNULD	Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
COP	Conferencia de las Partes de la CMNUCC
COS	Carbono orgánico del suelo
DA	Densidad Aparente
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la agricultura
GEI	Gases de Efecto Invernadero
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
MOS	Materia orgánica del suelo
MRV	Monitoreo, Informe y Verificación
PK	Protocolo de Kyoto
Vis-NIR	Visible/Infrarrojo cercano

#### 5. DESARROLLO

##### 5.1 FASE DE PRECAMPO

En esta fase se especifican todas las actividades requeridas en cuanto a la preparación, revisión, análisis y actualización de información necesaria para la cuantificación y monitoreo del carbono orgánico del suelo, en los ecosistemas páramos y humedales, basados en la información de los estudios semidetallados de suelos generados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi- IGAC y la cobertura de la tierra del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM.

##### 5.1.1 Definición y localización geográfica del área de estudio

Teniendo en cuenta el alcance y los objetivos del proyecto, se define el área a intervenir y la localización geográfica de la misma, estableciendo su delimitación. Como resultado se debe generar un shapefile de la zona de estudio (Figura 5.1 y Figura 5.2).

Para el caso del presente proyecto el área de estudio corresponde a las zonas de influencia de páramos y humedales que presentan estudios semidetallados de suelos realizados por el IGAC.

El ecosistema de páramos a nivel nacional cuenta con 10 distritos descritos, representando un área total de 1.469.138 ha, 216 unidades cartográficas de suelos (UCS) para un total de 362 perfiles descritos (Tabla 5.1 a). Asimismo, el ecosistema de Humedales se divide en 4 subregiones con un total de 2.823.544.5 ha, 266 UCS y 594 perfiles descritos (Tabla 5.1b).

**Tabla 5.1.** Información de suelos recopilada del contrato 4340 de 2013 IGAC-IAvH a. Páramos y b. Humedales. Fuente: IGAC, 2018.

<b>a. PÁRAMOS</b>				<b>b. HUMEDALES</b>			
<b>DISTRITO</b>	<b>Área (ha)</b>	<b># UCS</b>	<b># Perfiles</b>	<b>REGIÓN</b>	<b>Área (ha)</b>	<b># UCS</b>	<b># Perfiles</b>
Altiplano	20.121,1	11	1	Andina	478.646,2	103	219
Boyacá	447.988,0	49	96	Caribe	1.806.639,9	128	289
Cundinamarca	242.269,7	28	62	Orinoquía	520.933,6	26	65
Frontino	12.837,3	17	12	Pacífico	17.324,8	9	21
Macizo	34.287,3	20	13	<b>TOTAL</b>	<b>2.823.544,5</b>	<b>266</b>	<b>594</b>
Nariño	248.642,0	29	37				
Perija	15.960,2	4	10				
Santander	272.144,8	25	86				
Sonsón	8.848,5	6	11				
Viejo Caldas	166.039,7	27	34				
<b>TOTAL</b>	<b>1.469.138,6</b>	<b>216</b>	<b>362</b>				

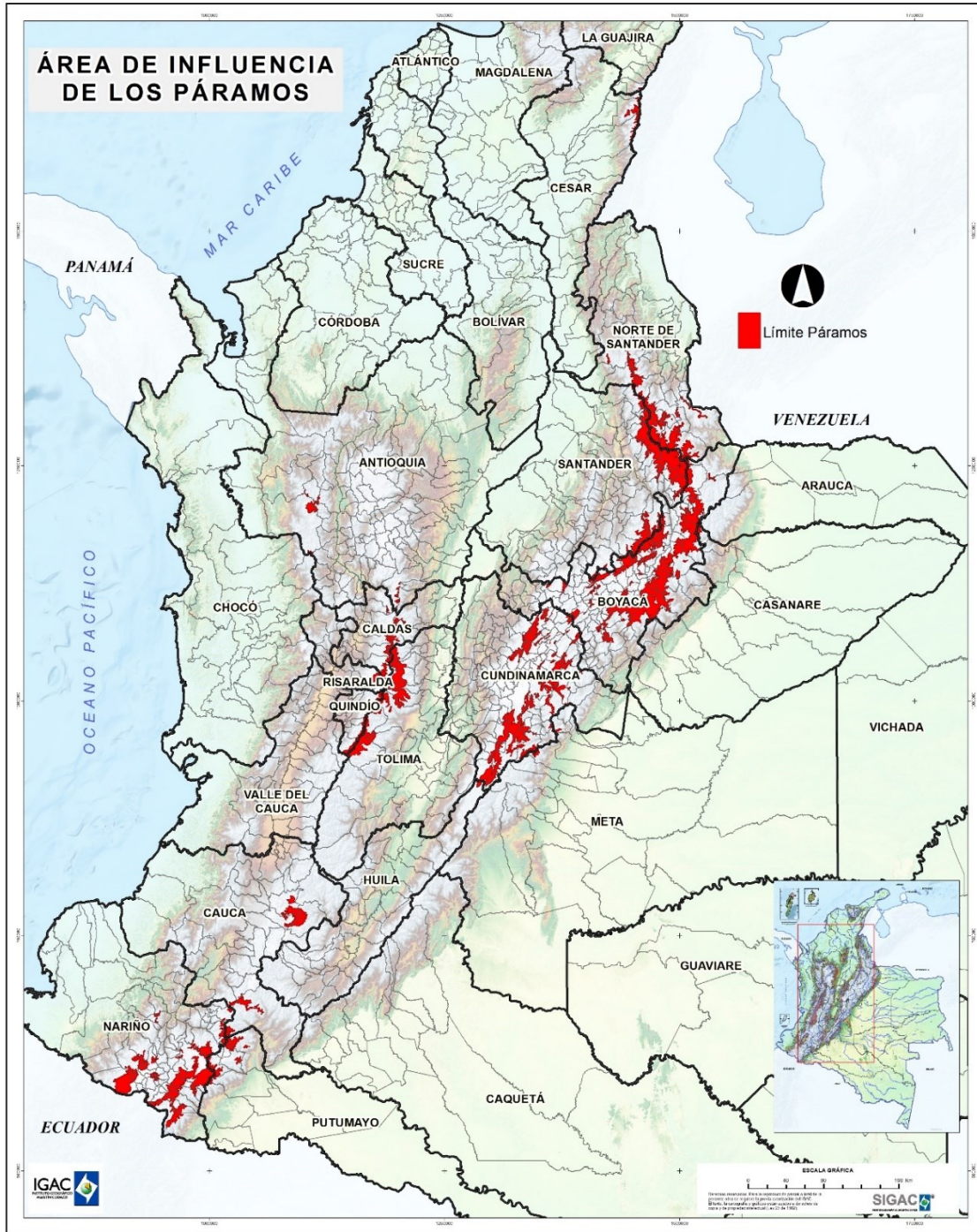


Figura 5.1. Localización geográfica de los ecosistemas de páramo en Colombia. Fuente: IGAC, 2018.

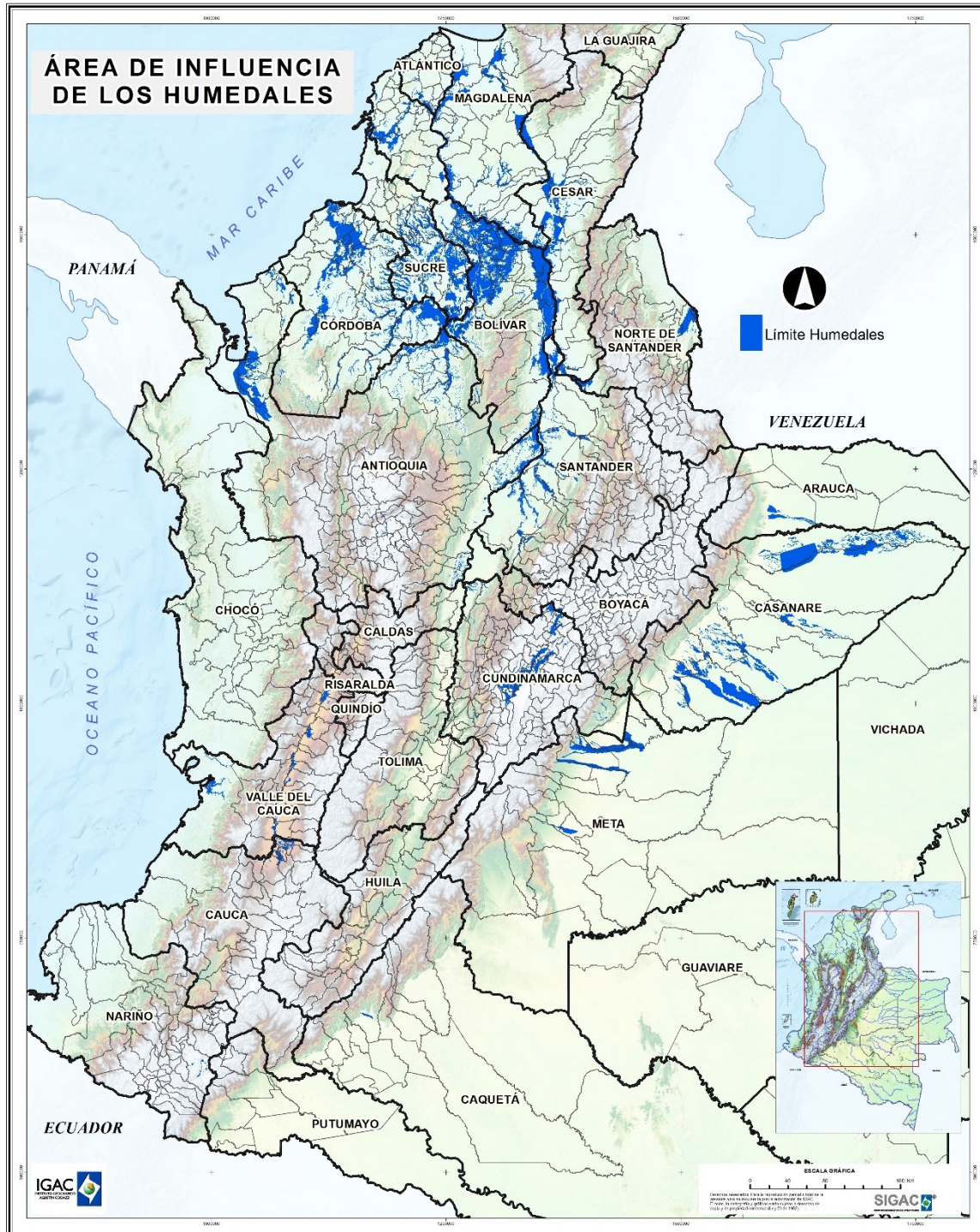


Figura 5.2. Localización geográfica de los ecosistemas de humedales en Colombia. Fuente: IGAC, 2018.

### 5.1.2 Elaboración del cronograma y plan de trabajo

La realización de un cronograma de actividades en cualquier proyecto es fundamental para establecer los tiempos de ejecución de cada una de las fases, se deben tener en cuenta factores

externos que puedan retrasar el normal desarrollo de las actividades, de tal manera que se puedan hacer los ajustes en un momento dado, sin afectar el cumplimiento de los objetivos propuestos.

En el cronograma y plan de trabajo deben quedar plasmadas de manera secuencial las diferentes actividades a desarrollar, los responsables y productos a generar en cada una de ellas y el estado de avance del proyecto. En el presente documento se plantean de manera general tres fases: precampo, campo, poscampo (Tabla 5.2).

Se recomienda que actividades como control de calidad y elaboración de carpetas de trazabilidad se desarrollen durante todo el proyecto, diligenciando el formato cronograma y plan de trabajo (anexo 1).

**Tabla 5.2.** Esquema general del cronograma de trabajo para la determinación de stock de carbono orgánico en suelos de ecosistemas de páramos y humedales. Fuente: IGAC, 2018

ACTIVIDADES	RESPONSABLES	PRODUCTOS	MES 1	MES 2	MES 3	MES 4	% AVANCE
<b>Fase de precampo</b> Revisión, análisis y actualización de información temática del tema de estudio							
<b>Fase de campo</b> Sistema de muestreo y criterios de muestreo							
<b>Fase poscampo</b> <b>Laboratorio</b> Procesos analíticos							
<b>Fase poscampo oficina</b> Análisis de resultados y organización de la información							
<b>Control de calidad</b> Transversal a todos los procesos							
Elaboración de carpetas de trazabilidad del proceso							

### 5.1.3 Recopilación y análisis de información e insumos

Para tener un consolidado de información y posterior análisis, se deben realizar las siguientes actividades:

- Tramitar la consecución de material cartográfico como fotografías aéreas, imágenes de satélite o de radar, ortofotomosaicos, ortofotomapas, espacio-mapas y otros, que se requieran para la estructuración del programa de monitoreo de carbono orgánico en los páramos y humedales del país.
- Obtener insumos digitales en formato shape y raster de temáticas relacionadas con: geomorfología, geología, materiales parentales, modelos digitales de elevación, en general cualquier



insumo que pueda servir como variables ambientales, para la predicción del contenido del carbono orgánico en el área de estudio. Esta información debe ser a escalas semidetalladas 1:25.000.

- Recopilar la información climática de la zona: precipitación, temperatura, humedad relativa, evapotranspiración, entre otras. Parámetros relevantes en la estimación del stock y monitoreo del carbono orgánico en suelos.

- Compilar los estudios de suelos del área del proyecto: memorias técnicas, leyendas, descripción de perfiles, análisis físicos y químicos, información con la cual se pueda establecer la línea base de monitoreo.

- Recopilar la información existente de cobertura y uso de la tierra (shapes, memorias técnicas, leyendas temáticas, entre otras) preferiblemente a escala 1:25.000. En lo posible la información debe ser reciente de lo contrario debe ser actualizada para cada fase de monitoreo.

- Consultar documentos técnicos y científicos relacionados con la cuantificación y el monitoreo de carbono orgánico en diversos ecosistemas a nivel global, con el fin de analizar y evaluar la aplicabilidad en el monitoreo de carbono orgánico en suelos de ecosistemas de páramos y humedales en Colombia.

El proceso debe acompañarse con la documentación de información solicitada o colectada a través de la sistematización, mediante el diligenciamiento de los formatos: inventario cartografía base, información secundaria para el levantamiento y/o estudio de suelos, inventario imágenes de sensores remotos y por último el formato perfiles de suelos- información secundaria; anexándolos a la correspondiente carpeta de trazabilidad del proyecto (anexo 2, 3, 4 y 5).

#### **5.1.4 Establecimiento de la línea base para la cuantificación de carbono a partir de estudios existentes**

La línea base o punto de partida para el monitoreo de carbono orgánico, se refiere a la estimación del COS a una profundidad determinada en el área del proyecto y se construye a partir de la información analítica (química y física) registrada en los estudios de suelos existentes, reflejando el stock de carbono en el suelo en el momento en que se tomó la información.

Esta línea base puede aumentar, mantenerse constante o decrecer, de acuerdo con la dinámica de los hábitats, los escenarios de cambio climático y la influencia antrópica (Etchevers, B., *et al.*, 2005).

En tal sentido la línea base para el monitoreo de carbono orgánico en suelos de ecosistemas de páramos y humedales en Colombia, se fundamenta en los estudios semidetallados de suelos, escala 1: 25.000, realizados por el IGAC entre los años 2013 al 2015 en 4.292.683,1 hectáreas (ha); de las cuales, 2.823.544,5 ha corresponde a ecosistemas de humedales, con información de 594 perfiles modales (Figura 5.3) y 1.469.138,6 ha pertenecientes a ecosistemas de páramos, donde se relacionan 362 perfiles modales (Figura 5.4). Estos perfiles constituyen los puntos principales e iniciales para el monitoreo del stock de carbono en estos ecosistemas.

Para generar la línea base es necesaria la elaboración de la base de datos en archivo Excel, donde se consigna la información de las generalidades geográficas y pedológicas, información analítica de las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de todos los perfiles de suelos caracterizados en los distritos de páramos y en las regiones de humedales en todo el territorio nacional (Anexo 6: Captura de datos para monitoreo y cuantificación del contenido de carbono orgánico en suelos de páramos y humedales de Colombia).

Luego de tener consolidada la base de datos se realiza el proceso de análisis exploratorio de datos, estimación de datos faltantes (densidad aparente), cálculo del stock de carbono a 30 cm de profundidad, preparación de covariables y por último el ajuste del modelo espacial y generación de mapas (etapa poscampo numeral 5.3.4)



Figura 5.3 Perfiles modales de suelos en ecosistemas de humedales en Colombia. Fuente: IGAC, 2018.

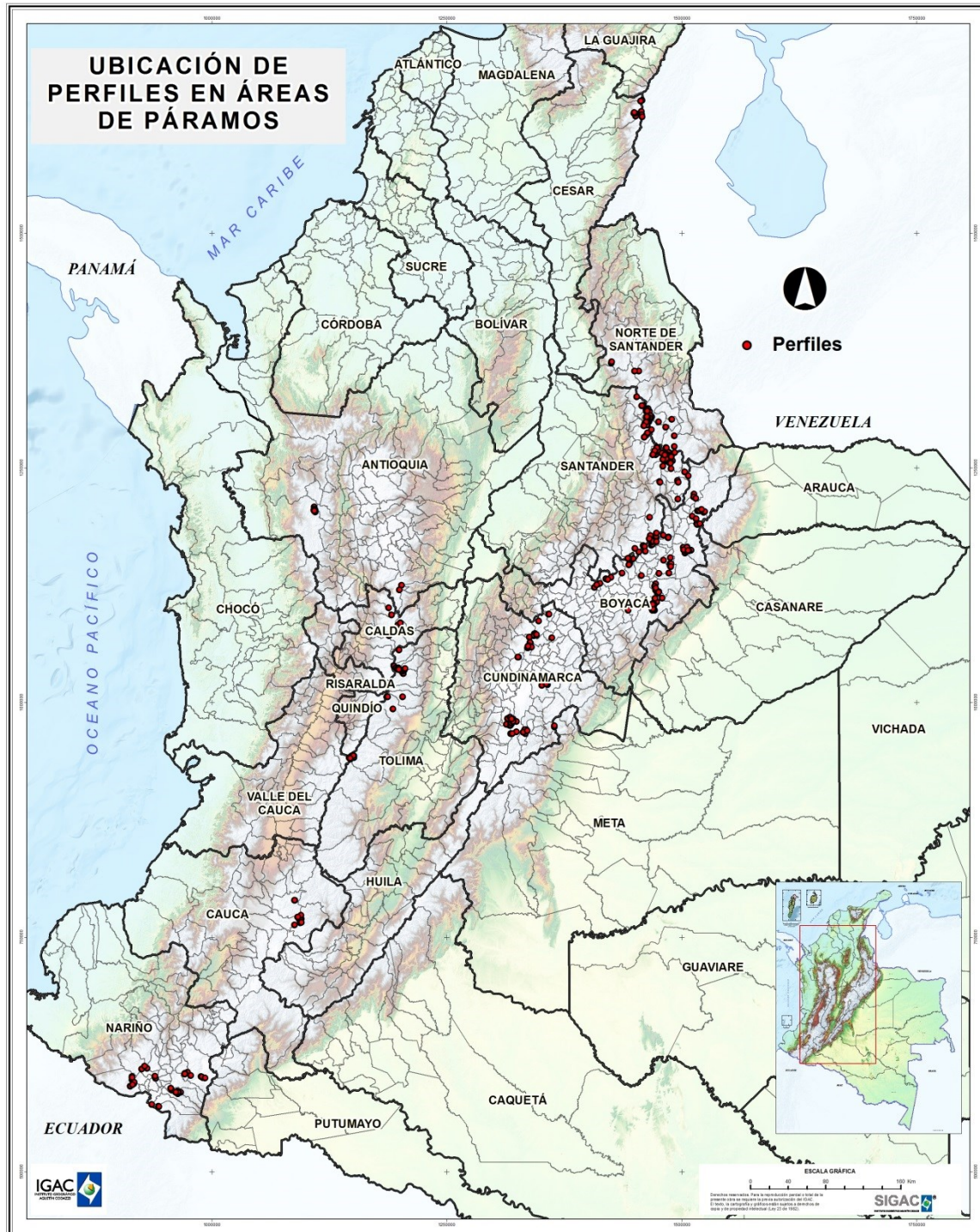


Figura 5.4. Perfiles modales de suelos en ecosistemas de páramos en Colombia. Fuente: IGAC, 2018.

### 5.1.5 Establecimiento de zonas homogéneas para monitoreo de carbono (ZHM)

Una Zona Homogénea de Monitoreo (ZHM) es un sector o área geográfica delimitada para la cuantificación y monitoreo de COS, la cual se caracteriza por una UCS y un tipo de cobertura

específicos. Es decir, una ZHM es el resultado del análisis de información de las capas temáticas de suelos y coberturas de la tierra (Figura 5.5).

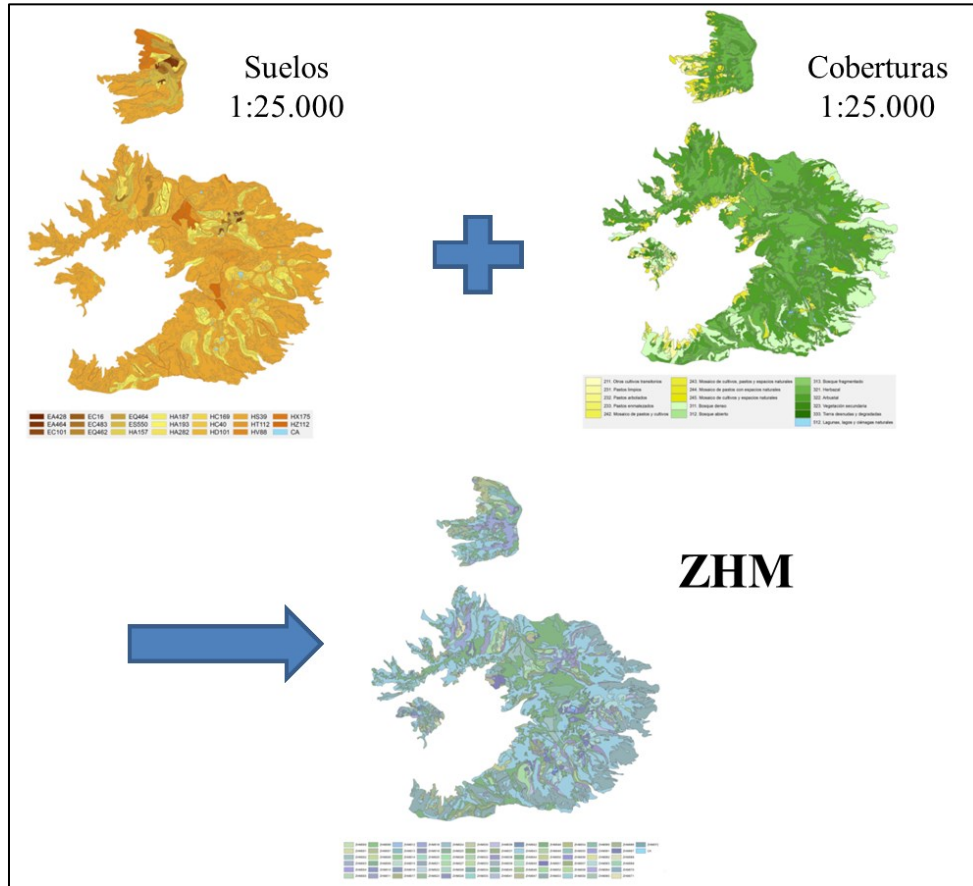


Figura 5.5. Ejemplo de cruce de capas de cobertura y suelos. Fuente: IGAC, 2018

Para esta delimitación se plantea un muestreo aleatorio estratificado (MAE), el cual consiste en identificar y delimitar los diferentes estratos en los que se divide la población y seleccionar una muestra aleatoria de cada estrato (Gutiérrez, 2010). En este caso, el primer estrato lo conforman las UCS de la capa temática de suelos, el segundo estrato las unidades de cobertura de la tierra (hasta el nivel 3 de jerarquía de clasificación) y el tercer estrato, es el resultado de la unión entre las dos anteriores, constituyendo las diferentes ZHM (

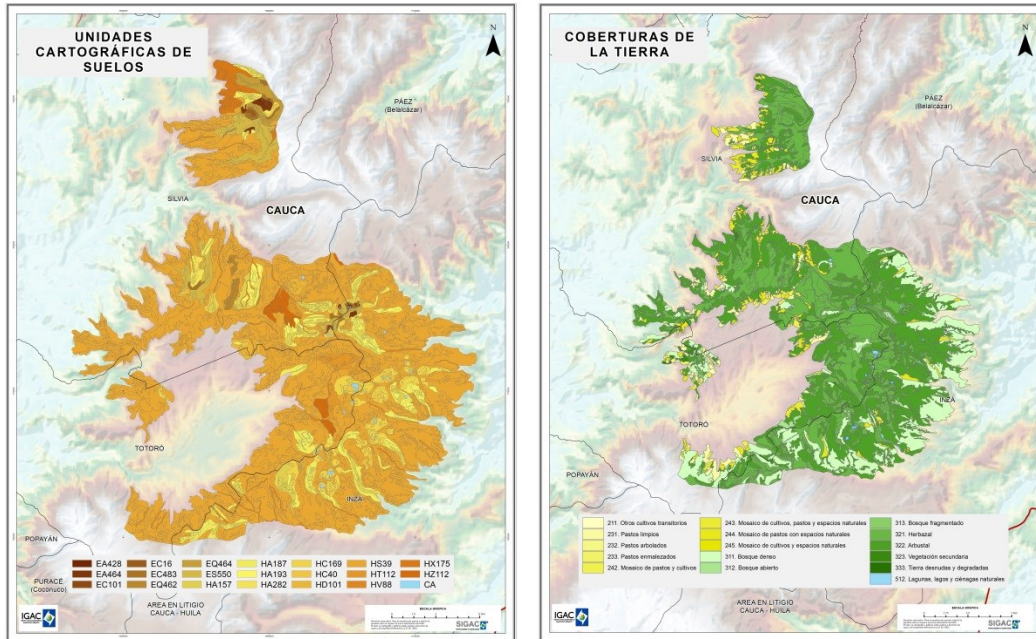


Figura 5.6).

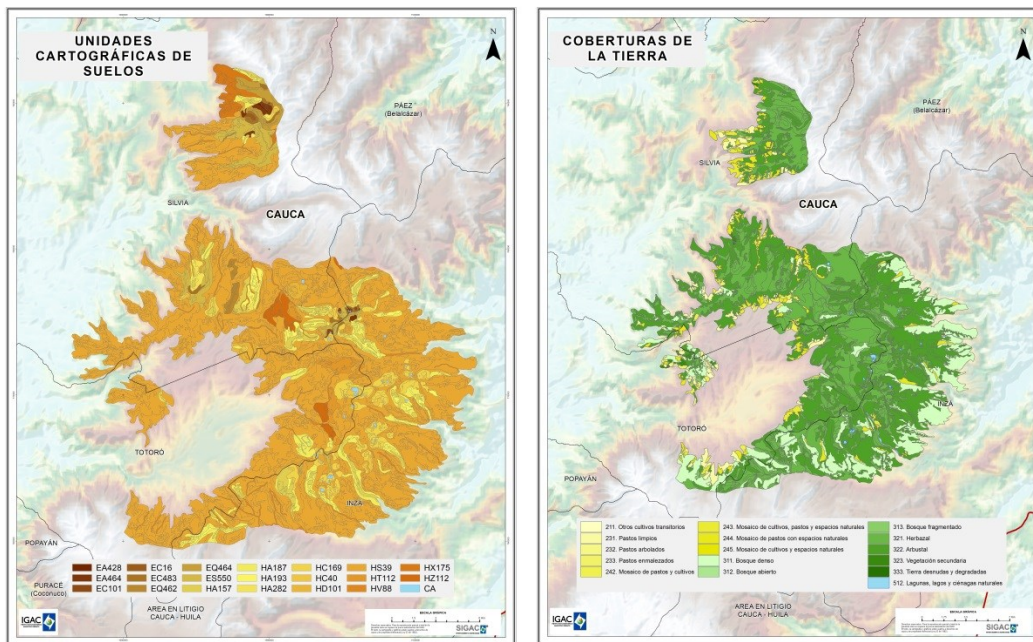


Figura 5.6. Capas temáticas de suelos y coberturas. Fuente: IGAC, 2018.

La población total corresponde a la  $n$  cantidad de UCS presentes en el área de estudio, cada una de ellas se dividirá en  $x$  subpoblaciones distintas, es decir, las unidades de cobertura y uso de las tierra

presente en cada UCS, de esta manera se obtendrán las diferentes ZHM1, ZHM2,..., ZHM $n$ , así: UCS1 + Cobertura 1 = ZHM1, UCS1 + Cobertura 2 = ZHM2, UCS1 + Cobertura 3 = ZHM,..., UCS $n$  + Cobertura  $n$  = ZHM $n$  (Figura 5.7).

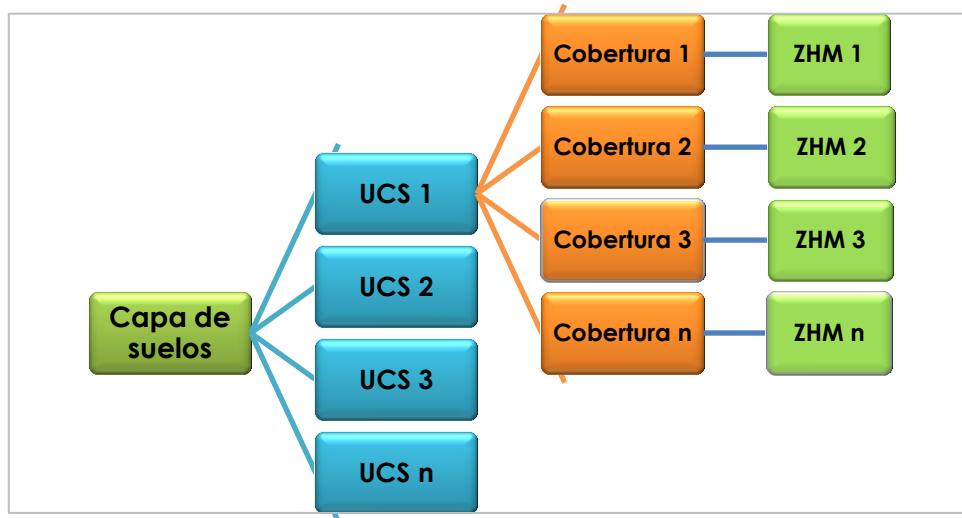


Figura 5.7. Diagrama muestreo aleatorio estratificado (MAE). Fuente: IGAC, 2018

El proceso de delimitación de ZHM se lleva a cabo en el software de Información Geográfica, ArcGis Vr. 10.1, mediante la herramienta de geoprocésamiento “Unión”, la cual une los atributos de dos capas temáticas (UCS y coberturas de la tierra) (Figura 5.8), basándose en las relaciones espaciales para obtener una salida (capa temática de ZHM).

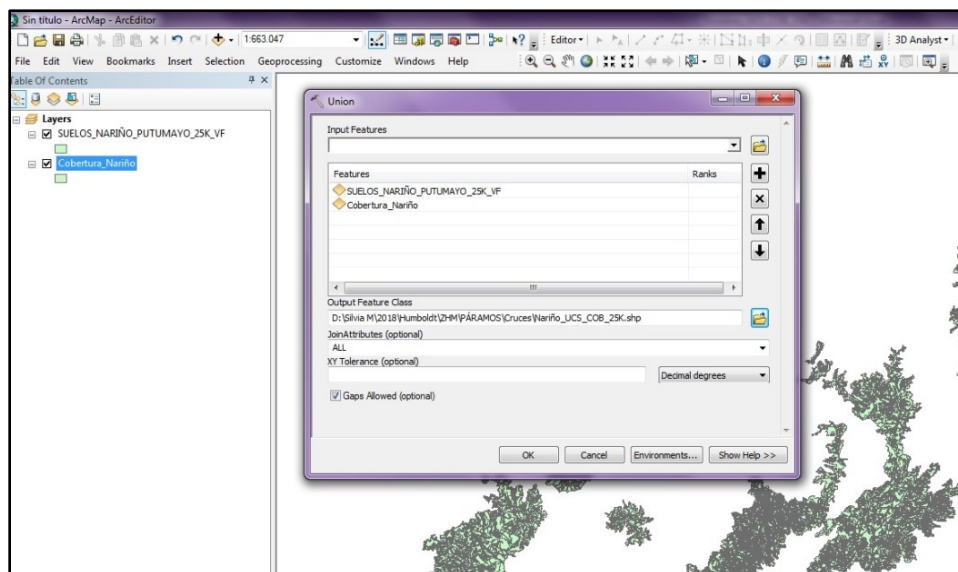


Figura 5.8. Unión espacial de capas UCS y Coberturas. Fuente: IGAC, 2018

Una vez obtenido el resultado de la unión espacial se procede a identificar cada una de las ZHM resultantes. Para esto es necesario reclasificar cada uno de los nuevos polígonos, se recomienda extraer la tabla de atributos del proceso de unión en formato Excel. Es indispensable mantener el identificador (ID) de cada uno de los polígonos a reclasificar y realizar la numeración de las ZHM en orden consecutivo, como se observa en la columna ZHM (Figura 5.9).

Cada combinación resultante de una UCS (columna UCS) y un tipo de cobertura (columna COBERTURA\_NIVEL 3), corresponde a una ZHM diferente, así por ejemplo, la ZHM1 resaltada en color azul y representada en una sola fila (un solo polígono), corresponde a la UCS “EA428” con cobertura “Herbazal”, la ZHM2 sombreada con color rosado y compuesta también por un solo polígono, presenta la UCS “EA428” con cobertura “Arbustal”. Así mismo, las zonas ZHM4 (con 11 polígonos) y ZHM5 (con 14 polígonos), se encuentran en la misma UCS (“EA464”), diferenciadas por el tipo de cobertura: “Herbazal” y “Arbustal”, respectivamente (Figura 5.9). Es importante mencionar que cada fila corresponde a un polígono diferente, por tal razón se debe realizar esta labor de reclasificación uno a uno.

UCS	COBERTURA_NIVEL 3	ID	# polígonos	ZHM
EA428	Herbazal	1120	1	ZHM1
	Arbustal	1121	1	ZHM2
EA464	Mosaico de pastos con espacios naturales	535	1	ZHM3
	Herbazal	46	1	ZHM4
		449	2	ZHM4
		450	3	ZHM4
		451	4	ZHM4
		457	5	ZHM4
		529	6	ZHM4
		530	7	ZHM4
		531	8	ZHM4
		533	9	ZHM4
		534	10	ZHM4
		538	11	ZHM4
	Arbustal	447	1	ZHM5
		48	2	ZHM5
452		3	ZHM5	
453		4	ZHM5	
454		5	ZHM5	
455		6	ZHM5	
456		7	ZHM5	
458		8	ZHM5	
459		9	ZHM5	
532		10	ZHM5	
536		11	ZHM5	
537		12	ZHM5	
539		13	ZHM5	
540	14	ZHM5		

Figura 5.9. Identificación de ZHM y reclasificación de polígonos. Fuente: IGAC, 2018

Las áreas identificadas en la capa temática de suelos como cuerpos de agua (CA) y zonas urbanas (ZU), se deben mantener con la misma denominación, ya que esta información es proveniente de la cartografía base, por lo tanto, estas áreas no tendrán calificación de ZHM (sin importar el tipo de



cobertura) y conservarán sus identificadores de CA y ZU (Figura 5.10). Además, los denominados territorios artificializados, tendrán la calificación de ZHM0 y serán áreas cuyos contenidos de carbono no serán monitoreados ni cuantificados (Figura 5.10). De acuerdo con la metodología Corine Land Cover (IDEAM, 2010), los territorios artificializados son:

**Zonas urbanizadas**

Tejido urbano continuo

Tejido urbano discontinuo

**Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación**

Zonas industriales o comerciales

Red vial, ferroviaria y terrenos asociados

Zonas portuarias

Aeropuertos

Obras hidráulicas

**Zonas de extracción minera y escombreras**

Zonas de extracción minera

Zonas de disposición de residuos

**Zonas verdes artificializadas, no agrícolas**

Zonas verdes urbanas

Instalaciones recreativas

UCS	COBERTURA_NIVEL 3	ID	ZHM
CA	Herbazal	1120	CA
		1121	CA
		1122	CA
		1123	CA
	Arbustal	896	CA
		98	CA
		915	CA
EA450	Bosque denso	535	ZHM1
		446	ZHM1
	Herbazal	449	ZHM2
		450	ZHM2
	Pastos limpios	451	ZHM3
		531	ZHM3
	Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	533	ZHM0
Tejido urbano discontinuo	534	ZHM0	
	538	ZHM0	
ZU	Tubérculos	447	ZU
		448	ZU
	Mosaico de pastos y cultivos	452	ZU
		453	ZU
	Bosque fragmentado	454	ZU
		455	ZU
EA452	Tejido urbano continuo	456	ZHM0
		458	ZHM0
	Bosque abierto	459	ZHM4
		532	ZHM4

Plantación forestal	536	ZHM5
	537	ZHM5
	539	ZHM5
	540	ZHM5

**Figura 5.10.** Reclasificación de polígonos: Identificación de ZHM0, cuerpos de agua y zonas urbanas.  
Fuente: IGAC, 2018

Cuando a todos y cada uno de los polígonos se les ha otorgado una categoría de ZHM, este archivo Excel es vinculado al shape (resultado de la unión espacial), empleando la herramienta “Join” del software ArcGis. El procedimiento se realiza mediante un campo común (columna ID), conocido como “llave” o “clave”, presentes tanto en el shape como en el archivo Excel., por tal razón es determinante no realizar cambios en el campo (columna) que se haya elegido como llave, en el ejemplo, columna “ID”.

Una vez se ha vinculado el nuevo campo de ZHM al shape temático, es necesario editar la capa por área de los polígonos resultantes, dado que el proceso de unión da como resultado un número importante de polígonos con tamaños muy poco representativos, que además no son cartografiables para la escala de salida del mapa, es decir, no cumplen con el área mínima cartografiable o unidad más pequeña de superficie que puede ser delimitada en un mapa. Esta área varía en función de la escala de presentación del trabajo (nivel de detalle) y del objeto del estudio (IGAC, 2016). En este caso se tomó como referencia el área mínima de mapeo reportada para la capa de suelos.

El primer paso de depuración de áreas se realiza mediante la opción “Eliminar” del conjunto de herramientas de administración de datos de “Generalización” en el software ArcGis. Se recomienda usar esta opción hasta polígonos de máximo 1 ha, para polígonos de mayor área, el proceso se debe hacer manualmente empleando la herramienta de geoprociamiento “Merge”, realizando un análisis cuidadoso de decisión en el momento de fusionar los polígonos. El proceso finaliza cuando en el shape se tienen polígonos de ZHM con el área mínima de mapeo especificada en la capa temática de suelos (Figura 5.11).

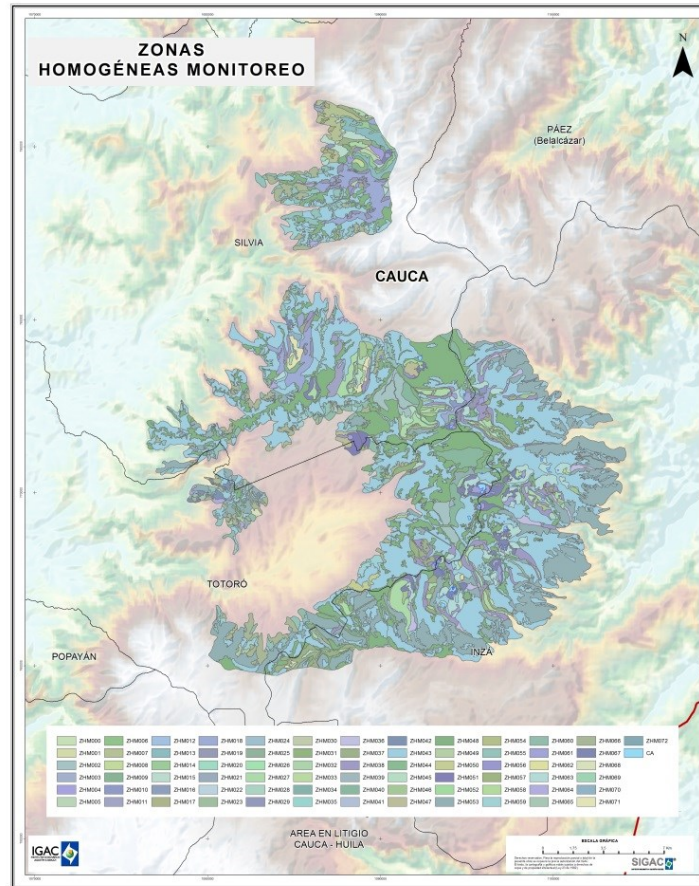


Figura 5.11. Shape temático de Zonas Homogéneas de Monitoreo. Fuente: IGAC, 2018.

El objetivo de la delimitación de ZHM es identificar, cuantificar y visualizar aquellas áreas con características edáficas y de uso similares. Al respecto Visconti, F., y De Paz, J. (2016), plantean una metodología basada en la hipótesis de que los factores que determinan principalmente el contenido de materia orgánica en los suelos son: clima, tipo de suelo y uso y manejo del mismo. Los autores sugieren que a partir de estas variables se pueden delimitar zonas agroecológicas homogéneas, dentro de las cuales, la variabilidad de la materia orgánica del suelo está estrechamente relacionada al manejo agrícola.

### 5.1.6 Tipos de puntos de muestreo para cuantificación de carbono

Para efectos de esta hoja de ruta es importante tener en cuenta que existen tres (3) tipos de puntos, los primeros denominados *puntos de monitoreo*, definidos también en este documento como *puntos permanentes de muestreo georreferenciado* (PPMG), los cuales hacen alusión a los sitios específicos donde previamente se realizó un perfil edafológico y ya existe un dato cuantificado de COS; cabe mencionar que, a partir de éstos, se generó el mapa de línea base del COS de páramos y humedales. El segundo grupo, *puntos de densificación*, son los nuevos puntos que serán ubicados en áreas dónde aún no existe un registro de carbono orgánico en el suelo y el tercero *puntos de balance*, los cuales corresponden a los puntos establecidos por el IDEAM en el Inventario Forestal

Nacional (IFN), en éstos a nivel de suelo el carbono es medido en muestras obtenidas en calicatas (como en los puntos de monitoreo) y se realiza el proceso de cuantificación de biomasa de acuerdo a la metodología establecida por el IDEAM con el fin de realizar el balance total del sistema (suelo + biomasa) (Figura 5.12).

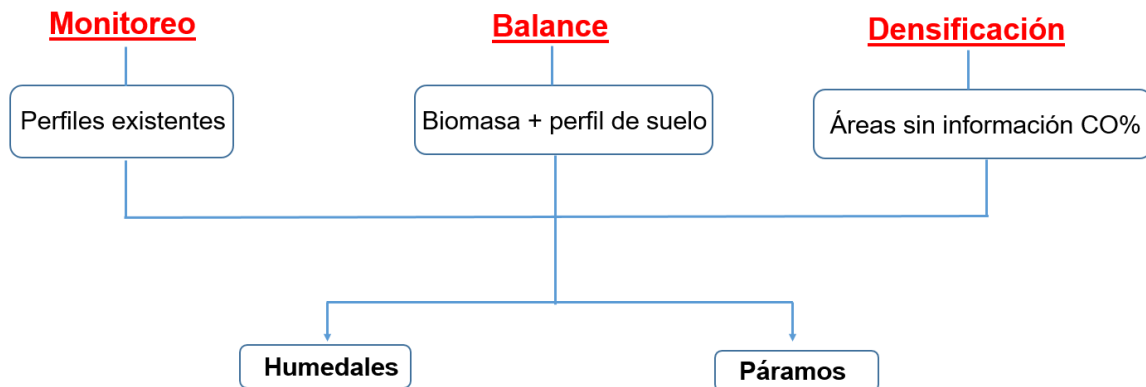


Figura 5.12. Diagrama de las líneas de muestreo. Fuente: IGAC, 2018.

El número de puntos a muestrear (puntos de densificación) obedece a la intensidad de muestreo establecida, ésta se refiere al número de muestras a tomar por unidad de área (# puntos ha<sup>-1</sup>); en los levantamientos de suelos se relaciona directamente con la escala de publicación, es decir, un estudio general (escala 1:100.000), tiene una intensidad de muestreo menor, en comparación con un estudio semidetallado (escala 1:25.000) o detallado (escala 1:10.000) en dónde el número de muestras por hectárea incrementa conforme aumenta el nivel de detalle.

Para la presente hoja de ruta se planteó una intensidad de muestreo de 1 punto cada 150 ha, partiendo de los lineamientos establecidos para ordenamientos ambientales en pendientes mayores al 25%, así como lo reportado en investigaciones realizadas sobre mapeo digital de suelos por autores como Biswas & Zhang, (2018), Carvalho et al. (2014), Roudier et al. (2012), Brungard, & Boettinger, (2010), entre otros.

La determinación de la intensidad de muestreo dependerá de las prioridades del investigador, el rango de tolerancia de la incertidumbre, el nivel de detalle con que se desee conocer el comportamiento de la variable y de la disponibilidad de recursos (tiempo, software, personal, presupuesto).

#### 5.1.6.1 Símbolo de las zonas homogénea de monitoreo.

El símbolo de identificación de cada ZHM debe ser construido de forma tal que, reúna las necesidades locales y también permita una fácil y sencilla recuperación de cualquier descripción del punto monitoreado dentro de una base de datos computarizada. El símbolo de cada ZHM tendrá la siguiente codificación.

**PZHM\_001      HZHM\_001**

Donde:

P: Ecosistema de Páramos.  
 H: Ecosistema de Humedales.  
 ZHM: Zona Homogénea de Monitoreo.  
 001: Consecutivo para cada ZHM.

### 5.1.7 Establecimiento de número de puntos y sitios de muestreo para cuantificación de carbono

Para la selección de los sitios dónde se realizarán los muestreos, se plantean dos metodologías: 1). Método edafológico y 2). Método estadístico espacial. La selección de un método u otro, (al igual que el criterio de intensidad de muestreo) dependerá de las necesidades y detalle de la información y del balance de las fortalezas y debilidades identificadas para cada método que se expondrá al final de cada una de ellos.

Es importante destacar que los dos métodos propuestos para la selección de los sitios de densificación, garantizan la cuantificación y monitoreo del COS y que cada uno está sujeto a un nivel de incertidumbre y de representatividad de la variable en el espacio, que será cuantificado y representado gráficamente en la fase de poscampo en la etapa de modelación y elaboración del mapa final.

#### 5.1.7.1 Método edafológico

Este método se basa en las metodologías de levantamientos de suelos establecidas e implementadas por el IGAC para la elaboración de estudios de suelos a diferentes escalas.

Para la determinación del número de puntos de densificación, se debe tener en cuenta la extensión de las ZHM en cada uno de los distritos y regiones, puesto que los puntos serán ubicados únicamente en las ZHM con un área mayor o igual a 30 ha y con el criterio de 1 punto cada 150 ha. Se estableció el área mínima de muestreo (30 ha), considerando que con esto se cubre entre el 95 y 98% del área en todos los distritos y regiones, los polígonos menores a 30 ha pertenecen a ZHM menos representativas y difícilmente cartografiables por su reducido tamaño.

El sistema de muestreo se diseñó garantizando que el contenido de COS en las ZHM con mayor extensión sea cuantificado, teniendo en cuenta el número total y áreas de los polígonos, así como el porcentaje de participación de cada uno de ellos dentro de cada ZHM. A continuación (Tabla 5.3), se presenta el número de puntos total para cada uno de los distritos y regiones, con base en los criterios de área y densificación mencionados:

**Tabla 5.3.** Número de puntos de monitoreo y densificación para ecosistemas de páramos y humedales.  
 Fuente: IGAC, 2018

Distrito Páramos	Área total	# Puntos densificación	# Puntos monitoreo (perfiles)	# Puntos balance (IFN)*	# Puntos totales**
Altiplano	20.121,1	136	9	-	145
Boyacá	447.988,0	2.923	107	-	3.030

Cundinamarca	242.269,7	1.600	62	-	1.662
Frontino	12.849,3	89	12	-	101
Macizo	34.330,1	228	13	-	241
Nariño	249.440,8	1.601	34	-	1.635
Perijá	15.960,2	97	10	-	107
Santander	272.144,8	1.746	87	-	1.833
Sonsón	8.848,5	48	11	-	59
Viejo Caldas	166.039,7	1.078	34	-	1.112
<i>Total Páramos</i>	<i>1.469.992,2</i>	<i>9.546</i>	<i>379</i>		<i>9.925</i>
<b>Región húmedales</b>					
Andina	478.646,2	2.868	219	-	3.087
Caribe	1.806.639,9	10.444	289	-	10.733
Orinoquía	520.933,6	3.319	65	-	3.384
Pacífica	17.325,6	108	21	-	129
<i>Total Húmedales</i>	<i>2.823.545,3</i>	<i>16.739</i>	<i>594</i>	-	<i>17.333</i>

\* Inventario Forestal Nacional. Serán suministrados por el IDEAM

\*\* Deben sumarse los puntos de balance

Para la ubicación de los puntos de densificación se establece el mapeo libre dirigido, donde estos puntos son ubicados en sitios estratégicos dada la experiencia y el conocimiento de los profesionales. Se considera dirigido porque los puntos están supeditados a modificación según condiciones de acceso a la zona, representatividad del punto u otros imprevistos que se puedan encontrar específicamente durante las labores de campo.

Para esta labor se recomienda el uso un software de Sistemas de Información Geográfica (SIG), que permita desplegar simultáneamente los diferentes insumos cartográficos. Se debe tener en cuenta principalmente las vías de acceso y las pendientes del terreno, sin embargo, es importante considerar factores de orden público y permisos de acceso a áreas protegidas. Los insumos mínimos para la ubicación de los puntos son: shape de ZHM, cartografía base, mapa de pendientes, mapa de sombras, modelo de elevación digital del terreno y otras fuentes de licencia libre como Google Earth.

En la Tabla 5.4 se observa el nivel de detalle a obtener con la implementación del método edafológico:

**Tabla 5.4.** Nivel de detalle método edafológico. Fuente: IGAC, 2018

Densidad de muestreo (ha)	# Puntos	Alcance	Interacción a analizar	Conocimiento del fenómeno
---------------------------	----------	---------	------------------------	---------------------------

1 cada 150	3030 + IFN	Análisis local (Municipal)	Comportamiento regional espacial COS y su relación específico con: cobertura nivel 3 (grupos de cultivos: cereales, tubérculos, hortalizas, entre otros, arreglos de pastos, bosque denso, bosque de galerías, herbazal denso, herbazal abierto, entre otros) y el tipo de suelo.	Riguroso
------------	------------	----------------------------	---	----------

A continuación (Tabla 5.5), se presentan de manera general las fortalezas y debilidades identificadas en la implementación de esta metodología.

**Tabla 5.5.** Fortalezas y debilidades método edafológico. Fuente: IGAC, 2018

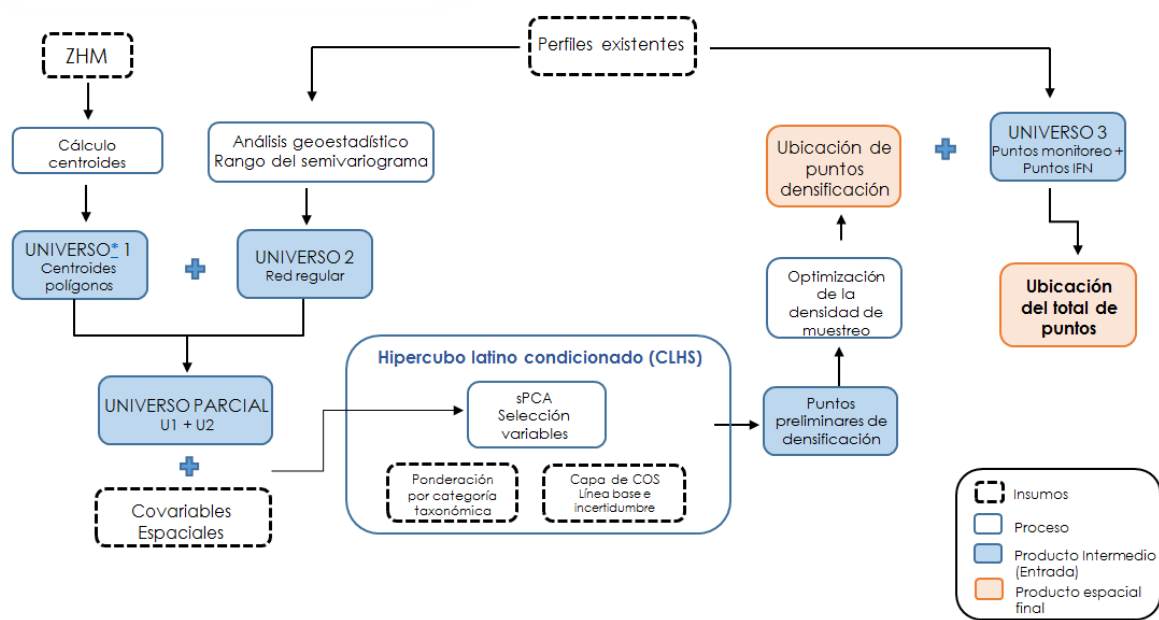
Fortalezas	Debilidades
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Involucra conocimiento y experiencia del edafólogo.</li> <li>• Contempla vías de acceso y barreras naturales (altas pendientes, ríos, arroyos, etc.).</li> <li>• Considera factores sociales y de orden público.</li> <li>• Establece puntos con ubicación flexible.</li> <li>• No requiere software ni personal especializado en análisis de datos.</li> <li>• No requiere hardware robustos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Método altamente subjetivo.</li> <li>• No considera el comportamiento de la variable de interés en el espacio.</li> <li>• Puede tener en cuenta muestras poco o nada representativas de la población total.</li> </ul>

### 5.1.7.2 Método estadístico espacial

Con esta metodología se busca representar el comportamiento del carbono orgánico en los suelos de los ecosistemas de páramo y humedales, a través del estudio y análisis de la estructura espacial de los datos registrados en los perfiles de suelo existentes (calicatas). En este sentido, se establecen tres (3) “universos” (conjuntos de puntos) con los cuales se pretende incorporar algunos factores que afectan el contenido y comportamiento del carbono orgánico en los suelos del área de estudio. El *universo 1* incluye el efecto de la interacción “tipo de suelo – cobertura”, el *universo 2* incorpora la estructura y dependencia espacial del CO en el área de estudio y el *universo 3* constituye los registros existentes de CO (perfiles del estudio semidetallado y puntos del IFN). Cada uno de los universos propuestos se estructura en bases de datos espaciales así:

- i) Universo 1: Base de datos con la coordenada del centroide de cada Zona Homogénea de Monitoreo (ZHM).
- ii) Universo 2: Base de datos de la red regular artificial espacial, determinada por el análisis geoestadístico.
- iii) Universo 3: Base de datos con los perfiles existentes y puntos del IFN en las áreas de páramos y humedales.

En la Figura 5.13 se observa el modelo secuencial de análisis espacial que se emplea para la ubicación de los puntos de muestreo.



**Figura 5.13.** Modelo general para establecimiento de puntos de densificación por método estadístico espacial.  
Fuente: IGAC, 2018

Para el procesamiento y análisis estadístico de la información se recomienda el entorno y lenguaje de programación libre R Project.

Para la obtención de los diferentes universos se realizan los siguientes procesos metodológicos:

- **Universo 1:**

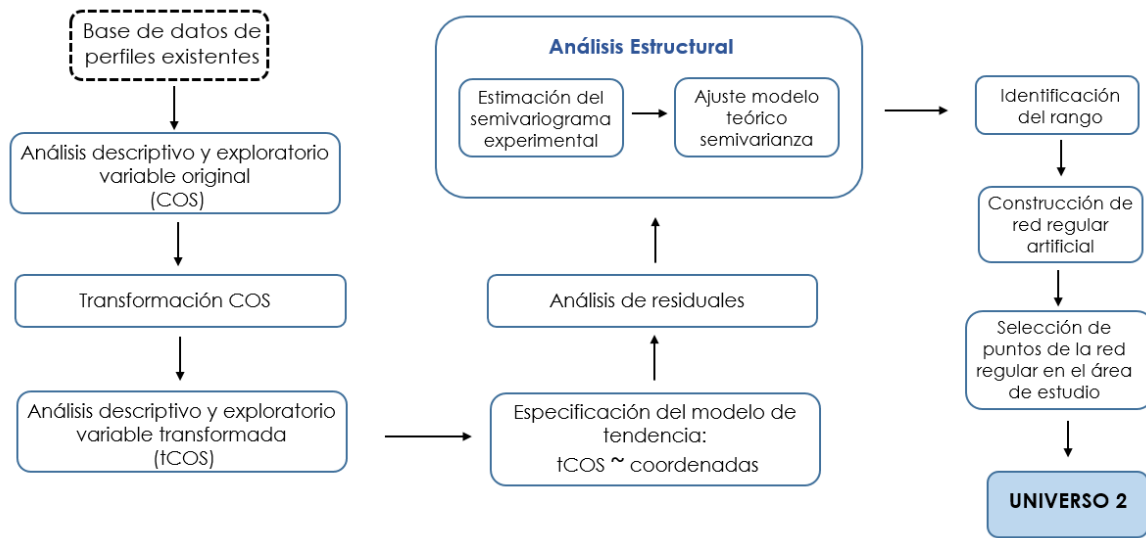
Partiendo de la capa de polígonos de Zonas Homogéneas de Monitoreo, determine la coordenada proyectada (Sistema MAGNA Colombia) del centroide de todos y cada uno de los polígonos, sin importar su área.

La base de datos obtenida estará constituida por dos columnas (coordenadas  $X$  y  $Y$ ) y tantas filas como polígonos conformen la capa de ZHM.

- **Universo 2:**

Para la determinación del universo 2, se realiza un análisis geoestadístico en la plataforma R (anexo 7) por distritos y regiones a los datos de stock de carbono orgánico de los perfiles de suelos existentes en páramos y humedales, con el fin de identificar la estructura de correlación espacial del COS y la distancia hasta la cual hay correlación entre los datos, término conocido como *rango*, uno de los parámetros del variograma teórico. El rango identificado, corresponde a la distancia del tamaño de celda con la cual se construirá la red regular artificial de muestreo, es decir, el universo 2. En la Figura 5.14 se muestra el esquema secuencial para la obtención del universo 2.





**Figura 5.14.** Esquema secuencial para obtención de puntos de muestreo del universo 2. Fuente: IGAC, 2018

A continuación se describe el proceso para obtención del universo 2:

➤ **Análisis descriptivo y exploratorio de la variable original: stock carbono orgánico (COS)**

Una vez conformada la base de datos con los contenidos de COS de los perfiles existentes georreferenciados, se inicia con el análisis descriptivo y exploratorio de la variable original (COS) de forma convencional, es decir, sin tener en cuenta el aspecto espacial de los datos. Todas las técnicas descriptivas y exploratorias están enfocadas en evaluar la estacionariedad del proceso, es decir, que la media y la varianza sean constantes y la covarianza es función del vector de separación entre los puntos (Santa, 2012). El análisis descriptivo permite organizar, presentar y resumir la información, incluye diagramas de distribución y de frecuencia relativa y absoluta (Figura 5.13). Con el análisis exploratorio se identifican datos atípicos o extraños, tendencias o patrones y es un criterio para decidir si se incorporan nuevas técnicas o medidas, este análisis contempla el cálculo de medidas de tendencia central (media y mediana), de dispersión (desviación estándar, varianza, coeficiente de variación promedio) y de forma (asimetría, curtosis).

Incorpore el componente espacial en el análisis de la variable transformada para evidenciar posibles patrones de distribución (agregación, aleatoriedad, regularidad) a través del área de estudio.

Con base en los resultados obtenidos decida si es necesario o no transformar la variable y la transformación a emplear. Se recomienda usar el criterio de la familia de transformaciones potenciales Box – Cox.

➤ **Análisis descriptivo y exploratorio de la variable transformada: stock carbono orgánico transformado (tCOS)**

Una vez realizada la transformación, se debe realizar de nuevo todo el procedimiento de análisis exploratorio sobre la variable transformada (tCOS), con el fin de conocer cómo cambió la distribución de la variable y si efectivamente se consigue la disminución de la variabilidad de los datos. Incorpore el componente espacial en el análisis de la variable transformada para evidenciar

posibles patrones de distribución (agregación, aleatoriedad, regularidad) a través del área de estudio. Si se evidencia la existencia de alguna tendencia en los datos, es necesario construir un modelo para removerla, en virtud que sea plausible la hipótesis de media constante en toda el área de estudio (Santa, 2012).

➤ **Modelo para la tendencia**

Para remover la tendencia en los datos es necesario ajustar un modelo de regresión donde la variable explicada es tCOS y las variables explicativas sean las coordenadas de las ubicaciones de los perfiles existentes. Para identificar la tendencia se emplean diagramas de dispersión entre las coordenadas proyectadas y tCOS y modelos polinómicos de primer, segundo y tercer grado. Se sugiere emplear el mecanismo de selección paso a paso para descartar aquellos términos no significativos en el modelo.

El modelo general estimado para tCOS será:

$$tCOS = \beta_0 + \beta_1x + \beta_2y + \beta_3xy + \beta_4x^2 + \beta_5y^2 + \beta_6x^2y + \beta_7y^2x + \beta_8x^3 + \beta_9y^3 + \varepsilon$$

Se recomienda emplear el criterio de información de Akaike (AIC) para seleccionar el modelo final.

➤ **Análisis de residuales**

La hipótesis básica del modelo geoestadístico se basa en que el proceso es estacionario, cuando los datos no parecen satisfacer dicho requerimiento, es necesario explorar alternativas para cambiar la estructura de las observaciones, tales como las transformaciones para estabilizar la variabilidad y los modelos de regresión para eliminar la tendencia y, por lo tanto, cumplir con los supuestos del modelo (Santa, 2012). Por esta razón, se debe analizar nuevamente el comportamiento de la distribución de los residuales del modelo de regresión estimado, con el fin de corroborar que se eliminó la tendencia y que la variabilidad es baja (calcule medidas y gráficos descriptivos para los residuales).

➤ **Análisis estructural**

El análisis y modelamiento de la estructura de correlación espacial de un fenómeno es conocido dentro de la Geoestadística como el *análisis estructural*, esto corresponde a la estimación del semivariograma experimental y al ajuste del modelo teórico de semivarianza con fines de predicción en sitios no muestreados (Santa, 2012), cabe resaltar que en la presente hoja de ruta, el ajuste del modelo teórico de semivarianza será empleado para identificar la distancia hasta la cual hay correlación entre los datos (rango) y no para hacer predicciones.

- **Estimación del semivariograma experimental.** Para la estimación del semivariograma experimental se sugiere emplear el paquete *geoR* (Ribeiro y Diggle, 2016), para lo cual los datos deben almacenarse en un tipo de objeto llamado *geodata* que es la manera en la cual maneja la información espacial el paquete.

La estimación del semivariograma experimental omnidireccional (combinando todas las direcciones posibles) para los residuales del modelo de regresión se elabora empleando el estimador de momentos (también llamado clásico o de Matheron).

- **Ajuste del modelo teórico de semivarianza.** Luego de la estimación del semivariograma experimental, se debe identificar un posible modelo teórico de semivarianza que mejor se ajuste al comportamiento de la estructura de correlación espacial de los datos y posiblemente del fenómeno. El paquete *geoR* dispone de la función *eyefit* (Dutter, 2016) que permite realizar el ajuste a sentimiento del modelo, es decir, encontrar modelos candidatos y valores iniciales de los parámetros (meseta, pepita y rango, entre otros) que posteriormente fueron usados en los métodos estadísticos de estimación de parámetros del semivariograma (mínimos cuadrados y máxima verosimilitud).

Para realizar el cálculo por los mínimos cuadrados se usa la función *variofit* (Ribeiro y Diggle, 2006) y con el argumento *weights* (Winship y Radbill., 1994) se pueden obtener los mínimos cuadrados ordinarios (OLS), ponderados (por el número de pares (WLS - npairs) (Cressie y Hawkins, 1980) y por el método de Cressie (WLS - Cressie) (Cressie, 1985). También es posible obtener estimaciones por máxima verosimilitud (ML) (Anselin, 1988) y máxima verosimilitud restringida (REML) considerando que el proceso sigue una distribución normal multivariada empleando la función *likfit* y usando el argumento *lik.method* (Ribeiro et al., 2003).

Con la estimación del semivariograma experimental se determina la máxima distancia en la cual los datos de stock de carbono orgánico (COS) se encuentran correlacionados (rango), el análisis se realiza para cada distrito y región. Para el ecosistema de páramos se encontró una distancia máxima de 1.664,0 m y para el ecosistema de humedales de 4.149 m, con tales criterios se creó la red regular artificial con un tamaño de celda de 1.7 km para páramos y de 4 km para humedales.

De esta manera, la base de datos espacial del universo 2, estará constituida por las coordenadas planas de cada uno de los puntos de la red artificial que están localizados dentro del área de estudio.

#### ➤ Optimización de puntos de muestreo

Dado el elevado número de puntos obtenidos para el universo parcial (*universo 1 + universo 2*), es necesario seleccionar un subconjunto del universo parcial. Para este procedimiento se sugiere usar la metodología de muestreo denominada Hipercubo Latino Condicionado (cLHS, por sus siglas en inglés) desarrollada por Minasny & McBratney, (2006), la cual es ampliamente usada en el muestreo de suelos con presencia de variables auxiliares con fines de mapeo digital (Carvalho et al., 2014).

El método cLHS, es un muestreo aleatorio estratificado que proporciona una eficiente forma para muestrear diferentes variables desde su distribución multivariada (Minasny & McBratney, 2006), es decir, el procedimiento parte del hecho que la variable de respuesta (COS) es el resultado de la interacción de otras covariables en el espacio y en el medio, por tal razón el método del cLHS involucra el comportamiento de dichas covariables, para seleccionar las muestras en función de la variable de interés, en este caso: COS.

Mediante la utilización de variables auxiliares, cLHS optimiza por localización, la distribución de la muestra en función del espacio geográfico y la información disponible. Su ventaja radica en mejorar la estimación de la tendencia, del variograma y de la interpolación espacial simultáneamente, por lo tanto, mejora la precisión total del mapeo (Gao et al. 2016). En el mapeo digital de suelos, la

predicción de las propiedades del suelo se basa en la forma como interactúan los atributos observados del suelo, otras variables edáficas y las variables ambientales (McBratney *et al.*, 2003).

Dado el imprescindible uso de covariables, se sugiere seleccionar aquellas que proporcionen más información por medio del método MULTISPATI-PCA (anexo 8), una nueva forma de análisis de componentes principales (PCA) que contempla la información espacial (Córdoba *et al.* 2016), a través del cálculo del índice de Moran entre los datos de un sitio y el dato promedio de sus vecinos (Córdoba *et al.*, 2012). Como se observa en el anexo 9, se emplean las librerías *spdep* (Bivand, 2014) y *ade4* (Chessel *et al.*, 2004).

Para verificar la existencia o ausencia de autocorrelación espacial, se emplean diferentes índices, siendo la I de Moran la más conocida y utilizada en la práctica. El índice de Moran puede ser interpretado como el coeficiente de correlación de Pearson, con una matriz de pesos definida por el usuario que mantiene el rango entre -1 y 1, en la que el signo es indicativo de autocorrelación positiva (+) o negativa (-). Este índice prueba la hipótesis nula de ausencia de autocorrelación (es decir aleatoriedad del fenómeno), frente a la hipótesis alternativa de existencia de autocorrelación espacial (positiva o negativa) (Moreno y Vayá, 2000).

Con base en la metodología propuesta por Johnson & Wichern (2008), para identificar las variables que proporcionan la mayor cantidad de información, se calcula el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) entre los componentes principales espaciales resultantes y las variables originales. De esta manera se identifica la combinación lineal de variables que proporciona la mayor variabilidad explicada por los componentes.

El resultado del cLHS, entre otros, es esencialmente una base de datos geográfica con la localización de cada uno de los puntos seleccionados. La muestra seleccionada tiene las mismas características poblacionales del universo parcial, es decir, la distribución y características de las covariables en los puntos seleccionados, guardan las mismas proporciones y propiedades que en la totalidad del área de estudio.

#### ➤ **Puntos totales de muestreo**

Continuando con el esquema secuencial de análisis espacial (Figura 5.13), una vez obtenido el resultado del muestreo optimizado cLHS (realizado a través del software libre R – anexo 10), es decir la ubicación de los puntos de densificación, se totaliza el número de puntos de muestreo vinculando los puntos de monitoreo y de balance (IFN) (universo 3).

La ubicación espacial de cada uno de los puntos de muestreo (densificación, monitoreo y balance), compondrán una base de datos en formato shape y Excel.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente se establece según las necesidades y el nivel de detalle a requerir de la información una propuesta con diferentes densidades de muestreo y el alcance de cada uno de estas (Tabla 5.6):

**Tabla 5.6.** Correlación espacial (I de Moran) para diferentes densidades de muestreo en el distrito de páramo de Boyacá. Fuente: IGAC, 2018

Densidad de muestreo (ha)	Alcance	Interacción a analizar	Conocimiento del fenómeno
Perfiles existentes	Monitoreo línea base (ecosistema)	Comportamiento <b>general</b> espacial COS y su relación con: cobertura nivel 1 (agrícola, pecuario y conservación) y el tipo de suelo.	General
1 cada 2.500	Cuantificación análisis general (ecosistema)	Comportamiento <b>general</b> espacial COS y su relación con: cobertura nivel 1 (agrícola, pecuario y conservación) y el tipo de suelo Disminución de la incertidumbre.	General*
1 cada 750	Análisis regional (Distrito - Región)	Comportamiento regional espacial COS y su relación <b>inicial</b> con: cobertura nivel 2 (cultivos permanente, transitorios, pastos, bosques, áreas arbustivas y herbáceas) y el tipo de suelo.	Intermedio
1 cada 350	Análisis regional (Distrito - Región)	Comportamiento regional espacial COS y su relación <b>específica</b> con: cobertura nivel 2 (cultivos permanente, transitorios, pastos, bosques, áreas arbustivas y herbáceas) y el tipo de suelo Disminución de la incertidumbre.	
1 cada 200	Análisis local (Municipal)	Comportamiento regional espacial COS y su relación <b>inicial</b> con: cobertura nivel 3 (grupos de cultivos: cereales, tubérculos, hortalizas, entre otros, arreglos de pastos, bosque denso, bosque de galerías, herbazal denso, herbazal abierto, entre otros) y el tipo de suelo.	Riguroso
1 cada 150		Comportamiento regional espacial COS y su relación <b>específica</b> con: cobertura nivel 3 (grupos de cultivos: cereales, tubérculos, hortalizas, entre otros, arreglos de pastos, bosque denso, bosque de galerías, herbazal denso, herbazal abierto, entre otros) y el tipo de suelo.	
1 cada 100		Comportamiento regional espacial COS y su relación <b>inicial</b> con: cobertura nivel 4 (tipos de cultivos: papa, arveja, tomate, entre otros, bosque denso alto inundable, Herbazal denso de tierra firme arbolado, entre otros) y el tipo de suelo.	
1 cada 50	Análisis local (Predial)	Comportamiento regional espacial COS y su relación <b>específica</b> con: cobertura nivel 4 (tipos de cultivos: papa, arveja, tomate, entre otros, bosque denso alto inundable, Herbazal denso de tierra firme arbolado, entre otros) y el tipo de suelo.	Muy riguroso

A continuación (Tabla 5.7), se presentan de manera general las fortalezas y debilidades identificadas en la implementación de la metodología de ubicación y selección de puntos por método estadístico-espacial.

**Tabla 5.7.** Fortalezas y debilidades método estadístico espacial. Fuente: IGAC, 2018

Fortalezas	Debilidades
------------	-------------

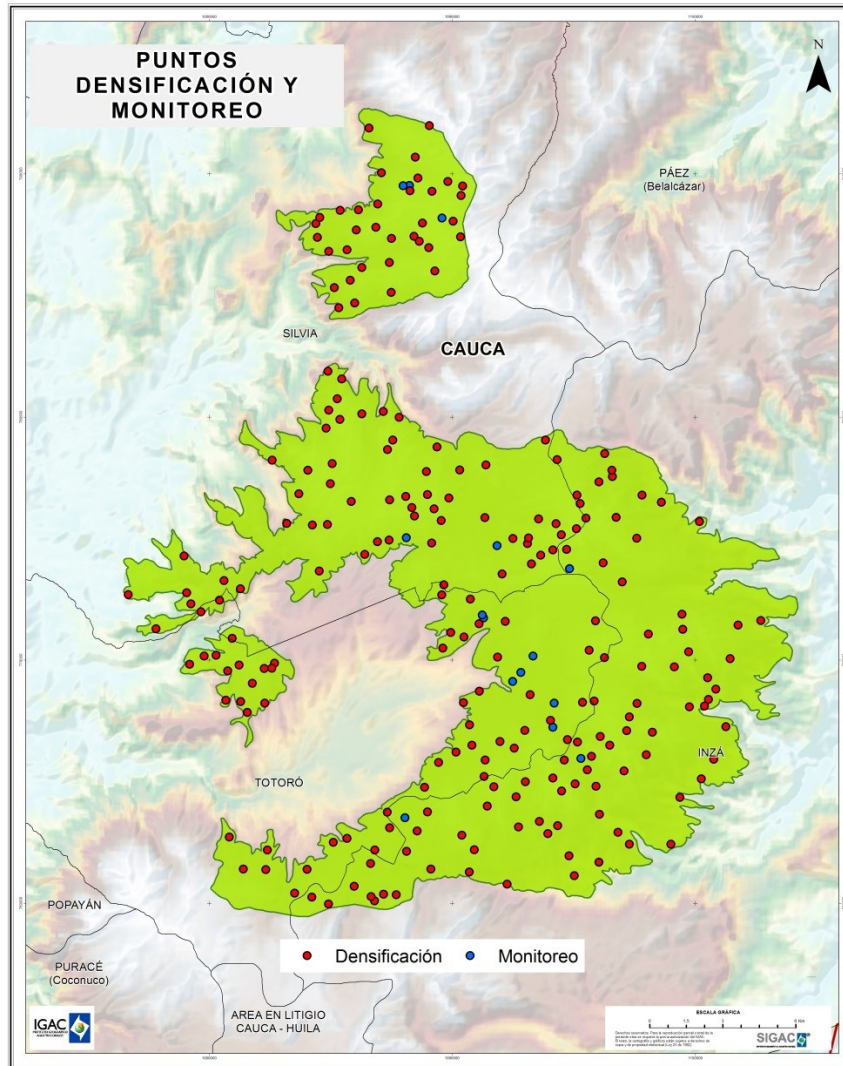
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Método cuantitativo.</li> <li>• Considera la correlación espacial de la variable de interés y su relación con el medio.</li> <li>• Garantiza la representatividad de la muestra elegida, respecto de la población total.</li> <li>• Preserva la distribución de frecuencias de covariables continuas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere software y personal especializado en análisis de datos.</li> <li>• No contempla vías de acceso ni barreras naturales (altas pendientes, ríos, arroyos, etc.).</li> <li>• No considera factores sociales ni de orden público.</li> <li>• Establece puntos con ubicación poco o nada flexible.</li> </ul>
---	---

### 5.1.8 Mapa de puntos de muestreo proyectado (monitoreo y densificación)

Teniendo en cuenta que los Puntos Permanentes de Muestreo Georreferenciados (PPMG) corresponden a los perfiles modales tomados de los estudios de suelos a escala 1:25.000, este muestreo se debe realizar en las coordenadas dadas. Por otro lado para la ubicación de los puntos de densificación se establece el mapeo libre dirigido, donde estos puntos son ubicados en sitios estratégicos (según el análisis de las ZHM) dada la experiencia y el conocimiento que tengan los profesionales. Se considera dirigido porque los puntos están supeditados a modificación según condiciones de acceso a la zona, representatividad del punto u otros imprevistos.

Estos puntos de muestreo (monitoreo y densificación) deben quedar plasmados en un mapa, que contenga además las características principales de toponimia, vías, drenajes, curvas de nivel, polígonos de las ZHM, entre otras. Toda esta información debe estar preferiblemente a escala 1:25.000.

La Figura 5.15, muestra un ejemplo de mapa del muestreo proyectado, identificando clara y sencillamente la proyección del muestreo en campo para la determinación del COS.



**Figura 5.15.** Ejemplo Mapa de puntos proyectados para etapa de campo. Fuente: IGAC, 2018.

Los puntos de monitoreo deben llevar un código que los identifique a través del tiempo, el cual se asignará una vez definidos. El identificador del punto debe contener los códigos utilizados por el departamento nacional de estadística (DANE) de la siguiente manera:

P 00 00 000      H 00 00 000  
                           └─┬─┬─┘      └─┬─┬─┘  
                           CD CM Consec.      CD CM Consec.

Donde:

P: Ecosistema de Páramos.      CD      CM      Consec.

H: Ecosistema de Humedales.

CD: Código del departamento (DANE).

CM: Código del municipio (DANE).

Consec: Consecutivo del PPMG asignado.

Un ejemplo del código asignado a un punto en un ecosistema de Páramo en el municipio de Aquitania sería la siguiente:

## P 1547001

Donde:

P: Ecosistema de Páramos.

15: Código DANE del departamento de Boyacá

47: Código DANE del municipio de Aquitania.

001: Consecutivo del PPMG.

48

### 5.1.9 Socialización del proyecto en el área de estudio

Al igual que el clima, la vegetación, el relieve y el tiempo, el ser humano también se constituye en un factor importante en la dinámica del suelo puesto que sus costumbres, prácticas agrícolas, cultura y dinámicas sociales entorno a su uso, son factores formadores o modificadores del mismo.

La Gestión Social en la ejecución de determinado proyecto, toma importancia debido a que constituye el canal de interacción directa con las comunidades que orientan y facilitan el ingreso de los profesionales a cada una de las zonas. La socialización previa con las poblaciones del área de influencia acerca de la importancia del proyecto con la participación activa de los diferentes actores sociales involucrados, facilita el desarrollo de las actividades de campo.

Este proceso inicia con la presentación del proyecto frente a entes institucionales o individuos involucrados con el monitoreo a través de una carta de presentación con los soportes pertinentes según la entidad de ejecución, posteriormente se realiza la recopilación de información de los actores sociales formales o no formales, como: el alcalde, presidentes de juntas de acción comunal, presidentes de organizaciones sociales, etc. A continuación se realiza el proceso de socialización utilizando estrategias como reuniones, recorridos de campo, charlas personalizadas o divulgación del proyecto (afiches, plegables, volantes informativos, cuña radial y/o videos) (Figura 5.16).

Por último, toda la información recopilada debe sistematizarse generando las lista de los actores sociales, contactos, radicado de las cartas de presentación, evidencias fotográficas, actas de reuniones y el track de recorridos, donde se muestran los puntos georreferenciados de interés y de utilidad para el equipo de profesionales que desarrollarán el trabajo de campo, todo el material debe ser suministrado al coordinador del proyecto o de la comisión de campo. Además del diligenciamiento del formato de asistencia a reuniones y/o capacitaciones (Anexo 11).





Figura 5.16. Esquema general de socialización del proyecto etapa pre-campo. Fuente: IGAC, 2018.

### 5.1.10 Cronograma de campo

El cronograma es un registro minucioso del proceso que se ha de seguir en campo para llegar a un fin preestablecido (cronograma general). Consiste en analizar y fraccionar las actividades necesarias para el monitoreo del carbono orgánico en los suelos de paramos y humedales a nivel nacional. Este debe contemplar el número de observaciones a realizar diariamente (cajuelas o calicatas), responsables del monitoreo y zonas de trabajo (Tabla 5.8).

Por último, se debe llenar el formato de planeación comisión en campo y el formato programación gastos de la comisión de campo, los cuales recopilan la información organizativa y financiera de la comisión en campo (Anexo 12 y 13).

Tabla 5.8. Ejemplo de cronograma de campo. Fuente: IGAC, 2018.

		NOMBRE DEL PROYECTO																
		MES																
		L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
<b>FASE MONITOREO /CALICATAS</b>																		
Reconocedor 1	Desplazamiento e instalación de la comisión	3	3	3	3	3		3	3	3	3	3	3		3			
Reconocedor 2		3	3	3	3	3		3	3	3	3	3	3	3		3		
Reconocedor 3		3	3	3	3	3		3	3	3	3	3	3	3		3		
Reconocedor 4		3	3	3	3	3		3	3	3	3	3	3	3		3		
Reconocedor 5		3	3	3	3	3		3	3	3	3	3	3	3		3		
<b>FASE DENSIFICACIÓN (CAJUELAS)</b>																		
Reconocedor 6	Desplazamiento e instalación de la comisión	10	10	10	10	10		10	10	10	10	10	10	10		0		
Reconocedor 7		10	10	10	10	10		10	10	10	10	10	10	10		0		
Reconocedor 8		10	10	10	10	10		10	10	10	10	10	10	10		0		
Reconocedor 9		10	10	10	10	10		10	10	10	10	10	10	10		0		
Reconocedor 10		10	10	10	10	10		10	10	10	10	10	10	10		0		
Total		65	65	65	65	65		65	65	65	65	65	65		15			
		Mapeo libre dirigido																

### 5.1.11 Insumos y materiales requeridos para campo

Los insumos necesarios para llevar a campo, se mencionan a continuación:

- Cartografía (Base, Temática escala 1:25.000).
- Listado de puntos permanentes de muestreo georreferenciados (PPMG).
- Shape de las ZHM.
- Brújula
- GPS.
- Cámara fotográfica.
- Cinta métrica.
- Nivel Abney.
- Formatos establecidos para fase de campo.
- Etiquetas de identificación de muestras.
- Bolsas plásticas de 500 g.
- Ucla y cilindros.
- Mazo de goma.
- Barreno holandés y/o barreno de aleta.
- Pala y palín.
- Machete.
- Lonas.
- Caja de icopor
- Tablet durabook.
- Tablas Munsell
- Cuchillo pedológico
- Elementos de identificación personal (chaleco, carnet, gorra)

Por lo tanto, antes de salir a campo se debe llenar la lista de chequeo con la finalidad de verificar los insumos requeridos en campo, utilizando el formato lista de chequeo de preparación de información en la etapa de precampo para los levantamientos de suelos (Anexo 14).

### 5.1.12 Control de calidad

Para dar inicio a la etapa de campo de monitoreo de carbono orgánico en suelos de ecosistemas de páramos y humedales en el territorio nacional, es de gran importancia que el equipo de trabajo encargado de ejecutar determinado proyecto haya realizado todas las actividades arriba relacionadas en el presente documento y estén cuidadosamente revisadas y aprobadas por el control de calidad, de tal manera, que se autorice la ejecución de la etapa de campo con la certeza que se está desarrollando el paso a paso del proceso, lo cual es fundamental para el logro de los objetivos propuestos. El control de calidad debe diligenciar el formato control de calidad levantamiento de suelos, donde queden consignadas las observaciones hechas a la etapa de pre campo, documento que será incluido dentro de la carpeta de trazabilidad del proyecto (Anexo 15).

### 5.1.13 Formatos necesarios en la fase pre-campo

- Formato cronograma y plan de trabajo.
- Formato inventario cartografía base.
- Formato información secundaria para el levantamiento y/o estudio de suelos.

- Formato inventario imágenes de sensores remotos.
- Formato perfiles de suelos- información secundaria.
- Formato planeación comisión en campo.
- Formato programación gastos de la comisión de campo.
- Formato lista de chequeo de preparación de información en la etapa de precampo para los levantamientos de suelos.
- Formato control de calidad levantamiento de suelos.
- Formato Asistencia a reuniones y/o capacitaciones.

## 5.2 FASE DE CAMPO

En esta fase se contemplan dos etapas, una de monitoreo y una de densificación. La primera hace referencia al seguimiento y muestreo que se hace a los puntos ya existentes y la segunda, de densificación se refiere a los nuevos puntos que se ubicarán en las áreas donde no se tiene información de los contenidos de carbono orgánico edáfico.

### 5.2.1 Reconocimiento preliminar

El reconocimiento preliminar se inicia con un recorrido general de la zona de estudio para familiarizarse con los paisajes, coberturas, los usos de las tierras y las vías de comunicación. Este reconocimiento permite modificar el plan de trabajo, ajustar actividades, conocer y registrar puntos clave para la programación del trabajo de campo (IGAC, 2014a).

Durante esta etapa preliminar, es necesario presentarse y establecer contactos con las autoridades locales, civiles y militares de la región de estudio para informar sobre la presencia de los funcionarios en la zona y conocer si existe algún tipo de impedimento para desarrollar el trabajo.

### 5.2.2 Ubicación del PPMG (Punto Permanente de Muestreo Georreferenciado)

Los PPMG en la etapa de **densificación**, son ubicados y muestreados directamente en el punto asignado, es decir, sin hacer desplazamientos a la toma de muestras. Por el contrario, para los puntos de **monitoreo** (perfil modal), es necesario desplazarse del PPMG antes de iniciar el muestreo como se describe a continuación.

Una vez llegue al punto de **monitoreo**, ubique el norte con la brújula, camine 3 metros en ese sentido e inicie la apertura de la calicata. Si en el desplazamiento encontrara algún obstáculo que no le permite avanzar en línea recta los 3 metros mencionados, gire algunos grados (15° o 30° de la norte) en el sentido de las manecillas del reloj y avance hasta completar los 3 metros. Registre los grados en las observaciones del formato de campo.

Es importante resaltar que el punto cardinal para cada monitoreo variará de acuerdo con el periodo al que corresponda (Tabla 5.9), es decir, para el primer monitoreo el muestreo se realizará a 3 metros en dirección norte del PPMG, para el segundo monitoreo a 3 metros en dirección este del PPMG y para el tercer monitoreo será a 3 m al sur del PPMG (Figura 5.17). Esta metodología se denomina tipo reloj (Etchevers *et al.*, 2005), que permite realizar monitoreos a través del tiempo de forma ordenada y secuencial.

**Tabla 5.9.** Periodo de monitoreo en años para cada ecosistema. Fuente: IGAC, 2018

Ecosistema	Monitoreo	Periodo (años)	Punto cardinal
<b>Páramos</b>	1°	5	Norte
	2°	10	Este
	3°	15	Sur
	4°	20	Oeste
<b>Humedales</b>	1°	4	Norte
	2°	8	Este
	3°	12	Sur
	4°	16	Oeste

Como se observa en la tabla anterior, los tiempo de monitoreo varían para cada ecosistema, para páramos se planta una periodicidad de 5 años y para humedales de 4 años (FAO, 2017; Wang *et al.*, 2016; Olivera, 2014; Yu *et al.*, 2012; Ma *et al.*, 2012), sin embargo teniendo en cuenta que estos ecosistemas son dinámicos, debe tenerse en cuenta la presencia de eventos climáticos que puedan afectar el contenido de C.O. en los suelos (fenómeno de la niña), caso en el cual debe programarse un monitoreo.

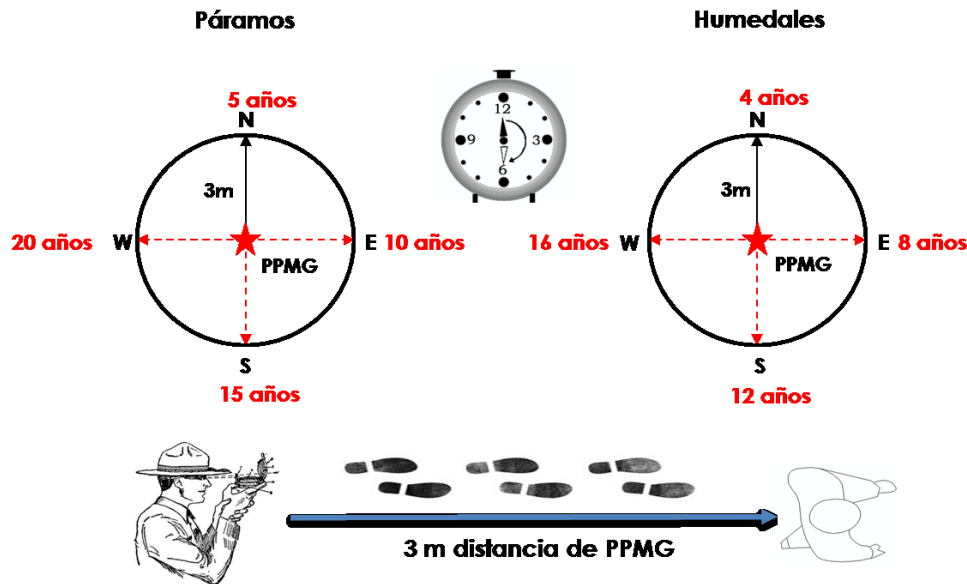


Figura 5.17. Ubicación y secuencia temporal para monitoreo en páramos y humedales. Fuente: IGAC, 2018

### 5.2.3 Registro de información

Se debe diligenciar el formato facilitativo para la captura de datos y observaciones de campo (Anexo 6). La información se registra de manera clara y precisa en todos los campos listados a continuación:

- ✓ **Código del PPMG:** identificación del punto permanente de muestreo georreferenciado en el cuál se registrará la información a través del tiempo. Este código será asignado en la etapa precampo cuando se ubiquen e identifiquen los puntos a monitorear.
- ✓ **Coordenadas:** cada PPMG de densificación o monitoreo debe estar acompañado de un sistema de posicionamiento global definido.
- ✓ **Altitud (msnm).**
- ✓ **Nombre:** nombre de la persona que realiza la toma de muestras en el punto de densificación o monitoreo.
- ✓ **Departamento/Municipio/Vereda o sitio:** información de la localización donde fue realizado el punto.
- ✓ **Ecosistema:** Páramo o Humedal.
- ✓ **Distrito o Región:** distrito para el ecosistema de páramos y región para las áreas en Humedales (Tabla 5.1 a y b).
- ✓ **Pendiente:** el grado de inclinación del terreno en la que se encuentre el PPMG.
- ✓ **Clima:** tipo de clima ambiental que se presente en la zona.
- ✓ **Cobertura reportada:** cobertura reportada en la cartografía.
- ✓ **Cobertura/uso actual:** cobertura encontrada en el PPMG en el momento del muestro, adicionar el uso actual, por ejemplo, tipo de cultivo.
- ✓ **Zona homogénea de monitoreo (ZHM):** código asignado a la zona homogénea en etapa precampo.

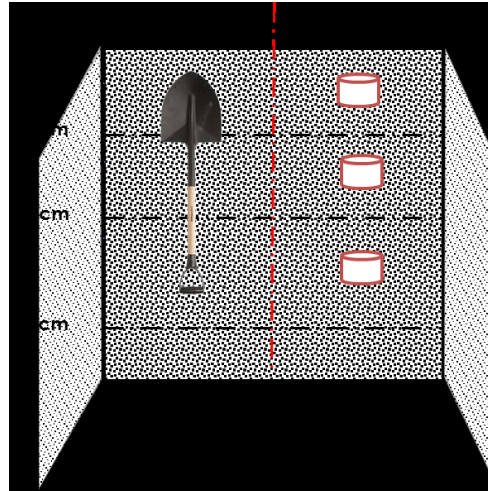
- ✓ **Punto cardinal de muestreo:** Norte, este, sur, oeste.
- ✓ **Tipo de muestra:** calicatas (monitoreo), cajuelas (densificación) o con barreno (suelos orgánicos o saturados).
- ✓ **Porcentaje de fragmentos:** porcentaje de fragmentos encontrados en el punto de muestreo, calculados de forma cualitativa (Sección 5.2.5 Fragmentos de roca).
- ✓ **Limitante de la profundidad:** cuando existe, se toman las muestras hasta la máxima profundidad permisible y se registra el tipo de limitante que se encuentre en el sitio de muestreo, por ejemplo, contacto lítico.
- ✓ **Profundidad de la limitante (cm).**
- ✓ **Número de muestras tomadas:** especifique la cantidad de muestras para densidad aparente y para caracterización físico-química.
- ✓ **Observaciones:** coloque las observaciones que considere importantes y que aporten al desarrollo del proyecto.

Cabe resaltar que todos los campos que contiene este formato se deben diligenciar sin dejar espacios vacíos, ya que esta información es indispensable en la fase de procesamiento de datos. Cuando haya alguna característica inexistente por ejemplo, fragmentos de roca o limitante de profundidad, registre “*No hay*” o “*No aplica (N/A)*” según sea el caso.

## 5.2.4 Toma de muestras

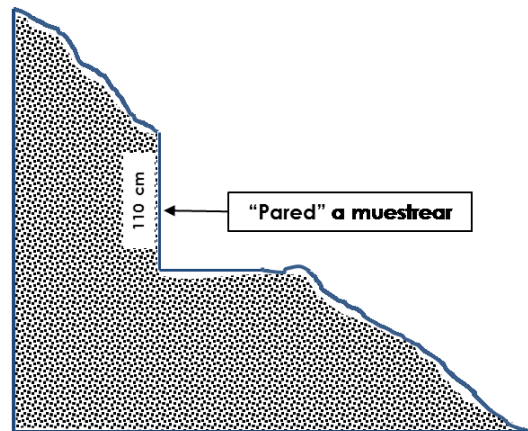
### 5.2.4.1 Puntos de densificación (cajuelas).

En la etapa de densificación se deben realizar los muestreos en cajuelas, con dimensiones de 50 cm de ancho x 50 cm de largo y 60 cm de profundidad. En cada una de ellas se toman seis (6) muestras (3 para cálculo de densidad aparente y 3 para cuantificación de carbono orgánico), a las siguientes profundidades: 0 - 15 cm, 15 - 30 cm y 30 - 50 cm. Es importante resaltar que el muestreo para densidad aparente inicia en el intervalo más superficial (0 – 15 cm), mientras que para carbono orgánico la primera muestra corresponde al intervalo más profundo (30 – 50 cm). En ambos casos las muestras deben ser tomadas en el punto medio de cada rango (Figura 5.18).



**Figura 5.18.** Profundidades de muestreo en cajuela. Fuente: IGAC, 2018

Oriente la cajuela de forma que la “pared” que se muestreé reciba la mayor cantidad de luz natural, en lugares con pendiente debe muestrear la “pared” que se encuentra en contra de la inclinación del terreno (Figura 5.19).



**Figura 5.19.** Ubicación de pared de muestreo en zonas de pendiente. Fuente: IGAC, 2018

Una vez abierta la cajuela elija la “pared” en la cual realizará el muestreo, demarque con el cuchillo pedológico y con ayuda de la cinta métrica, las profundidades a muestrear y divida verticalmente la cajuela en dos partes iguales, en una de ellas se toman las muestras para densidad aparente y en la otra las de cuantificación de carbono orgánico (Figura 5.18).

Es importante tomar primero las muestras para densidad aparente con el fin de disturbar lo menos posible el suelo. Tales muestras se extraen usando el barreno tipo Uhland para muestras inalteradas en las profundidades arriba especificadas, como se menciona a continuación:

1. Aliste las bolsas plásticas y diligencie las etiquetas de identificación para cada muestra (Anexo 16).
2. Registre en la etiqueta las dimensiones del cilindro (altura y diámetro) con el cuál tomará la muestra.
3. Limpie con el palín la superficie de la cajuela.
4. Ponga dos cilindros en el extremo inferior de la Uhland.
5. Ubique la Uhland de manera perpendicular al suelo verificando que el borde afilado del cilindro inferior haga contacto con el suelo.
6. Golpeé suavemente el extremo superior de la Uhland con el mazo de goma y profundice hasta la mitad de cada intervalo de muestreo especificado (aproximadamente 7,5 cm para el primero; 22,5 cm para el segundo y 40 cm para el tercero).
7. Es indispensable que el cilindro inferior se introduzca por completo en el suelo.
8. Extraiga lentamente la Uhland garantizando que la cantidad de suelo del cilindro inferior se mantenga inalterada.
9. Vierta cuidadosamente todo el suelo contenido en el cilindro inferior en una de las bolsas plásticas etiquetada.
10. Limpie exhaustivamente los cilindros para la siguiente muestra.
11. Para el muestreo de las restantes profundidades, repita el procedimiento desde el punto 4.

Posteriormente, se toman las muestras de suelo para cuantificación de carbono orgánico en la mitad restante de la cajuela (Figura 5.18), como se describe a continuación:

1. Aliste las bolsas plásticas y diligencie las etiquetas de identificación para cada muestra.
2. Limpie el cuchillo pedológico y el palín.
3. Introduzca el palín en el centro del intervalo de muestreo especificado, para el más profundo, aproximadamente 40 cm, para el intermedio 22,5 cm y para el menos profundo 7,5 cm. Inicie el muestreo del intervalo más profundo de la cajuela hacia la superficie, para evitar la contaminación de las muestras.
4. Tome aproximadamente 500 gr de suelo y colóquelos en una bolsa plástica etiquetada para su envío al laboratorio.
5. En suelos orgánicos o saturados de agua tome como mínimo 1000 gr.
6. Para el muestreo de las restantes profundidades, repita el procedimiento desde el punto 2.

Finalmente, verifique el número de muestras, el diligenciamiento de las profundidades y de las dimensiones del cilindro para cada muestra, cada una de ellas se debe empacar en doble bolsa junto con la respectiva etiqueta de identificación (Anexo 16).

Cuando exista alguna limitante de profundidad, haga el muestreo hasta la máxima profundidad permisible y registre el factor limitante y su profundidad en el formato facilitativo de campo (Anexo 6).

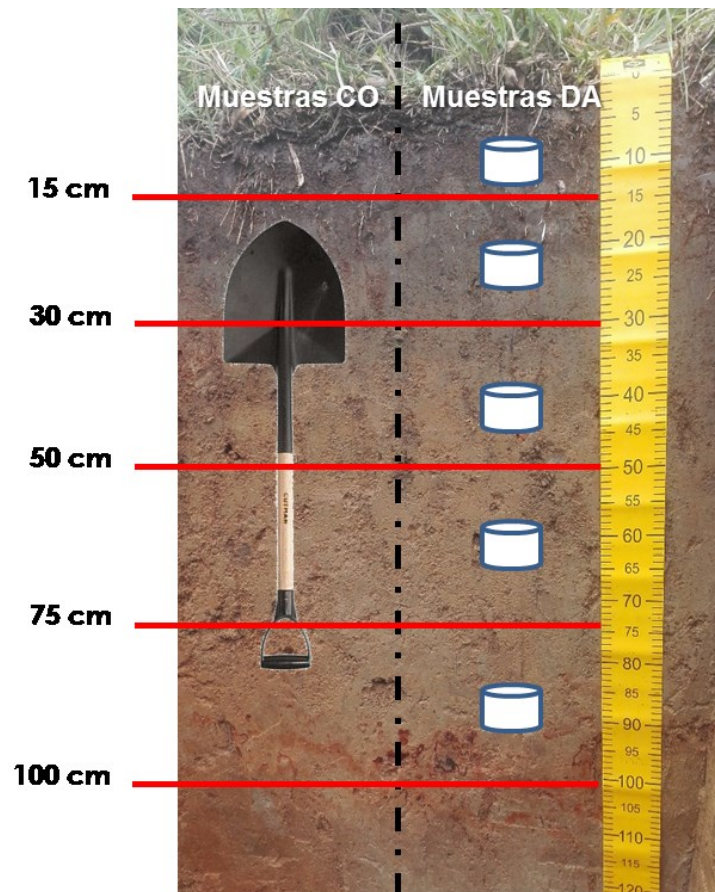
El número de cajuelas y su localización, estará sujeta a las zonas homogéneas de muestreo (ZHM) establecidas en fase de precampo.



#### 5.2.4.2 Puntos de monitoreo (calicatas).

Para la etapa de monitoreo se parte de los perfiles modales existentes en los Levantamientos Semidetallados de Suelos en las áreas de Influencia de los Páramos y Humedales de Colombia (IGAC, sin publicar), con un total de 956 perfiles, los que se constituyen en los PPMG a monitorear.

En los 956 PPMG realizar una calicata en forma de rectángulo de 110 cm de ancho x 150 cm de largo y 110 cm de profundo. En cada una de ellas se toman diez (10) muestras (5 para cálculo de densidad aparente y 5 para cuantificación de carbono orgánico), a las siguientes profundidades: 0 - 15 cm, 15 - 30 cm, 30 - 50 cm, 50 - 75 cm y 75 - 100 cm. Es importante resaltar que el muestreo para densidad aparente inicia en el intervalo más superficial (0 - 15 cm), mientras que para carbono orgánico la primera muestra corresponde al intervalo más profundo (75 - 100 cm). En ambos casos las muestras deben ser tomadas en el punto medio de cada rango (Figura 5.20).



**Figura 5.20.** Profundidades de muestreo en calicata. Adaptado de Fototeca IGAC, (2016).

Oriente la calicata de forma que la “pared” que se muestree reciba la mayor cantidad de luz natural, en lugares con pendiente debe muestrear la “pared” que se encuentre en contra de la inclinación del terreno (Figura 5.19).

Una vez abierta la calicata elija la “pared” en la cual realizará el muestreo, demarque con el cuchillo pedológico y con ayuda de la cinta métrica, las profundidades a muestrear y divida verticalmente la calicata en dos partes iguales, en una de ellas se toman las muestras para densidad aparente y en la otra las de cuantificación de carbono orgánico (Figura 5.20).

Es importante tomar primero las muestras para densidad aparente con el fin de disturbar lo menos posible el suelo. Tales muestras se extraen usando el barreno tipo Uhland para muestras inalteradas en las profundidades arriba especificadas, como se menciona a continuación:

1. Aliste las bolsas plásticas y diligencie las etiquetas de identificación para cada muestra (Anexo 16).
2. Registre en la etiqueta las dimensiones del cilindro (altura y diámetro) con el cuál tomará la muestra.
3. Limpie con el palín la superficie de la calicata.
4. Ponga dos cilindros en el extremo inferior de la Uhland.
5. Ubique la Uhland de manera perpendicular al suelo verificando que el borde afilado del cilindro inferior haga contacto con el suelo.
6. Golpee suavemente el extremo superior de la Uhland con el mazo de goma y profundice hasta la mitad de cada intervalo de muestreo especificado (aproximadamente 7,5 cm para el primero; 22,5 cm para el segundo, 40 cm para el tercero, 62,5 para el cuarto y 87,5 cm para el quinto).
7. Es indispensable que el cilindro inferior se introduzca por completo en el suelo.
8. Extraiga lentamente la Uhland garantizando que la cantidad de suelo del cilindro inferior se mantenga inalterada.
9. Vierta cuidadosamente todo el suelo contenido en el cilindro inferior en una de las bolsas plásticas etiquetada.
10. Limpie exhaustivamente los cilindros para la siguiente muestra.
11. Para el muestreo de las restantes profundidades, repita el procedimiento desde el punto 4.

Posteriormente, se toman las muestras de suelo para cuantificación de carbono orgánico en la mitad restante de la cajuela (Figura 5.20), como se describe a continuación:

1. Aliste las bolsas plásticas y diligencie las etiquetas de identificación para cada muestra.
2. Limpie el cuchillo pedológico y el palín.
3. Introduzca el palín en el centro del intervalo de muestreo especificado, para el más profundo aproximadamente 87,5 cm, para el siguiente 62,5 cm y para el intermedio 40 cm, para el siguiente 22,5 y para el más superficial 7,5cm. Inicie el muestreo del intervalo más profundo de la cajuela hacia la superficie, para evitar la contaminación de las muestras.
4. Tome aproximadamente 500 gr de suelo y colóquelos en una bolsa plástica etiquetada para su envío al laboratorio.
5. En suelos orgánicos o saturados de agua tome como mínimo 1000 gr.
6. Para el muestreo de las restantes profundidades, repita el procedimiento desde el punto 2.

Finalmente, verifique el número de muestras, el diligenciamiento de las profundidades y de las dimensiones del cilindro para cada muestra, cada una de ellas se debe empacar en doble bolsa junto con la respectiva etiqueta de identificación (Anexo 16).

Cuando exista alguna limitante de profundidad, haga el muestreo hasta la máxima profundidad permisible y registre el factor limitante y su profundidad en el formato facilitativo de campo (Anexo 6).

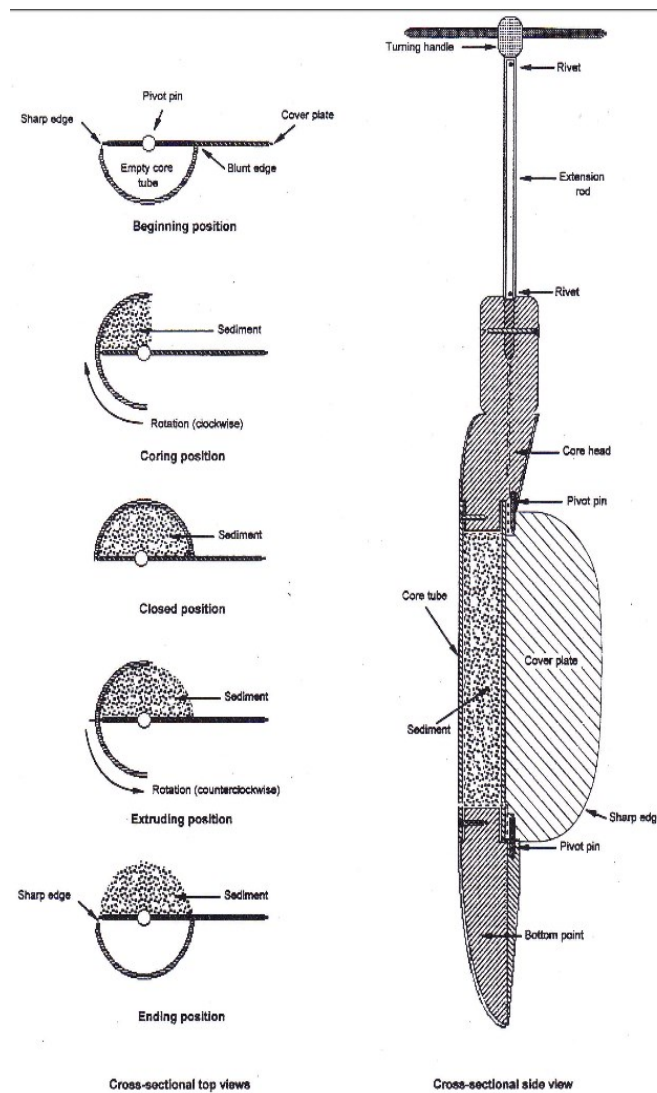
**5.2.4.3 Barreno de aletas (muestreador de turbas o barrena rusa).** Este barreno se emplea en suelos orgánicos o en los que se encuentra el nivel freático alto y no es posible controlar la presencia de agua (Figura 5.21). Este artefacto garantiza que la profundidad de muestreo sea la correcta.



**Figura 5.21.** Calicata con nivel freático alto. Fototeca IGAC, (2015).

El procedimiento es el siguiente:

- Seleccione un área aproximada de un 1 m<sup>2</sup>.
- Dentro del área seleccionada identifique cuatro puntos a muestrear y en cada uno introduzca el barreno con la aleta abierta hasta que esté completamente enterrada (50 cm).
- Gire el barreno 180° en sentido de las manecillas del reloj. Durante el giro, el suelo adyacente ejercerá fuerza sobre la aleta y se cerrará (Figura 5.22).
- Extraiga el barreno, abra la aleta y retire la muestra de suelo.
- Coloque las muestras de cada punto de forma contigua sobre una superficie plana.
- Limpie el barreno cada vez que realice la extracción de suelo.
- En cada punto de muestreo vuelva a introducir el barreno con la aleta abierta hasta 60 cm (para cajuelas) y 110 cm (para calicatas) de profundidad.
- Repita el giro y extracción de muestras.
- Coloque las muestras de cada punto de forma contigua y en la parte inferior de las muestras anteriormente tomadas.
- De cada profundidad especificada empaque las muestras en doble bolsa con su respectiva etiqueta de identificación.



**Figura 5.22.** Esquema de muestreo barreno de aleta. Fuente: <https://www.vanwalt.com/pdf/fact-sheets/Peat-or-Russian-Corer-Fact-Sheet.pdf>.

Para la toma de muestras de densidad aparente, se debe tener en cuenta que la muestra que se extrae con este tipo de barreno corresponde al volumen de medio cilindro con diámetro de 5,08 cm y 50 cm de longitud. Se recomienda verificar dichas medidas en el barreno a usar.

- Introduzca el barreno de aletas y extraiga las muestras de suelo.
- Tome de cada profundidad especificada 10 cm de muestra y dépositela en una bolsa (Figura 5.23).
- Identifique la muestra con el formato para identificación de muestras (Anexo 16).



**Figura 5.23.** Muestreo densidad aparente con barreno de aleta. Fototeca IGAC, (2017).

### 5.2.5 Fragmentos de roca

De acuerdo con el tamaño de los fragmentos de roca encontrados en la cajuela o calicata, clasifíquelos en los siguientes tipos: gravilla, cascajo, guijarro, laja, piedra y pedregón (Tabla 5.10) (Figura 5.24).



**Figura 5.24.** Fragmentos de roca en calicata. Fototeca IGAC, (2016).

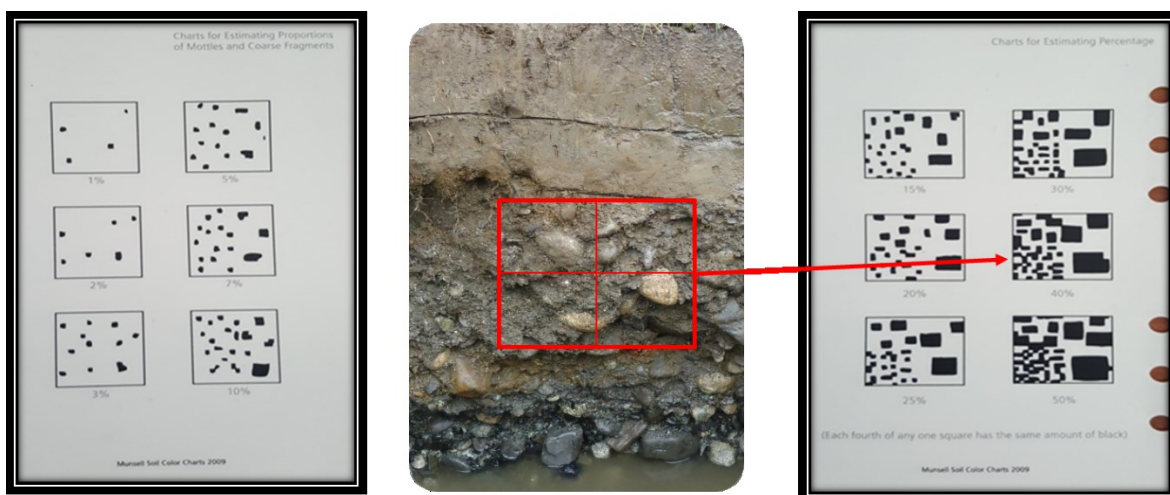
**Tabla 5.10.** Tipos de fragmentos de roca en el suelo. Fuente: IGAC, 2018

Código	Tipo	Formas Irregulares (diámetro en cm)	Formas Planas (longitud en cm)
G	Gravilla	0.2 - 2	
C	Cascajo	2 - 8	
J	Guijarro	8 - 25	
L	Laja		0,2 - 38
P	Piedra	25 - 60	38 - 60
R	Pedregón	> 60	> 60

Fuente: IGAC, (2014b)

Proceda de la siguiente manera para la cuantificación de los fragmentos de roca presentes en el suelo ya sea en las en las cajuelas (densificación) o calicatas (monitoreo):

- Haga un cuadro en la profundidad donde se encuentren los fragmentos.
- Divida en cuatro partes iguales el cuadro que anteriormente había realizado (Figura 5.25).
- Calcule el porcentaje de fragmentos de roca en cada uno de los cuadros con ayuda de la guía gráfica para cuantificación de fragmentos de roca en campo.
- Promedie los resultados obtenidos para cada cuadro y registre el resultado en el formato facilitativo para la toma de datos y observaciones de campo.



**Figura 5.25.** Cuantificación de fragmentos de roca en campo. Fuente: IGAC, 2018

### 5.2.6 Envío de muestras

Verifique que las muestras a enviar, vayan identificadas con su respectiva etiqueta, diligenciada de forma legible, visible y completa. Empacadas en doble bolsa de manera que las etiquetas no estén en contacto directo con el suelo para evitar su deterioro (Anexo 17 y 18).

### 5.2.7 Registro fotográfico

Realice la toma de fotografías de los aspectos más relevantes durante la etapa de campo tales como:

- Paisaje
- Cobertura/uso
- Calicata o cajuela
- Limitante de profundidad
- Presencia de fragmentos de roca

Además de las relacionadas anteriormente, se deben tomar las fotografías que la persona considere necesarias y de interés para el proyecto, cabe resaltar que se deben tomar mínimo 5 fotografías de cada aspecto para el seguimiento visual de las labores de campo.

## 5.3 FASE POSCAMPO

### 5.3.1 Análisis de muestras de suelo en laboratorio

El papel que desempeñan los suelos en la producción agrícola en el mundo, le confiere gran importancia en la seguridad alimentaria de las naciones, por lo cual es necesario conocer sus características, propiedades físicas, químicas, mineralógicas y biológicas, las cuales pueden ser cuantificadas en laboratorio.

La determinación de CO ha recibido considerable atención en el análisis de suelos por su importancia en la fertilidad (Demolon, 1996). El significado particular que tiene la MO del suelo con respecto a la fertilidad radica en que ésta influye sobre diversas propiedades del suelo, y además desempeña un papel primordial ya que es fuente de elementos nutritivos utilizados por la planta, como nitrógeno, fósforo, azufre, entre otros micronutrientes (Fassbender, 1975).

La etapa de análisis de muestras de suelo en el laboratorio es de gran importancia, ya que posibilita la obtención de los insumos que entrarán al procesamiento estadístico para la generación del insumo final. A continuación se muestran los pasos que comprenden esta etapa de la fase poscampo.

#### 5.3.1.1 Recepción de muestras.

Para el adecuado procesamiento analítico de las muestras de suelo colectadas en campo, se deben seguir los pasos enunciados a continuación:

Llevar la muestra al laboratorio

Selección del paquete analítico

1. Diligenciar la ficha de ingreso
2. Diligenciar de formato para entrega en el laboratorio

Luego las muestras ingresan al laboratorio para ser dispuestas de acuerdo con el tipo de análisis.

### 5.3.1.2 Determinación analítica de carbono orgánico.

Existen diferentes técnicas para cuantificar carbono orgánico y carbono total en suelo; sin embargo, para efectos de esta hoja de ruta y basados en los métodos de determinación referenciados en Colombia, se proponen cuatro métodos y se presentan sus ventajas y desventajas.

Para la realización de los análisis se debe asegurar que el laboratorio seleccionado esté acreditado y que los métodos de cuantificación estén validados, de acuerdo a la reglamentación vigente.

A continuación se relacionan los cuatro métodos para la cuantificación de carbono orgánico en el laboratorio:

#### a). Método de Walkley & Black:

**Principio:** Combustión húmeda.

**Cuantifica:** Carbono orgánico fácilmente oxidable.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Instrumentación simple.</li> <li>- Permite reemplazo de calefacción externa.</li> <li>- Permite manipulación de gran número de muestras.</li> <li>- Bajo costo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mayor tiempo de procesamiento por muestra.</li> <li>- Requiere grandes cantidades de <math>H_2SO_4</math> y <math>K_2Cr_2O_7</math>.</li> <li>- Incertidumbre en oxidación total del CO.</li> <li>- Soil Taxonomy desde el 2010, recomienda no usar este método por ser altamente contaminante y cancerígeno (Cr).</li> </ul>

#### b). Método Pérdida por Ignición (LOI)

**Principio:** Calcinación.

**Cuantifica:** Materia orgánica.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sencilla preparación de muestra.</li> <li>- No utiliza reactivos tóxicos.</li> <li>- Bajo costo para determinar MO</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uso diferentes temperaturas de ignición.</li> <li>- Elevadas temperaturas de ignición pueden generar errores en determinación de materia orgánica por pérdida de: <math>CO_2</math> de los carbonatos, agua estructural de los minerales Ar, oxidación del ión ferroso, descomposición de sales hidratadas y óxidos.</li> <li>- No determina carbono orgánico, solo estima materia orgánica (compuestos volátiles).</li> </ul>



	- Es el más inexacto de los métodos.
--	--------------------------------------

**c). Método Analizador elemental (CNS):**

**Principio:** Combustión seca.

**Cuantifica:** Carbono total.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sencilla preparación de la muestra.</li> <li>- No utiliza reactivos tóxicos.</li> <li>- El volumen de residuos generados es mínimo.</li> <li>- Amigable con el medio ambiente.</li> <li>- Es un método exacto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alto costo de inversión en equipos automatizados.</li> <li>- Alto costo en personal calificado.</li> <li>- Es necesario realizar el cálculo adicional para determinar carbono orgánico.</li> <li>- Tiempo para la determinación.</li> </ul>

**d). Método de Espectroscopía:**

**Principio:** Reflectancia en el visible e infrarrojo.

**Cuantifica:** Carbono orgánico

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rápido y preciso (5s / muestra).</li> <li>- Permite cuantificar nivel de incertidumbre.</li> <li>- No requiere químicos.</li> <li>- Cantidad de información (Inferencia de otros atributos).</li> <li>- Técnica no destructiva.</li> <li>- Económica después de implementada.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Costo inicial del equipo.</li> <li>- Método secundario, requiere valores de un método primario (W&amp;B, CNS) debidamente validado.</li> <li>- Procesamiento estadístico riguroso.</li> <li>- Personal especializado (estadístico con conocimiento en química).</li> <li>- Afectación del espectro por cromóforos* (confusión espectral)</li> </ul> <p><i>*Parámetro o sustancia que afecta significativamente la forma y la naturaleza de un espectro del suelo</i></p>

**5.3.1.3 Parámetros químicos y físicos asociados a C.O.**

El suelo es considerado un sistema donde tiene lugar una gran diversidad de procesos físicos, químicos y biológicos que dependen de sus propiedades y atributos. Una de estas características es

el almacenamiento de carbono y su dinámica depende en gran medida de otras propiedades, por lo cual se deben tener en cuenta para su determinación en el laboratorio. De acuerdo a lo anterior es necesario que se realicen las determinaciones de las siguientes propiedades físicas y químicas a cada muestra tomada en campo: textura, densidad aparente, densidad real, porcentaje de fragmentos gruesos, distribución de poros, pH, presencia de carbonato de calcio y capacidad de intercambio catiónico (CIC).

### 5.3.2 Consolidación de base de datos campo y base de datos de laboratorio

De acuerdo con los formatos de campo, se debe proceder con el registro de la información en medio digital, lo cual se realiza en un archivo Excel o en un sistema para manejo de bases de datos relacionales (recomendable R Core Team, 2017). Cada columna en la base de datos de laboratorio debe presentar las propiedades físicas y químicas de cada muestra, estas deben estar identificadas con el respectivo código del punto permanente de muestreo georreferenciado (PPMG) (Tabla 5.11). Además, la base de datos de campo debe presentar en cada columna el atributo descrito en el punto de toma de muestra, entre los que se encuentran el código del PPMG, las coordenadas geográficas, el uso del suelo, entre otros (Tabla 5.12).

Es importante tener en cuenta que estas bases de datos serán unidas y procesadas en software especializado, por tanto no es recomendable el uso de caracteres especiales (acentos, “ , % , \$ , etc.), la combinación de celdas y el uso simultáneo de letras mayúsculas y minúsculas; en caso de necesitar separar términos, se debe procurar utilizar el guión bajo (Alt+95, en código ASCII).

**Tabla 5.11.** Ejemplo base de datos laboratorio. Fuente: IGAC, 2018

ID_PPMG	DA	DR	POROS	CO	A	L	Ar	CLS_TXT	pH	NT

**Tabla 5.12.** Ejemplo base de datos campo. Fuente: IGAC, 2018

IDPPMG	LATITUD	LONGITUD	PROFESIONAL	DPTO	MUN	VRDA	SITIO	ECOSIST	DIST REG

Se deben conservar los registros físicos de los datos, puesto que pueden servir para un futuro control de calidad.

### 5.3.3 Consolidación de base de datos final

A partir de la información colectada en campo (análoga y/o digital), de la información derivada de los análisis de laboratorio y de un control de calidad a ambas bases de datos, se procede con su unión, detallando que los registros de las bases de datos correspondan a los mismos puntos y que las columnas de interés se mantengan luego del procedimiento de unión. Esto con el objetivo de

generar una base de datos unificada y adecuadamente estructurada, para el procesamiento y evaluación de la información (Tabla 5.13).

Debe prestarse especial atención en que todas las filas de la tabla tengan las mismas columnas, que las filas correspondan a los horizontes de los perfiles de suelo y las columnas contengan la información de las propiedades o atributos de dichos horizontes. La organización de la base de datos de acuerdo a la estructura propuesta ofrece la ventaja de relacionar fácilmente nuevos atributos a la tabla inicial y llevar a cabo procesos de modelado (Baritz *et al.*, 2009).

**Tabla 5.13.** Ejemplo base de datos final. Fuente: IGAC, 2018

IDPPMG	LATITUD	LONGITUD	PROFESIONAL	DPTO	MUN	...	DA	DR	POROS	CO	...

### 5.3.4 Análisis de datos y generación del mapa

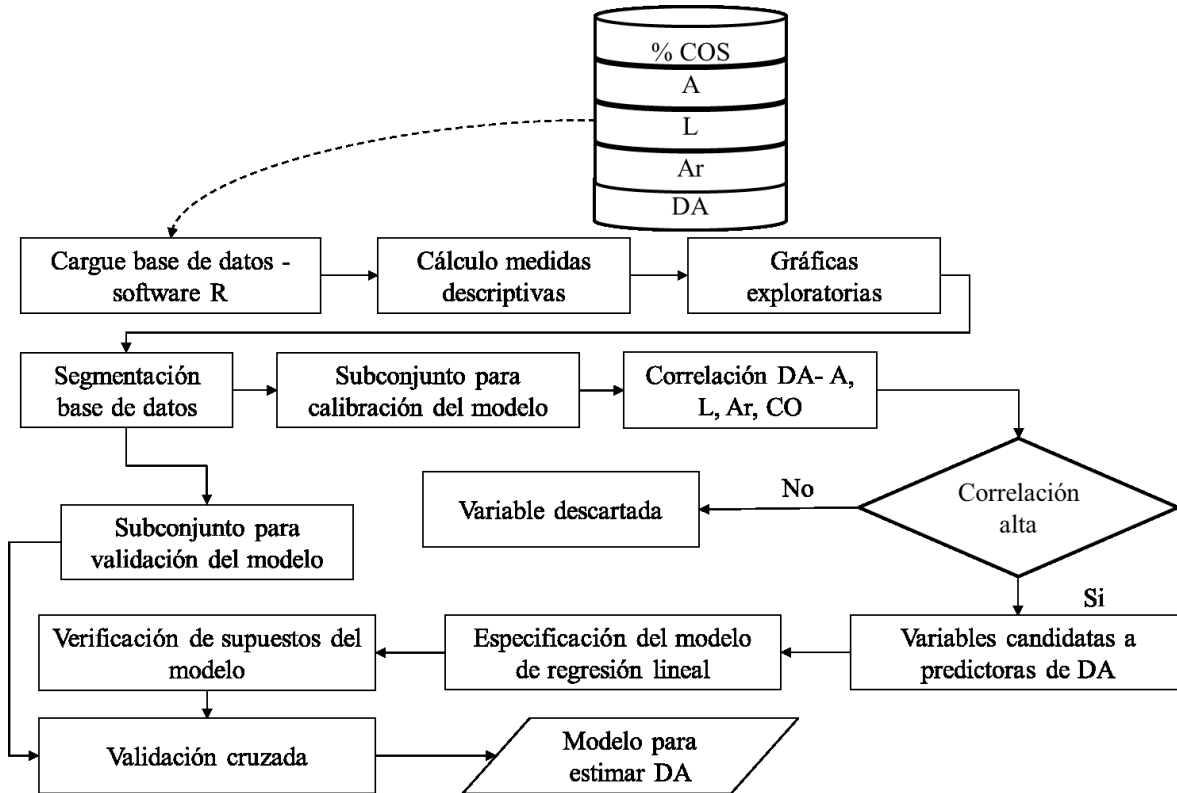
Una vez finalizada la consolidación de la base de datos final, es conveniente revisar de forma general los datos haciendo énfasis en las variables necesarias para el cálculo del COS (densidad aparente, coordenadas, fragmentos gruesos, porcentaje de carbono orgánico y espesor). Variables como el porcentaje de carbono y la coordenada no pueden ser imputadas, por lo tanto, si no se cuenta con este dato hay que descartar el registro. Si la información faltante corresponde a densidad aparente, esta puede ser imputada mediante el uso de funciones de pedotransferencia. De Vos *et al.* (2005) y Heuscher *et al.* (2005), reportan que el porcentaje de carbono orgánico y la distribución de partículas de suelo por tamaño son las variables más relacionadas con la densidad aparente, de manera que a partir de estas es posible estimar los valores faltantes de densidad.

#### 5.3.4.1 Estimación de datos faltantes: densidad aparente.

Pese a su importancia en el cálculo de stock de carbono orgánico y otros elementos en el suelo, es común encontrar bases de datos con algunos vacíos relacionados con esta propiedad física (Sequeira *et al.*, 2014). La necesidad de contar con este dato ha llevado al desarrollo de funciones de pedotransferencia que predicen la densidad aparente a partir de la información disponible, incluyendo propiedades físico-químicas como la textura del suelo, el contenido de carbono orgánico, el pH, los cationes intercambiables, entre otros (De Vos *et al.*, 2005).

Benites *et al.* (2007), reportaron que el porcentaje de carbono orgánico y la distribución de partículas por tamaño (arena, limo y arcillas) presentaron mayor relación con la densidad aparente en los primeros 30 cm del suelo. Jalabert *et al.* (2010), en su estudio sobre evaluación de la importancia de variables de suelo para predicción de densidad aparente, señalaron que el contenido de carbono orgánico es la variable de mayor relevancia para la estimación de valores faltantes de densidad aparente, seguida por el contenido de arcillas y limos. Abdelbaki (2016), recopiló 48 funciones de pedotransferencia para predicción de densidad aparente reportadas en estudios de Estados Unidos, en las que los parámetros de entrada fueron la distribución de partículas de suelo por tamaño y carbono orgánico o contenido de materia orgánica.

Dentro de este contexto, el procedimiento de ajuste de la función de pedotransferencia para la estimación de datos faltantes de densidad aparente del suelo, se ilustra en la Figura 5.26.



**Figura 5.26.** Diagrama de flujo para el ajuste de la función de pedotransferencia para estimación de densidad aparente. Fuente: IGAC, 2018.

La base de datos de partida para este procedimiento debe estar estructurada de tal manera que las filas correspondan a los horizontes y las columnas al porcentaje de arena, limo y arcilla, porcentaje de carbono orgánico y densidad aparente. Es importante que este archivo no presente espacios vacíos en los campos de textura y carbono orgánico, ya que el objetivo es estimar los datos faltantes a partir de la mayor cantidad de información posible. Deben diferenciarse aquellos horizontes que cuenten con datos de textura determinada por el método de Bouyoucos, de aquellos que tengan textura por el método de pipeta. Se recomienda ajustar modelos independientes para cada método analítico de determinación de textura.

La base de datos de entrada puede estar en formato Excel (.xlsx), en formato de valores separados por comas (.csv) o como archivo plano (.txt). En función de lo anterior se debe realizar la importación de los datos al software R (R Core Team, 2017), en lo posible en su versión más reciente. En caso de tratarse de un archivo de extensión .xls o .xlsx, la librería necesaria para la importación de datos en este formato es *readxl* (Wickham y Bryan, 2017), si se parte de información almacenada en formato con extensión .csv o .txt, se puede emplear la librería nativa de R *utils* (R Core Team, 2017).

Se recomienda realizar un análisis descriptivo de la información con el fin de explorar los datos. El análisis exploratorio de datos (EDA, por sus siglas en inglés), usa herramientas de visualización de la información y algunas medidas descriptivas como: valor máximo, valor mínimo, media, mediana, varianza, desviación estándar, coeficiente de variación de la media, asimetría y curtosis, con el objetivo de tener un vistazo general de los datos, identificar algunas variables y recodificarlas, detectar errores en la información, determinar relaciones preliminares entre variables y orientar futuros análisis más robustos de la información.

Una vez realizado el control de calidad con la ayuda de medidas descriptivas y salidas gráficas, la base de datos debe segmentarse para llevar a cabo el proceso de calibración y la validación del modelo ajustado para la estimación de la densidad aparente. Se recomienda usar 70% de los registros (seleccionados aleatoriamente del total) para el ajuste del modelo y el 30% restante para la validación del mismo.

El subconjunto de datos seleccionado para el ajuste del modelo debe ser sometido a algunas pruebas preliminares con el fin de detectar las variables mayormente relacionadas con la densidad aparente, para ello resulta útil calcular el coeficiente de correlación de Pearson entre los porcentajes de arena, limo, arcilla, carbono orgánico y la densidad aparente. Las variables con coeficientes significativos pasan a ser candidatas a variables predictoras de la densidad aparente. El paso siguiente es especificar el modelo de regresión lineal múltiple, esto puede llevarse a cabo en el software R, utilizando el paquete nativo de R *stats* (R Core Team, 2017).

Partiendo del modelo especificado, es necesario realizar algunas pruebas para verificación de supuestos, como normalidad y homocedasticidad de residuales, para lo cual se sugiere el uso del paquete de R *nortest* (Gross y Ligges, 2015). En caso del no cumplimiento de supuestos, el paso recomendado es realizar transformaciones de la variable de respuesta, haciendo uso de las transformaciones de Box-Cox del paquete de R *MASS* (Venables y Ripley, 2002).

Luego de contar con el modelo predictivo especificado correctamente, el paso siguiente es realizar la validación del mismo, mediante la correlación de los valores observados y predichos de la densidad aparente y el cálculo de algunas medidas de error de la predicción como el error cuadrático medio (MSE), el error medio absoluto (MAE), el error medio (ME) y la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) del paquete *hydroGOF* (Zambrano-Bigiarini, 2017). Estas medidas deben ser lo más cercanas posible a cero para indicar predicción adecuada de la variable de interés (Zambrano-Bigiarini, 2017).

Al finalizar este proceso se tendrán dos modelos para estimación de datos de densidad aparente, un primer modelo con base en textura determinada por el método de Bouyoucos y un segundo que toma en cuenta la textura determinada por pipeta. El modelo a usar para la estimación dependerá de los insumos con que se cuente. Se recomienda contar con el apoyo de un edafólogo experto que revise la estimación, para determinar si el modelo se adecúa a los datos. Esto se traduce en que además de usar validación cruzada, es importante también realizar una validación basada en la revisión lógica de los valores predichos, de acuerdo a aspectos como tipo de suelo, ubicación,

clima, entre otros. Si eventualmente resulta que el modelo sea inadecuado de acuerdo al criterio experto, es necesario regresar a la fase de especificación.

La rutina de programación en el software R sugerida para la realización de este proceso se presenta en el anexo 19.

### 5.3.4.2 Estimación de porcentaje de carbono orgánico y densidad aparente de suelo a 30 cm de profundidad.

Para el mapeo digital del COS es necesario contar con datos de almacenamiento en los primeros 30 cm de profundidad del suelo, para lo cual se deben estimar los parámetros que intervienen en el cálculo del stock a una profundidad de 30 cm, en caso de que se disponga esta información por horizontes pedogenéticos. Se recomienda que este procedimiento se realice mediante el ajuste de funciones de área similar- Spline. Haciendo uso del software R, la aplicación de funciones spline para determinar el porcentaje de carbono orgánico y densidad aparente a 30 cm se realiza usando la función `mpspline` del paquete `GSIF` (Hengl, 2017). Para el cálculo se requiere el identificador único de cada perfil de suelo, la localización geográfica, la profundidad inicial y final en cm de los horizontes de cada perfil, el contenido de carbono orgánico y la densidad aparente del suelo. La información mencionada debe ser almacenada como se ilustra en la Tabla 5.14.

**Tabla 5.14.** Parámetros requeridos para el cálculo de stock de COS a 30 cm de profundidad en el software R. Fuente: IGAC, 2018

ID_PERFIL	N	W	PROF_IN_CM	PROF_FIN_CM	DA_GCM3	S_COS_TONHA
EB-004	4.294028	-74.206944	0	58	0.30	450.66
EB-004	4.294028	-74.206944	58	100	1.01	59.48
EB-024	4.295889	-74.212472	0	18	0.28	142.13
EB-024	4.295889	-74.212472	18	38	0.42	252.84
EB-024	4.295889	-74.212472	38	52	1.1	24.78
N-027	0.965361	-77.840667	0	29	0.89	172.45

En este punto es importante realizar un nuevo análisis exploratorio de la información resultante del proceso, dentro de este, es fundamental el cálculo del valor máximo, valor mínimo, media, mediana, varianza, desviación estándar, coeficiente de variación de la media, asimetría y curtosis. El código en R para este proceso se presenta en el anexo 20.

### 5.3.4.3 Cálculo de stock de carbono orgánico de suelo.

A partir de la densidad aparente y el porcentaje de carbono orgánico a 30 cm calculados como se mencionó, se procede al cálculo del stock de COS mediante la siguiente ecuación (1):

$$COS = [CO] * DA * E * \left(1 - \left(\frac{FG}{100}\right)\right) \quad (1)$$

Donde, *COS* es el stock de carbono orgánico del suelo ( $t C ha^{-1}$ ), *CO* es la concentración de carbono orgánico de suelo (%), *DA* es la densidad aparente ( $g cm^{-3}$ ) *E* es el espesor de la capa a analizar (30 cm) y *FG* es el porcentaje ocupado por fragmentos de roca en los primeros 30 cm del perfil.

#### 5.3.4.4 Preparación de covariables.

Partiendo del modelo conceptual SCORPAN propuesto por McBratney *et al.* (2013), se plantea la posibilidad de mapear el suelo partiendo de información pre-existente de los factores de formación y las propiedades del mismo en zonas donde la información espacializada no está disponible o no se encuentra a la escala que se requiere. Se debe acopiar información cartográfica de cobertura de la tierra, relieve, temperatura, precipitación, vegetación (o cualquier otra variable ambiental, que el investigador considere pertinente) que pueda ayudar a estimar el contenido de carbono orgánico de suelo. Las covariables son solo aproximaciones de las verdaderas condiciones ambientales que dieron origen al suelo de una zona específica. Estas sirven solo como representantes (sustitutos) de las condiciones ambientales actuales, que en muchos casos son diferentes de las condiciones en las que tuvo lugar la pedogénesis (Heuvelink y Webster, 2001; Samuel-Rosa *et al.*, 2015).

La naturaleza de tales variables pueden ser cuantitativa o cualitativa, es decir que variables de tipo categórico también pueden ser empleadas en el proceso de mapeo digital. Samuel-Rosa *et al.* (2015) y Song *et al.* (2017), reportan el uso de información relacionada con cobertura de la tierra, tipo de suelo y geología como variables predictoras del stock de carbono orgánico de suelo. Es posible usar esta información sin hacer ningún tipo de tratamiento adicional si el proceso de ajuste del modelo predictivo se realizará mediante técnicas de aprendizaje automático. Por el contrario, si se van a emplear herramientas como la regresión múltiple, la información categórica debe ser procesada para obtener variables dicotómicas (también conocidas como indicadoras, binarias o “dummy”). Song *et al.* (2017), afirman que las variables categóricas usadas en modelos de regresión deben ser reemplazadas por variables “dummy” que tengan valores de 0 y 1, representando la presencia o ausencia de cada categoría de la variable original. Se recomienda que previo al ajuste del modelo de regresión usando las covariables, se realice un análisis de varianza entre el stock de COS y las variables dicotómicas, con el fin de detectar cuales de estas variables ayudan a explicar la mayor variación en el carbono orgánico en el suelo.

Cabe anotar que las capas de covariables deben estar en formato ráster, con la misma resolución, extensión e igual sistema de proyección, esto permitirá unir las y conformar un solo conjunto de capas, que luego serán el insumo necesario para efectuar la extracción multipunto y estructurar la matriz de regresión para el ajuste del modelo espacial. Esta matriz contendrá la ubicación geográfica de cada perfil muestreado, el contenido de carbono orgánico de suelo a 30 cm de profundidad y las covariables disponibles. La homogenización de covariables, su unión y la posterior estructuración de la matriz de regresión puede llevarse a cabo con la rutina de programación en el software R que se presenta en el anexo 21.

#### 5.3.4.5 Ajuste de modelo espacial predictivo de stock de COS y generación de mapas.

Para el procesamiento espacial de la información es necesario realizar el análisis exploratorio de los datos, luego de realizar el cargue de la base mencionada en el software R, usando los paquetes referenciados anteriormente.

El análisis exploratorio de datos (EDA, por sus siglas en inglés), usa herramientas de visualización de la información y algunas medidas descriptivas para tener un vistazo general de los datos, identificar algunas variables y recodificarlas, detectar errores en la información, orientar futuros

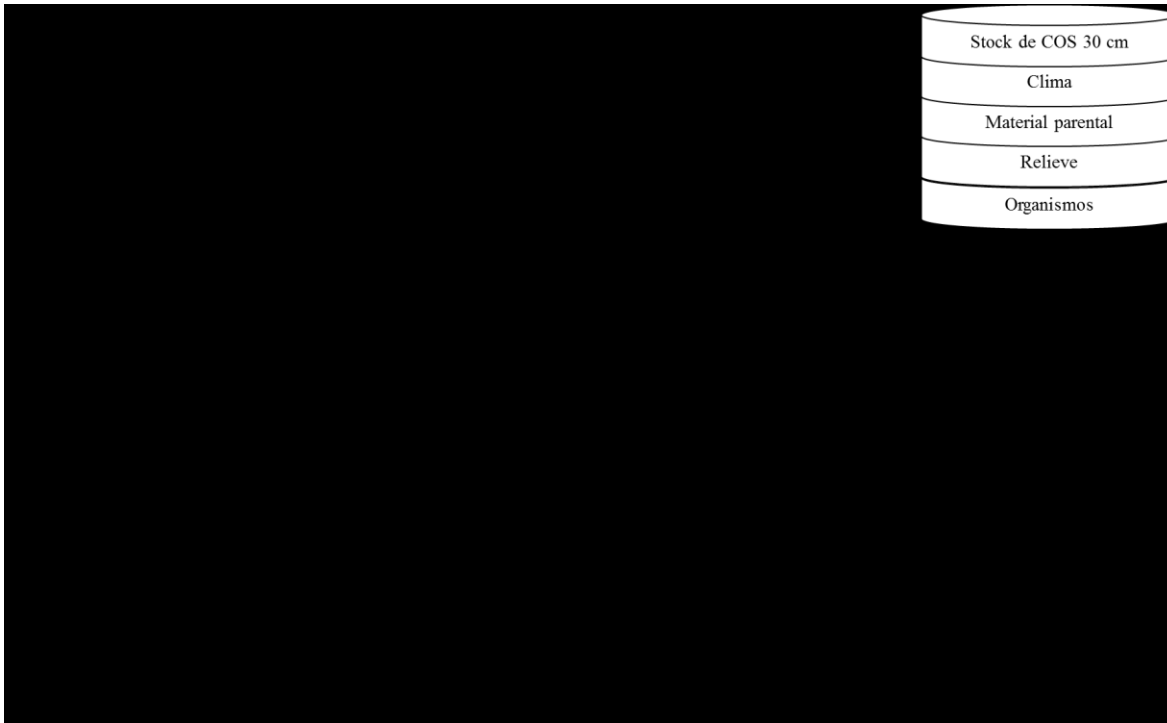
análisis más robustos de los datos y determinar relaciones entre variables (Myatt y Johnson, 2014; Seltman, 2015).

La herramienta más adecuada para explorar los datos dependerá del tipo de variable que se desee analizar. Cada variable dentro de una base de datos puede ser examinada de diferentes maneras, por lo cual se recomienda una clasificación inicial de todas las variables, de acuerdo a los valores que presentan (Myatt y Johnson, 2014), estos pueden ser valores numéricos cuando se trata de una variable cuantitativa o bien niveles nominales u ordinales, cuando se trata de variables categóricas (Seltman, 2015).

Una vez clasificadas las variables, es conveniente caracterizar el centro de los datos, en caso de variables numéricas, para lo cual se dispone de tres medidas de tendencia central que son la media (promedio aritmético), la mediana y la moda (Myatt y Johnson, 2014). Luego de estos cálculos es importante conocer qué tan dispersos se encuentran los valores alrededor de las medidas centrales. Las estrategias adecuadas para tal fin pueden ser de tipo gráfico o numérico. Dentro de las herramientas de visualización más importantes se encuentran los gráficos de frecuencias o histogramas y los diagramas de caja (boxplot), las medidas de tipo numérico son el rango, los cuartiles, la varianza, la desviación estándar, el sesgo o asimetría, la curtosis.

Luego del control de calidad de la información, el procedimiento a seguir para el mapeo predictivo de stock de COS a 30 cm en páramos y humedales se ilustra en la Figura 5.27.





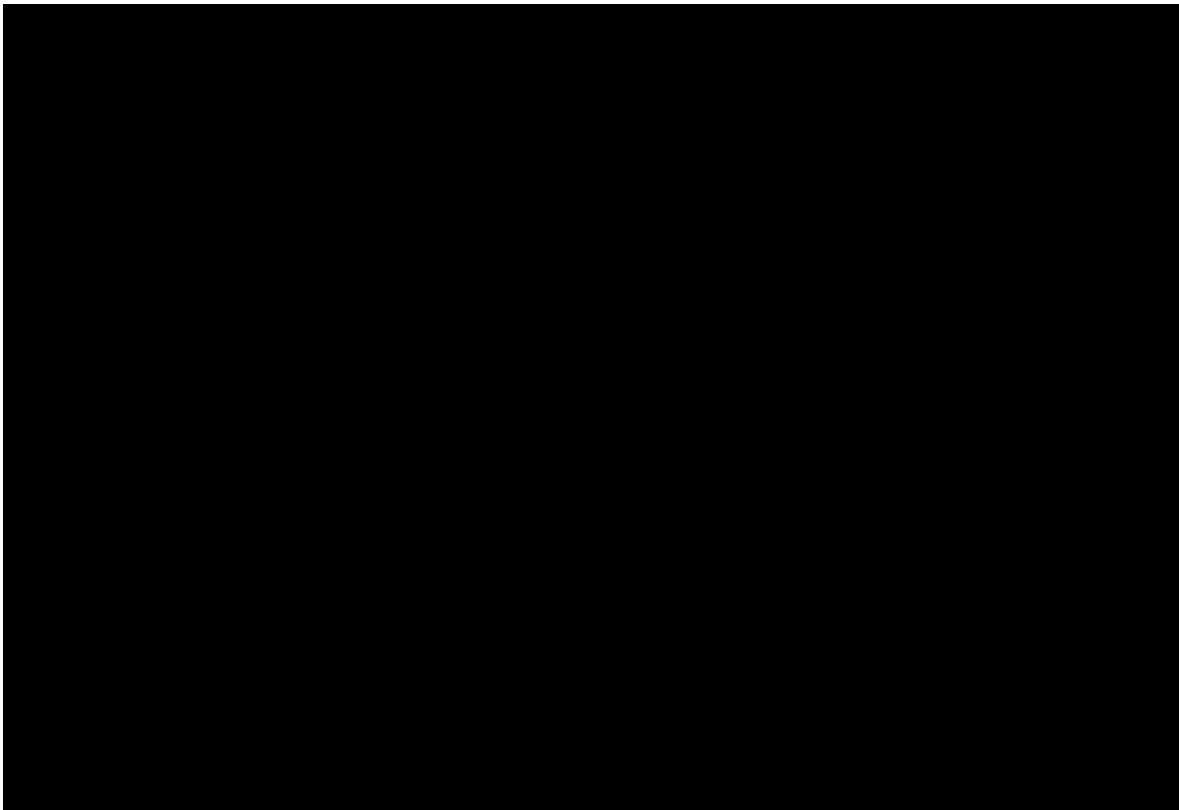
**Figura 5.27.** Diagrama de flujo para el ajuste del modelo de regresión, para estimación de carbono orgánico de suelos en páramos y humedales. Fuente: IGAC, 2018

Es importante realizar un análisis preliminar en el que se explore la intensidad de la relación entre las covariables y el carbono orgánico de suelo a 30 cm, tomando en cuenta la naturaleza de tales covariables. Por lo anterior, resulta útil diferenciar del conjunto total de covariables, aquellas que son de tipo numérico de las de tipo categórico. Una vez surtido el anterior proceso, la relación entre el stock de COS y las variables de tipo numérico se puede establecer haciendo uso del coeficiente de correlación lineal de Pearson. La relación entre el contenido de carbono orgánico de suelo y las variables de tipo categórico puede verificarse mediante un análisis de varianza.

Song *et al.* (2017), evaluaron la contribución de distintos atributos de suelo en la predicción de la concentración de carbono orgánico, usando regression kriging como método de interpolación. Dentro de los atributos considerados reportan variables categóricas como tipo y cobertura de suelo. Los autores sugieren que las variables categóricas en un modelo de regresión deben ser reemplazadas por variables dicotómicas o “dummy” que tengan valores de 1 y 0, mostrando presencia o ausencia de cada categoría, respectivamente. La cantidad de variables “dummy” a incluir en el modelo de regresión se determinó a partir de un análisis de varianza, en el que cada categoría se tomó como factor fijo y la variable de respuesta fue el contenido de COS.

Wong *et al.* (2014), aplicaron y probaron distintos métodos para incluir información del mapa de suelos para mejorar la predicción espacial del pH, la capacidad de intercambio catiónico y profundidad efectiva para la provincia de Sanmatenga de Burkina Faso. Para el mapeo del COS en áreas de influencia de páramos y humedales, se tomó como variable categórica el tipo de suelo,

representada en el modelo de regresión lineal como variables “dummy” o dicotómicas, se utilizaron tantas variables “dummy” como categorías (orden y suborden) tuvo la variable original, tomando valores de 1 y 0, indicando la presencia o ausencia de cada categoría específica. La Figura 5.28 ilustra el paso de una variable categórica a múltiples variables dicotómicas.



**Figura 5.28.** Ejemplo de adaptación de capa raster de variable categórica (orden de suelo) a variables dicotómicas o “dummy”. Fuente: IGAC, 2018

Para la creación de estas covariables se parte de la capa de suelos en formato raster, en la que cada celda almacena un dato categórico con relación al orden de suelos en una zona específica, en este caso se obtendrían seis capas dummy. Así por ejemplo, en la capa dummy del orden Andisoles, las celdas que almacenan valor 1 (uno) corresponderían a las celdas de la capa de orden de suelos que tienen la categoría Andisoles, y las celdas con valor 0 (cero) a las celdas que originalmente tienen orden diferente de Andisoles. Del mismo modo se opera para la generación de las demás capas dummy.

Luego de este proceso y de obtener en ciertos casos que no hay relación significativa entre el contenido se COS y alguna de las covariables, estas pueden ser descartadas para los pasos subsiguientes. Con las covariables restantes se procede con la especificación del modelo de regresión lineal múltiple, sobre el cual se debe realizar la verificación de supuestos como normalidad de residuales, homocedasticidad y no multicolinealidad, este último haciendo uso del

criterio del factor de inflación de la varianza o VIF, por sus siglas en inglés. Lo anterior se puede realizar en el software R con los paquetes *nortest* (Gross y Liges, 2015) y *car* (Fox y Weisberg, 2011). En caso de no cumplir supuestos se debe realizar la debida transformación de la variable de respuesta.

El siguiente proceso es realizar un ajuste "paso a paso" (step by step) del modelo especificado anteriormente, con lo cual se obtendrá el modelo de regresión más adecuado para explicar el stock de COS. Es importante considerar que el modelo debe ser sencillo pero debe explicar la mayor variación posible de los datos de stock de COS, lo que puede evaluarse mediante criterios como el AIC (Criterio de Información de Akaike) y el  $R^2$  ajustado (coeficiente de determinación ajustado).

Una vez se tenga el modelo definitivo, se usarán estos parámetros para ajustar el modelo espacial, haciendo uso de las capas de covariables ambientales correspondientes. Este procedimiento de modelado espacial puede llevarse a cabo haciendo uso de técnicas de regresión lineal o técnicas de regresión que involucren herramientas de aprendizaje de máquina. Dentro de las técnicas de regresión lineal usadas con mayor frecuencia se encuentra el regression kriging (RK), que es técnica híbrida de modelado de amplia aceptación en pedometría, en la que se realiza una regresión para estimar una variable objetivo y luego los residuales resultantes son interpolados para obtener información adicional con respecto a la tendencia de la incertidumbre del modelo en el espacio geográfico, para realizar este procedimiento se puede recurrir al paquete *automap* de R, con el que se realiza la interpolación de los residuales mediante kriging universal. El proceso de ajuste de modelo espacial predictivo puede hacerse siguiendo el código que se muestra en anexo 22.

Con relación a las técnicas de aprendizaje automático reportadas en el área de mapeo digital de suelos, los bosques aleatorios o random forest, han mostrado buen desempeño, al posibilitar la obtención de estimaciones más robustas y menos sesgadas de una variable objetivo (que puede ser cuantitativa o cualitativa) (Breiman, 2001), como resultado de una exploración de relaciones lineales y no lineales entre la variable de interés y sus variables predictoras. Meinhausen (2016) propuso modificar las salidas del procedimiento de random forest mediante la estimación de intervalos de predicción de las variables iniciales, de esta manera se potencializa el algoritmo inicial y surge el random forest por cuantiles (QRF) que considera la variabilidad de la respuesta para construir intervalos de predicción a partir de las variables explicativas. Para la implementación del algoritmo de random forest por cuantiles se puede recurrir al paquete *quantregForest* de R (Meinhausen, 2016) y a la rutina de programación en el software R que se expone en el anexo 23.

Luego de extraer la mayor cantidad de información del modelo para el COS el siguiente paso es validar este mismo. El método propuesto es el de validación cruzada. Una vez ejecutado el modelo para predecir el stock de carbono orgánico, deben calcularse algunas medidas relacionadas con la incertidumbre de la estimación como el error cuadrático medio (MSE), el error medio absoluto (MAE), el error medio (ME) y la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), lo cuales pueden calcularse con ayuda del paquete de R *hydroGOF* (Zambrano-Bigiarini, 2017). Estas medidas deben ser lo más cercanas posibles a cero para indicar la predicción adecuada de la variable de interés (Zambrano-Bigiarini, 2017). Para realizar el proceso de validación del modelo espacial se puede recurrir al código R, el cual se presenta en el anexo 24. Dentro de este mismo

proceso, cabe resaltar que los resultados deben ser sometidos a validación por expertos edafólogos, quienes deben determinar si los valores obtenidos corresponden a la realidad, tomando en cuenta aspectos como tipo y cobertura de suelo, clima, entre otros. De no ser aprobado por personas con conocimiento experto en dinámica del carbono orgánico en el suelo, deben hacerse los ajustes pertinentes al proceso.

Con resultados validados, el último paso es la obtención de salidas gráficas del contenido de carbono orgánico de suelos en páramos y humedales y el mapa de incertidumbre de la predicción.

### 5.3.5 Informe técnico

El informe es un documento en el que se detalla la forma y los resultados del estudio de captura de carbono. Es imprescindible utilizar un lenguaje claro, concreto y objetivo, ya que la finalidad del informe es comunicar información certera. La creación del informe técnico puede ser transversal al proceso investigativo y finalmente debe buscarse que el documento aporte los datos necesarios para su comprensión y que contenga una explicación de los métodos utilizados, lo cual garantiza su reproducibilidad.

De manera general, se propone el modelo de informe técnico para proyectos de estimaciones del stock de carbono en ecosistemas de páramo y humedales:

- **Título:** El título debe describir, con la mínima cantidad posible de palabras el contenido del trabajo.
- **Introducción:** La introducción del trabajo debe dejar tan claro como sea posible qué problema investigativo se abordó y por qué valía la pena hacerlo resolverlo. No sólo debe aportar evidencias que hacen a la originalidad del trabajo; sino también dar testimonio acerca de la relevancia del aporte original que se propone realizar (Slafer, 2009).
- **Objetivos:** El objetivo del proyecto debe ser una expresión de los propósitos que se tienen, debe ser un enunciado claro y preciso de las metas que se persiguen, los objetivos inician con un verbo en infinitivo.
- **Métodos:** Esta sección se focaliza en explicar cómo se ha estudiado el problema planteado en la introducción. Esta explicación detallada es necesaria por dos razones diferentes. Primero permite que las experiencias puedan ser repetidas independientemente y la segunda razón, es que esta descripción permite establecer límites a la universalidad, especificidad y credibilidad de las conclusiones alcanzadas, lo que a su vez está relacionado con el grado de extrapolabilidad del conocimiento transmitido a otras condiciones (Slafer, 2009; Cargill y O'Connor, 2009).
- **Resultados:** En esta sección, se debe registrar los datos que se obtuvieron. Dentro del contexto de captura de carbono edáfico se recomienda los siguientes análisis: Dos aspectos relevantes en el stock de carbono es el uso y tipo de suelo, por eso debe hacerse una discriminación de los resultados obtenidos de COS de acuerdo con el tipo de suelo y el uso de la tierra, que permita establecer una relación entre estas dos variables con el potencial de captura de carbono.

Otro aspecto importante es la profundidad de muestreo, puesto que determina hasta qué punto se tiene una estimación del contenido de carbono, como lo menciona la hoja de ruta se recomiendan dos profundidades básicas (0-15 cm y 15-30 cm) que es en teoría donde mayor actividad biológica tiene el suelo, sin embargo también se dan otras profundidades. Por consiguiente, si se tomaron datos de dos o más profundidades se debe hacer una comparación de los contenidos de carbono a las distintas profundidades de muestreo, que permita tener una idea de la dinámica del carbono en el perfil.

De manera global, cualquier análisis de los resultados del stock de carbono frente a otras variables, como pH, Capacidad de Intercambio Catiónico, porosidad, compactación, entre otras, permite una mejor comprensión de los resultados.

- Conclusiones: Se plasman los aspectos resultantes y más relevantes de la investigación.

### 5.3.6 Generación de metadato.

El auge sobre la importancia de la geografía y la comprensión de que todos los fenómenos están espacialmente relacionados, y el exponencial avance en el uso de la tecnología informática y de telecomunicaciones, están causando una expansión en el uso de la información geográfica digital y de los sistemas de información geográfica a nivel mundial. Cada vez más personas que pertenecen a un amplio rango de disciplinas ajenas a las ciencias geográficas y a las tecnologías informáticas están en capacidad de producir, utilizar y modificar información geográfica digital. A medida que crecen el número, la complejidad y diversidad de los datos geográficos, también crece la necesidad de disponer de un mecanismo que facilite la comprensión de todas las características de dichos datos, esta necesidad se tradujo en lo que denominaron Metadatos (datos de los datos), y se convirtió en uno de los requisitos principales para el establecimiento de una infraestructura de datos espaciales, siendo este un requisito esencial para localizar, describir y evaluar los datos disponibles.

A pesar del reconocimiento de la importancia de los metadatos, su generación dista de ser una tarea sencilla, pero tampoco es una labor compleja que requiera conocimientos especializados, y sí necesaria de hacer si se trabaja con datos espaciales. En términos globales, existen las normas ISO 19115 e ISO 19139 que regulan los parámetros de los metadatos, pero a nivel nacional existe la norma técnica colombiana NTC 4611 que establece las normas para Colombia.

La presente guía para la creación de metadatos en proyectos de captura de carbono edáfico en páramos y humedales se basa en dicha norma. Esta establece nueve secciones principales y tres secciones soporte, dentro de las cuales existen apartados obligatorios, condicionales y opcionales para la descripción del metadato. Las secciones principales corresponden a: identificación, calidad de datos, representación espacial, sistema de referencia, contenido, catálogo de símbolos, distribución, extensión del metadato, referencia del metadato; y las soporte: citación, contacto, información de la fecha. Para fines prácticos el anexo 25 es un ejemplo conciso de la creación de una tabla de metadatos con las principales secciones.

### 5.3.7 Socialización de resultados obtenidos

La socialización de resultados debe considerarse como un espacio para el acercamiento de los actores que integran el grupo del proyecto de captura de carbono orgánico de suelos con la

comunidad interesada y/o implicada, donde se comparte desde el conocimiento hasta la presentación de resultados, de tal forma que se permita la consolidación de redes de investigación, monitoreo y conservación.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Abdelbaki, A. (2016). Evaluation of pedotransfer functions for predicting soil bulk density for U.S. soils. *Ain Shams Engineering Journal*. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2016.12.002>.
- Agudelo, G. (2010). Dependencia espacial: Detección, validación y modelación. (Tesis de maestría). Universidad EAFIT. Departamento de Ciencias Básicas. Medellín – Colombia.
- Agudelo, G., Franco, L.E., Franco, L.C. (2015). Aplicación de la econometría espacial para el análisis de la miseria en los municipios del departamento de Antioquía. *Semestre Económico*, (18:37), 103 – 128.
- Aguilera, S.M., (2000). Importancia de la protección de la materia orgánica en suelos. *Simposio Proyecto Ley Protección de Suelo*. Boletín N° 14. Valdivia, Chile. p. 77–85.
- Allison, L.E., (1965). Organic Carbon. In: C.A. Black. *Methods of soil analysis. Chemical and microbiological properties*. Number 9 (Part 2) in the series Agronomy. Madison, Wisconsin USA. Pp: 1367-1378.
- Anselin, L., (1988). *Spatial Econometrics: Methods y Models*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- Araújo, M.B. & New, M. (2007). Ensemble forecasting of species distributions. *Trends Ecol. Evol.*, 22, 42–47.
- Baritz, R., E. Eberhardt, M. Van Liedekerke y P. Panagos. (2009). Environmental Assessment of Soil for Monitoring Volume III: Database Design and Selection. *EUR 23490 EN/3 – 2008*. Office for Official Publications of the European Union, Luxembourg.
- Batjes, N.H. (1996). Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science* 47: 151-163.
- Beaudette, D.E., Roudier P. y A.T. O'Geen. (2012). *Algorithms for Quantitative Pedology: A Toolkit for Soil Scientists*.
- Benites, V. M., Machado, P. L., Fidalgo, E. C., Coelho, M. R., Madari, B .E. (2007). Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from exiting soil survey reports in Brazil. *Geoderma* 139, 90–97.
- Bernabé-Poveda, M.A y López-Vázquez, C.M. 2012. *Fundamentos de las infraestructuras de datos espaciales (IDE)*. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Bivand, R. y Yu, D. (2007). SPGWR: Geographically weighted regression. Recuperado de: [http://cran.r-project.org/bin/windows/contrib/r-release/spgwr\\_0.4-6.zip](http://cran.r-project.org/bin/windows/contrib/r-release/spgwr_0.4-6.zip).
- Bivand, R.; Altman, M.; Anselin, L.; Assunção, R.; Berke, O.; Bernat, A...Yu, D. (2017). *spdep: Spatial dependence: weighting schemes, statistics and models*. R package version 0.5-26. <http://CRAN.R-project.org/package=spdep>.
- Biswas, A. & Zhang, Y. (2018). Sampling Designs for Validating Digital Soil Maps: A Review. *Pedosphere* 28(1): 1 - 15. doi:10.1016/S1002-0160(18)60001-3.
- Bosque Sendra, J. 2000. *Sistemas de Información Geográfica*. Ediciones Rialp S. A., España.
- Breiman, L. (2001). *Random forests*. *Mach. Learn.* 45, 5–32.

Brungard, C. & Boettinger, J. (2010). Chapter 6: Conditioned Latin Hypercube Sampling: Optimal Sample Size for Digital Soil Mapping of Arid Rangelands in Utah, USA. En: Hartemick, A & McBratney, A (Ed.) Digital Soil Mapping (pp. 67 – 78), Springer.

Busch J. & Grantham H. (2013). Park versus payments: reconciling divergent policy responses to biodiversity loss and climate change from tropical deforestation. *Environmental Research Letters* 8. 034028 (10 pp).

Castro Franco, H.E. (1998). Fundamentos para el conocimiento y manejo de suelos agrícolas. Instituto Universitario Juan de Castellanos, Tunja, Boyacá, Colombia.

Cargill, M. y O'Connor, P. (2009). Writing Scientific Research Articles. Strategy and Steps. Primera Edición. Wiley- Blackwell. Australia.

Carvalho, W; da Silva, C; Muselli, A; Koenow, H; Rendeiro, N; Barge, S. (2014). Método do hipercubo latino condicionado para a amostragem de solos na presença de covariáveis ambientais visando o mapeamento digital de solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38: 386-396.

Chessel, D.; Dufour, A. B.; Thioulouse, J. (2004). The ade4 package-I- One-table methods. *R News*. 4: 5-10. <http://CRAN.R-project.org/package=ade4>.

Córdoba, M., Bruno, C., Balzarini, M., (2016). Variabilidad espacial de suelos a escala lote y su relación con los rendimientos. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, (42:1):47-53.

Córdoba, M., Bruno, C., Balzarini, M. Costa, J. (2012). Análisis de componentes principales con datos georeferenciados. Una aplicación a la agricultura de precisión. *Rev. Fac. de Cienc. Agrar. Univ. Nac. Cuyo*, (44:1):27-39.

Cortés Lombana, A. y Malagón Castro, D. (1984). Los levantamientos agrológicos y sus aplicaciones múltiples. Universidad Jorge Tadeo Lozano, Bogotá D.C.

Cressie N., (1985), Fitting variogram models by weighted least squares, *Journal of the International Association of Mathematical Geology*, 17, 563–586.

Cressie N., & Hawkins D.M., (1980), Robust estimation of the variogram, *Journal of the International Association of Mathematical Geology*, 12, 115–125.

De Vos, B., Van Meirvenne, M., Quataert, P., Deckers, J. y Muys, B. (2005). Predictive Quality of Pedotransfer Functions for Estimating Bulk Density of Forest Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:500-510.

Demolon, A. (1996). Crecimiento de vegetales cultivados. Traducido de la Primera Edición Francesa por Pérez, M.I. Barcelona. Omega V.2. 376 p.

Dutter, R. (2016). Graphical y Numerical Analysis of Spatial Data with a GUI y R. *Austrian Journal of Statistics*, 40(1y2), 37-46.

Espíndola C y Valderrama José O. (2012). Huella del Carbono. Parte 1: Conceptos, Métodos de Estimación y Complejidades Metodológicas. En: *Revista Información Tecnológica* Vol. 23(1), 163-176 (2012). Recuperado de: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v23n1/art17.pdf>

Espinoza J. (2005). Secuestro de carbono en el suelo. *Revista Digital del Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias de Venezuela*.

Etchevers, J., Monreal, C., Hidalgo, C., Acosta, M., Padilla, J. y López, R. (2005). *Manual para la determinación de carbono en la parte aérea y subterránea de sistemas de producción en ladera*. Proyecto manejo sustentable de laderas. Colegio de Postgraduados México.



- FAO. (2001). *Soil carbon sequestration for improved land management*. World soil reports 96. Rome, 58 p.
- FAO & GTIS. 2015. *Status of the World's Soil Resources*, Roma: s.n.
- FAO. (2015). *Learning tool on Nationally Appropriate Mitigation Actions (NAMAs) in the agriculture, forestry and other land use (AFOLU) sector*. Roma: FAO.
- FAO. (2017). *Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. Roma, Italia.
- Fassbender, H. W. (1975). *Química de suelos con énfasis en los suelos de América Latina*. Turrialba, Costa Rica: IICA.
- Fitzpatrick, E.A. (1996). *Introducción a la ciencia de los suelos*. Primera edición. Trillas. México D.F
- Forero, F., Cely, G., Palacios, L. (2015). *Dinámica del páramo como espacio para la captura de carbono*. Boyacá, Colombia. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC).
- Fotheringham, E., Brunson, C. y Charlton, M. (2002). Geographically Weighted Regression: the analysis of spatially varying relationships. *John Wiley & Sons*. Inglaterra. 283 p.
- Fox, J. y Weisberg, S. (2011). *An {R} Companion to Applied Regression*, Segunda Edición. Thousand Oaks CA: Sage. URL: <http://socserv.socsci.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion>.
- Franklin, J. (1995). Predictive vegetation mapping: geographic modelling of biospatial patterns in relation to environmental gradients. *Prog. Phys. Geogr.* 19, 474–499.
- Galantini, J. A., (2002). Contenido y calidad de las fracciones orgánicas del suelo bajo rotaciones con trigo en la región semiárida pampeana. *INTA, Argentina. RIA*, 30, 125–146.
- Gao, B., Pan, Y., Chen, Z., Wu, F., Rhen, X., Hu, M. (2016). A Spatial Conditioned Latin Hypercube Sampling Method for Mapping Using Ancillary Data. *Transactions in GIS*, (2:1-20) doi: 10.1111/tgis.12176.
- GLOBE Carbon Cycle (2008). *Carbon Cycle Glossary*. University of New Hampshire, Durham, NH 03824UNH. Recuperado de: <http://globecarboncycle.unh.edu/CarbonCycleGlossary.shtml>.
- Gollini, I., Lu, B., Charlton, M., Brunson, C. y Harris, P. (2015). GWmodel: An R Package for Exploring Spatial Heterogeneity Using Geographically Weighted Models. *Journal of Statistical Software*, 63(17), 1-50. Recuperado de <http://www.jstatsoft.org/v63/i17/>.
- González, Julio; Guerra, Fernando; Gómez, Heriberto. (2007). Conceptos básicos de geoestadística en geografía y ciencias de la tierra: MANEJO Y APLICACIÓN. *Geoenseñanza*, vol. 12, núm. 1, enero-junio, 2007, pp. 81-90. Universidad de los Andes. San Cristóbal, Venezuela. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/pdf/360/36014577008.pdf>
- Gougoulias, C., Clark, J. M. & Shaw, L. J. (2014). The role of soil microbes in the global carbon cycle: tracking the below-ground microbial processing of plant-derived carbon for manipulating carbon dynamics in agricultural systems. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94: 2362-2371.
- Gross, J. y Ligges, U. (2015). nortest: Tests for Normality. *R package version 1.0-4*. Recuperado de: <https://CRAN.R-project.org/package=nortest>.
- Gutiérrez, H. (2010), *Calidad total y productividad*, tercera edición. México. McGRAW-HILL. Interamericana Editores, S.A. DE C.V.

- Hengl, T. (2017). GSIF: Global Soil Information Facilities. *R package version 0.5-4*. Recuperado de: <https://CRAN.R-project.org/package=GSIF>.
- Heuscher, S. A., Brandt, C.C. y Jardine, P.M. (2005). Using soil physical and chemical properties to estimate bulk density. *Soil Science Society of America Journal* 69:51-56.
- Heuvelink, G.B.M., Webster, R., (2001). Modelling soil variation: past, present, and future. *Geoderma* 100, 269- 301.
- IDEAM, (2010). Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, D. C., 72p
- IGAC. (2014). *Metodología M40100-01/14 V2 Levantamiento de Suelos*. Grupo Interno de Trabajo Levantamiento de Suelos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá, Colombia.
- IGAC. (2014a). *Metodología Levantamiento de Suelos. Grupo Interno de Trabajo de Levantamiento de Suelos y Aplicaciones Agrológicas*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá, Colombia.
- IGAC. (2014b). *Códigos para los levantamientos de suelos*. Grupo Interno de Trabajo de Levantamientos Agrológicos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá – Colombia.
- IGAC. (2016). *Instructivo I40100-08/16 V3 Preparación, Actualización y Análisis de la Información en la Etapa Precampo para Levantamiento de Suelos*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá, Colombia.
- IGAC. (2017). *Instructivo Etapa de Campo para levantamiento de suelos I40100-09/17 V4*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá, Colombia.
- IGAC. (2017a). Levantamiento de suelos a diferentes escalas. Manual de Procedimientos. GIT Levantamiento de Suelos y Aplicaciones Agrológicas. Subdirección de Agrología. Instituto Geográfico Agustín Codazzi-IGAC, Bogotá D.C.
- IPCC. (2006). Introduction IPCC Good Practice Guidance for LULUCF 4.11 Parties must, by the end of 2006. *IPCC for LULUCF*. Glossary. Pdf.
- IPCC (2006a), 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. y Tanabe K. (eds). Glossary. Publicado por: IGES, Japón.
- Jackson, M. L., (1964). *Análisis químico de suelos* (Traducido por J. Beltrán). Ediciones Omega, S. A. Barcelona, España. 662 p.
- Jalabert, S. M., Martin, M. P., Renaud, J. P., Boulonne, L., Jolivet, C., Montanarella, L., Arrouays, D., (2010). Estimating forest soil bulk density using boosted regression modeling. *Soil Use and Management* 26, 516–528.
- Jaramillo Jaramillo, D.F. (2002). Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Medellín, Colombia.
- Johnson, R. & Wichern, D. (2008). Applied multivariate statistical analysis. Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ, USA. ISBN: 0-130-41146-9.
- Juma, N.G. 1998. The pedoshere and its dynamics: a systems approach to soil science. Volume 1. Quality Color. Press Inc. Edmonton, Canada. 315pp.

- Kempen, B., Heuvelink, G., Brus, D. y Stoorvogel, J. (2010). Pedometric mapping of soil organic matter using a soil map with quantified uncertainty. *Eur. J. Soil Sci.* 61, 333–347.
- Lagacherie, P. y McBratney, A.B. (2006). Chapter 1 spatial soil information systems and spatial soil inference systems: perspectives for digital soil mapping. *Dev. Soil Sci.* 3–22.
- Lal, R., (1997). Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO<sub>2</sub> – enrichment. *Soil Till. Res.* 43, 81-107.
- Lal, R., Eckert, D. J., Fausey, N. R., Edwards, W. M., (1990). Conservation tillage in sustainable agriculture. In: C. A. Edwards, R. Lal, P. Madden, R. H. Miller and G. House. *Sustainable Agriculture Systems*. Soil and Water Conservation Society, Iowa, USA, pp. 203-225.
- Legros, J. P. (2006). *Mapping of the Soil*. Science Publishers. Lausanne.
- Ma, K., Liu, J., Balkovič, J., Skalský, R., Azevedo, L., Kraxner, F. (2016). Changes in soil organic carbon stocks of wetlands on China's Zoige plateau from 1980 to 2010. *Ecological Modelling* (327); 18 – 28; doi: 10.1016/j.ecolmodel.2016.01.009.
- MADS, GIZ, WRI, 2017. Documento Nacional del Sistema de Monitoreo Reporte y Verificación MRV para Colombia. Bogotá D.C.
- Malagón Castro, D., Diazgranados Navas, D.A., Álvarez Lucero, G.D., Ospina Torres, C.X., Niño Casas, E. y Rivas Rincón, B.C. (2016). *Suelos y Tierras de Colombia*. Tomos 1 y 2. Subdirección de Agrología. Instituto Geográfico Agustín Codazzi-IGAC, Bogotá D.C.
- Martínez H, E., Fuentes E, J.P. y Acevedo H, E. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*. 8(1), 68-96.
- McBratney, A. Mendonça Santos, M., & Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117(1–2), 3–52. Disponible en [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4)
- McKenzie, N.J. y Ryan, P. J. (1999). Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. *Geoderma* 89, 67–94.
- Minasny B. & McBratney A.B. (2006). A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. *Comput. Geosci.* 32:1378-1388.
- Meinshausen, N. (2016). *Quantreg Forest: Quantile Regression Forests*. R package version 1.3-5. <https://CRAN.R-project.org/package=quantregForestM>
- Moreno, R. & Vayá, E. (2000). *Técnicas econométricas para el tratamiento de datos espaciales: La econometría espacial*. Universidad de Barcelona. Barcelona, España.
- Myatt, G. y Johnson, W. (2014). *Making sense of data I. A practical guide to exploratory data analysis and data mining*. Wiley & Sons. Segunda edición. Canadá. 250 p.
- Norma Técnica Colombiana NTC 4611. (2011). *Segunda actualización. Descriptores: Cartografía; Información geográfica. Metadatos geográficos*. Editada por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).
- Normas ISO 9000 y Calidad. (2015). softexpert.es Recuperado de <http://normas-iso-9000.blogspot.com.co/2009/02/control-de-calidad-qc.html>.

O'Rourke, S. M., Angers, D. A., Holden, N. M. & Mcbratney, A. B. (2015). Soil organic carbon across scales. *Global Change Biology*, 21: 3561–3574.

Olivera, C. (2014). *Caracterización de la materia orgánica del suelo y perspectivas sobre nuevas metodologías de análisis*. En: XVII Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo (Popayán, Cauca, Colombia). Del 8 al 11 de Octubre.

Peat or Russian Corer (2012). Van Walt. Monitoring your needs. Fact sheet. USA. Recuperado de: <http://www.vanwalt.com>.

Pineda, Corina y Vioria, Jesús. (1997). Funciones de pedotransferencia para estimar la retención de humedad en suelos de la Cuenca del lago de Valencia. En *Revista Venesuelos* Vol. 5, Nº 1 y 2, 1997. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/279689530\\_FUNCIONES\\_DE\\_PEDOTRANSFERENCIA\\_PARA\\_ESTIMAR\\_LA\\_RETENCION\\_DE\\_HUMEDAD\\_EN\\_SUELOS\\_DE\\_LA\\_CUENCA\\_DEL\\_LAGO\\_DE\\_VALENCIA](https://www.researchgate.net/publication/279689530_FUNCIONES_DE_PEDOTRANSFERENCIA_PARA_ESTIMAR_LA_RETENCION_DE_HUMEDAD_EN_SUELOS_DE_LA_CUENCA_DEL_LAGO_DE_VALENCIA)

R Core Team (2017). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Recuperado de: <https://www.R-project.org/>.

Ribeiro Jr, P. J., Christensen, O. F., y Diggle, P. J. (2003). *geoR y geoRglm: software for model-based geostatistics*.

Ribeiro Jr, P. J., y Diggle, P. J. (2006). *geoR: Package for Geostatistical Data Analysis An illustrative session*. Artificial Intelligence, 1, 1-24.

Ribeiro, P. & Diggle, P. (2016). *geoR: Analysis of Geostatistical Data*. R package version 1.7-5.2. <https://CRAN.R-project.org/package=geoR>

Robert, M. 1996. *Le sol: interface dans l'environnement, ressource pour le développement*. Dunod/ Masson, Paris 240 pp.

Samuel- Rosa, A., Heuvelink, G. B. M., Vasques, G. M. y Anjos, L. H. C. 2015. Do more detailed environmental covariates deliver more accurate soil maps? *Geoderma* 243–244, 214- 227.

Santa, L.F. (2012). Ejemplo de la construcción de un mapa de predicción por medio de Geoestadística. Notas de clase. Especialización en Sistemas de Información Geográfica (SIG). Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad de Ingeniería. Bogotá – Colombia.

Schmidt K., Behrens T., Daumann J., Ramirez-Lopez L., Werban U., Dietrich P., Scholten T. (2014). A comparison of calibration sampling schemes at the field scale. *Geoderma*. 232:243-256.

Scull, P., Franklin, J., Chadwick, O. A. y McArthur, D. (2003). Predictive soil mapping: A review. *Progress in Physical Geography*, 27, 171–197.

Seltman, H. (2015). *Experimental design and analysis*. Pittsburgh: Carnegie Mellon University. Pensilvania. EEUU. 428 p.

Sequeira, C., Wills, S., Seybold, C. y West, L. (2014). Predicting soil bulk density for incomplete databases. *Geoderma* 213, 64- 73.

Sigman, D., boyle, E. (2000). Glacial/Interglacial variations in atmospheric carbon dioxide. *Nature* 401:859:869.

Slafer, G. (2009). ¿Cómo escribir un artículo científico? *Revista de Investigación en Educación* 6, 124- 132.

- Song, X., Liu, F., Zhang, G., Li, D., Zhao, Y. y Yang, J. 2017. Mapping Soil Organic Carbon Using Local Terrain Attributes: A Comparison of Different Polynomial Models. *Pedosphere* 27(4), 681- 693.
- Suárez, D., Acurio, C., Chimbolema, S., Aguirre, X. (2016) Análisis del carbono secuestrado en humedales altoandinos de dos áreas protegidas del Ecuador. *Ecología Aplicada*, vol. 15, (2). pp. 171-177.
- Swift, R. S., (2001). Sequestration of carbon by soil. *Soil Sci.*, 166, 858-871.
- UNFCCC. 2014. *National Reports*. United Nations Framework Convention on Climate Change. Historia de la CMNUCC. Recuperado en: [http://unfccc.int/national\\_reports/items/1408.php](http://unfccc.int/national_reports/items/1408.php)). Accedido el 13 de febrero de 2017.
- USDA. 2014. Claves para la Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff). Décima segunda edición. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Servicio de Conservación de Recursos Naturales. Washington, D.C., EEUU. Venables, W. N. y Ripley, B. D. (2002) *Modern Applied Statistics with S*. Fourth Edition. Springer, New York. ISBN 0-387-95457-0.
- USDA. 2017. Soil Survey Manual. Handbook N° 18. United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. Washington, D.C.
- Visconti, F., De Paz, J., (2016) Estimación de la capacidad potencial de secuestro y emisión de CO<sub>2</sub> de los suelos agrícolas de la comunidad valenciana. *Revista científica de ecología y medio ambiente*. 26(1), 91-100.
- Wang, J., Bai, J., Zhao, Q., Lu, Q., Xia, Z. (2016). Five-year changes in soil organic carbon and total nitrogen in coastal wetlands affected by flow-sediment regulation in a Chinese delta. *Scientific Reports* (6:21137); doi: 10.1038/srep21137.
- Wickham, H. y Bryan, J. (2017). readxl: Read Excel Files. *R package version 1.0.0*. Recuperado de: <https://CRAN.R-project.org/package=readxl>.
- Winship, C., y Radbill, L. (1994). Sampling weights y regression analysis. *Sociological Methods y Research*, 23(2), 230-257.
- Wong, C. 2014. Digital soil mapping using legacy soil maps for predicting soil properties in Sanmatenga, Burkina Faso. Thesis Report GIRS-2014-12. Tesis sometida como requisito parcial para grado de Master en Ciencias. Wageningen University. 113 p.
- Yu, J., Wang, Y., Li, Y., Dong, H., Zhou, D., Han, G., Wu, H., Wang, G., Mao, P., Gao, Y. (2012). Soil organic carbon storage changes in coastal wetlands of the modern Yellow River Delta from 2000 to 2009. *Biogeosciences* (9); 2325 – 2331; doi: 10.5194/bg-9-2325-2012.
- Zambrano-Bigiarini, M. (2017). hydroGOF: Goodness-of-fit functions for comparison of simulated and observed hydrological time series. *R package version 0.3-10*. Recuperado de: <http://hzambran.github.io/hydroGOF/>.

## 7. ANEXOS

### Anexo 1: Formato cronograma y plan de trabajo.

	<b>CRONOGRAMA Y PLAN DE TRABAJO</b> HOJA DE RUTA Y PROCEDIMIENTOS PARA LA ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS DE PÁRAMOS Y HUMEDALES DE COLOMBIA					FECHA
						AAAA - MM - DD
NOMBRE DEL PROYECTO DE ESTIMACIÓN DE CONTENIDO DE COS: _____						
LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO: _____						
TIPO DE FASE: <input type="checkbox"/> MONITOREO <input type="checkbox"/> DENSIFICACIÓN    ECOSISTEMA: <input type="checkbox"/> PÁRAMOS <input type="checkbox"/> HUMEDALES						
_____ RESPONSABLE DEL PROYECTO			_____ COORDINADOR DEL PROYECTO			
PLAN DE TRABAJO PARA LA ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS DE PÁRAMOS Y HUMEDALES DE COLOMBIA						
ACTIVIDADES	RESPONSABLE(S)	MES 1	MES 2	MES 3	MES 4	% DE AVANCE
<b>FASE PRECAMPO</b>						
Revisión, análisis y actualización de información temática						
<b>FASE CAMPO</b>						
Sistema de muestreo y criterios de muestreo						


FASE POSCAMPO LABORATORIO						
Procesos analíticos						
FASE POSCAMPO OFICINA						
Análisis de resultados y organización de la información						
CONTROL DE CALIDAD						
Elaboración de carpeta de trazabilidad						
ELABORÓ	REVISÓ		APROBÓ			
_____	_____		_____			
Nombre	Nombre		Nombre			
_____	_____		_____			
Firma	Firma		Firma			





ELABORÓ		REVISÓ			APROBÓ	
_____ Nombre		_____ Nombre			_____ Nombre	
_____ Firma		_____ Firma			_____ Firma	

**Anexo 3: Formato información secundaria para el levantamiento y/o estudio de suelos.**

	<b>INFORMACIÓN SECUNDARIA PARA LA DETERMINACIÓN Y/O MONITOREO DE CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS</b>				FECHA	
	HOJA DE RUTA Y PROCEDIMIENTOS PARA LA ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS DE PÁRAMOS Y HUMEDALES DE COLOMBIA				AAAA - MM - DD	
	<p>NOMBRE DEL PROYECTO DE ESTIMACIÓN DE CONTENIDO DE COS: _____</p> <p>LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO: _____</p> <p>TIPO DE FASE: <input type="checkbox"/> MONITOREO      <input type="checkbox"/> DENSIFICACIÓN      ECOSISTEMA: <input type="checkbox"/> PÁRAMOS      <input type="checkbox"/> HUMEDALES</p> <p>_____ RESPONSABLE DEL PROYECTO      _____ COORDINADOR DEL PROYECTO</p>					
<b>DESCRIPCIÓN DE LA INFORMACIÓN SECUNDARIA PARA LA ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS DE PÁRAMOS Y HUMEDALES DE COLOMBIA</b>						
<b>ESTUDIOS DE SUELOS ANTERIORES / PRECEDENTES</b>						
NOMBRE DEL ESTUDIO	AÑO DE PUBLICACIÓN	AUTOR	TIPO DE ESTUDIO O ESCALA	PRESENTACIÓN		CONCEPTO USO, DISPONIBILIDAD, OBSERVACIONES
				IMPRESO	DIGITAL	
<b>ESTUDIOS O DESCRIPCIONES CLIMÁTICAS</b>						
NOMBRE DEL ESTUDIO	AÑO DE PUBLICACIÓN	AUTOR	TIPO DE ESTUDIO O ESCALA	PRESENTACIÓN		CONCEPTO USO, DISPONIBILIDAD, OBSERVACIONES
				IMPRESO	DIGITAL	

ESTUDIOS O DESCRIPCIONES DE USO ACTUAL Y/O COBERTURA VEGETAL, ZONAS DE VIDA Y ECOSISTEMAS						
NOMBRE DEL ESTUDIO	AÑO DE PUBLICACIÓN	AUTOR	TIPO DE ESTUDIO O ESCALA	PRESENTACIÓN		CONCEPTO USO, DISPONIBILIDAD, OBSERVACIONES
				IMPRESO	DIGITAL	
ESTUDIOS DEL MEDIO BIOFÍSICO COMPLEMENTARIOS A LOS ANTERIORES						
NOMBRE DEL ESTUDIO	AÑO DE PUBLICACIÓN	AUTOR	TIPO DE ESTUDIO O ESCALA	PRESENTACIÓN		CONCEPTO USO, DISPONIBILIDAD, OBSERVACIONES
				IMPRESO	DIGITAL	
ESTUDIOS DEL MEDIO SOCIOECONÓMICO Y CULTURAL						
NOMBRE DEL ESTUDIO	AÑO DE PUBLICACIÓN	AUTOR	TIPO DE ESTUDIO O ESCALA	PRESENTACIÓN		CONCEPTO USO, DISPONIBILIDAD, OBSERVACIONES
				IMPRESO	DIGITAL	
ELABORÓ		REVISÓ		APROBÓ		
_____		_____		_____		
Nombre		Nombre		Nombre		



<hr/> <p>Firma</p>	<hr/> <p>Firma</p>	<hr/> <p>Firma</p>
--------------------	--------------------	--------------------

**Anexo 4: Formato inventario imágenes de sensores remotos.**

	<b>INVENTARIO IMÁGENES DE SENSORES REMOTOS</b>								FECHA	
	HOJA DE RUTA Y PROCEDIMIENTOS PARA LA ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS DE PÁRAMOS Y HUMEDALES DE COLOMBIA								AAAA - MM - DD	
NOMBRE DEL PROYECTO DE ESTIMACIÓN DE CONTENIDO DE COS: _____										
LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO: _____										
TIPO DE FASE: <input type="checkbox"/> MONITOREO <input type="checkbox"/> DENSIFICACIÓN         ECOSISTEMA: <input type="checkbox"/> PÁRAMOS <input type="checkbox"/> HUMEDALES										
RESPONSABLE DEL PROYECTO _____					COORDINADOR DEL PROYECTO _____					
RELACIÓN DE LAS IMÁGENES DE SENSORES REMOTOS UTILIZADAS COMO INSUMO PARA LA ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS DE PÁRAMOS Y HUMEDALES DE COLOMBIA										
VUELO C - M - R	SOBRES	ESCALA	FECHA TOMA AAAA - MM - DD	No. FOTOS	TOTAL FOTOS	No. FAJA EST.	B/N COLOR	MEDIO		FECHA CONSULTA AAAA - MM - DD
								ANÁLOGO	DIGITAL	


TOTAL AEROFOTOGRAFÍAS	DESCRIPCIÓN, LOCALIZACIÓN E INDICACIONES DEL ÍNDICE DE VUELO DE AEROFOTOGRAFÍAS
_____	_____

**RELACIÓN DE LAS IMÁGENES DE SATÉLITE Y/O RADAR UTILIZADAS COMO INSUMO PARA LA ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS DE PÁRAMOS Y HUMEDALES DE COLOMBIA**

CÓDIGO INTERNO IGAC	TIPO DE IMAGEN		NOMBRE DEL SATÉLITE	FECHA TOMA AAAA - MM - DD	CALIDAD DE LA GEOREFERENCIACIÓN		
	OPTICA	RADAR			BUENA (B)	REGULAR (R)	DEFICIENTE (D)


TOTAL DE IMÁGENES DE SATÉLITE  
Y/O RADAR

\_\_\_\_\_

ELABORÓ

REVISÓ

APROBÓ

Nombre

Nombre

Nombre

Firma

Firma

Firma






\* Hace referencia a la ubicación del perfil en la cartografía de la información secundaria consultada.

ELABORÓ	REVISÓ	APROBÓ
<hr/> <p style="text-align: center;">Nombre</p> <hr/> <p style="text-align: center;">Firma</p>	<hr/> <p style="text-align: center;">Nombre</p> <hr/> <p style="text-align: center;">Firma</p>	<hr/> <p style="text-align: center;">Nombre</p> <hr/> <p style="text-align: center;">Firma</p>



**Anexo 6: Captura de datos para monitoreo y cuantificación del contenido de carbono orgánico en suelos de páramos y humedales de Colombia**

 <b>MONITOREO Y CUANTIFICACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS DE PÁRAMOS Y HUMEDALES DE COLOMBIA</b>		FECHA		
		AAA	MM	DD
Etapa de muestreo:	___ Monitoreo	___ Densificación		
Código PPMG:				
Coordenadas: N			Altitud:	msnm
W				
Nombre reconecedor:				
Sitio:				
Municipio:		Departamento:		
Ecosistema:		Distrito/Región:		
Pendiente:		Clima ambiental:		
Cobertura reportada:				
Cobertura/uso actual:				
Zona homogénea de muestreo:		Punto cardinal:		
Porcentaje fragmentos de roca:		Tipo fragmentos de roca:		
Número de muestras tomadas:	Densidad _____	CO% _____		
Factor limitante de profundidad:		Profundidad limitante:	cm	
Tipo de observación:	___ Calicata	___ Cajuela	___ Barrenaje	
Observaciones:				

## Anexo 7. Código cálculo universo 2

```
setwd("F:\\.....")  
dir()  
require(car)  
require(MASS)  
require(akima)  
require(gstat)  
require(geoR)  
require(lattice)  
require(maptools)  
require(rgdal)  
require(ape)  
require(vegan)  
require(Rcmdr)  
library(openxlsx)  
require(spdep)  
require(nortest)  
datos=read.xlsx(".....xlsx", sheet="Hoja1") ### LECTURA DE DATOS  
names(datos)  
fix(datos)  
x11()  
trellis.par.set(sp.theme())  
loma5 = readShapePoly("PoligonoVer.shp")  
poligonos = polygons(loma5)  
xy = SpatialPoints(datos[c("X", "Y")])  
plot(poligonos,axes=T)
```

```

plot(xy,add=T,pch="+",cex=0.6,col="blue")
text(datos$X,datos$Y,labels=datos1$Ar12,cex=.6)
tabla.estadisticas.cont(datos[, c(3)])
summary(powerTransform(datos$CO))
datos2 = data.frame(datos[, 1:2], ARCILLA0_20 =(datos$Ar12))
#####
X11()
op=par(mfrow=c(1,3))
hist(datos$Ar12,freq=FALSE,main=" ",xlab="ARCILLA 0 - 20 cm",ylab="Frecuencia")
lines(density(datos$Ar12),col="red")
plot(ecdf(datos$Ar12),ylab="Frecuencia",xlab="ARCILLA 0 - 20 cm",main="")
boxplot(datos$Ar12)
par(op)
breaks = c(min(datos$Ar12), quantile(datos$Ar12,probs = c(0.2, 0.4, 0.6, 0.8),type = 6),
max(datos$Ar12))
datos1 = datos[, c(1,2,3)] #Se genera archivo Spatial Points Data Frame requerido en el analisis
kriging si no se transforma la variable
coordinates(datos1) = c("X", "Y")
#####
breaks = c(min(datos2$ARCILLA0_20), quantile(datos2$ARCILLA0_20,probs = c(0.2, 0.4, 0.6,
0.8),type = 6), max(datos2$ARCILLA0_20))
datos3 = datos2[, c(1, 2, 3)] #Se genera archivo Spatial Points Data Frame requerido en el analisis
kriging si no se transforma la variable
coordinates(datos3) = c("X", "Y")
#Modelos para la tendencia
x11()
scatterplot(ARCILLA0_20~X, reg.line=lm, smooth=TRUE, spread=TRUE, boxplots=FALSE, span=0.5,
data=datos2)
x11()

```

```
scatterplot(ARCILLA0_20~Y, reg.line=lm, smooth=TRUE, spread=TRUE, boxplots=FALSE, span=0.5,
data=datos2)
```

```
mod1reg=lm(ARCILLA0_20~X+Y+I(X*Y)+I(X^2)+I(Y^2)+I(X^2*Y)+I(Y^2*X)+I(X^3)+I(Y^3)+I(X^2*Y^2),
data=datos2)
```

```
summary(mod1reg)
```

```
mod2reg = stepAIC(mod1reg, scope = list(upper = mod1reg$formula, lower = ~1), direction =
"both")
```

```
summary(mod2reg)
```

#Análisis de los residuales

La hipótesis básica del modelo geoestadístico es que el proceso es estacionario, cuando los datos no parecen satisfacer dicho

requerimiento, entonces se exploran alternativas para cambiar la estructura de las observaciones, tales como las transformaciones

para estabilizar la variabilidad y los modelos de regresión para eliminar la tendencia y por lo tanto, cumplir con los supuestos

del modelo.

Es por ello, que es necesario de nuevo analizar el comportamiento de la distribución de los residuales del modelo de regresión

estimado, con el fin de identificar que la variabilidad es baja y que se elimina la tendencia que mostraban los datos, entonces se

deben calcular las medidas y los gráficos descriptivos.

```
datos4 = data.frame(datos[, 1:2], res=mod2reg$residuals)
```

```
tabla.estadisticas.cont(datos4)
```

```
breaks = c(min(datos4$res), quantile(datos4$res, probs = c(0.2, 0.4, 0.6, 0.8), type = 6),
max(datos4$res))
```

```
datos5 = datos4[, c(1,2,3)] #Se genera archivo Spatial Points Data Frame requerido para verificar
los residuales del modelo de tendencia
```

```
coordinates(datos5) = c("X", "Y")
```

#Modelo para los residuales del modelo de regresión para verificar que se elimino la tendencia en el modelo seleccionado

```
x11()
```

```
scatterplot(res~X, reg.line=lm, smooth=TRUE, spread=TRUE, boxplots=FALSE, span=0.5, data=datos4)
```

```
x11()
```

```
scatterplot(res~Y, reg.line=lm, smooth=TRUE, spread=TRUE, boxplots=FALSE, span=0.5, data=datos4)
```

```
mod1regr=lm(res  
~X+Y+I(X*Y)+I(X^2)+I(Y^2)+I(X^2*Y)+I(Y^2*X)+I(X^3)+I(Y^3)+I(X^2*Y^2),data=datos4)
```

```
summary(mod1regr)
```

```
mod2regr = stepAIC(mod1regr, scope = list(upper = mod1regr$formula, lower = ~1), direction =  
"both")
```

```
summary(mod2regr)
```

#Análisis estructural

#Estimación del semivariograma experimental

```
geo = as.geodata(datos4, coords.col = 1:2, data.col = 3)
```

```
plot(geo, scatter3d = TRUE)
```

```
x11()
```

```
var1 = variog(geo)
```

```
plot(var1)
```

```
x11()
```

```
var2 = variog(geo, max.dist = 400)
```

```
plot(var2)
```

```
plot(variog4(geo, max.dist = 400))
```

#Ajuste del modelo teórico de semivarianza

```
ev=eyefit(var2)
```

```
ev
```

```
mod1exp=variofit(var2,ini=ev[[1]]$cov.pars,nugget=ev[[1]]$nugget,fix.nugget=F,cov.model=ev[[1]]
$cov.model,weights="equal")
```

```
mod2exp=variofit(var2,ini=ev[[1]]$cov.pars,nugget=ev[[1]]$nugget,fix.nugget=F,cov.model=ev[[1]]
$cov.model,weights="npairs")
```

```
mod3exp=variofit(var2,ini=ev[[1]]$cov.pars,nugget=ev[[1]]$nugget,fix.nugget=F,cov.model=ev[[1]]
$cov.model,weights="cressie")
```

```
mod4exp=likfit(geo,ini=ev[[1]]$cov.pars,nugget=ev[[1]]$nugget,fix.nugget=F,cov.model=ev[[1]]$c
ov.model,lik.method = "ML")
```

```
mod5exp=likfit(geo,ini=ev[[1]]$cov.pars,nugget=ev[[1]]$nugget,fix.nugget=F,cov.model=ev[[1]]$c
ov.model,lik.method = "REML")
```

```
mod1gau=variofit(var2,ini=ev[[2]]$cov.pars,nugget=ev[[2]]$nugget,fix.nugget=F,cov.model=ev[[2]]
$cov.model,weights="equal")
```

```
mod2gau=variofit(var2,ini=ev[[2]]$cov.pars,nugget=ev[[2]]$nugget,fix.nugget=F,cov.model=ev[[2]]
$cov.model,weights="npairs")
```

```
mod3gau=variofit(var2,ini=ev[[2]]$cov.pars,nugget=ev[[2]]$nugget,fix.nugget=F,cov.model=ev[[2]]
$cov.model,weights="cressie")
```

```
mod4gau=likfit(geo,ini=ev[[2]]$cov.pars,nugget=ev[[2]]$nugget,fix.nugget=F,cov.model=ev[[2]]$c
ov.model,lik.method = "ML")
```

```
mod5gau=likfit(geo,ini=ev[[2]]$cov.pars,nugget=ev[[2]]$nugget,fix.nugget=F,cov.model=ev[[2]]$c
ov.model,lik.method = "REML")
```

```
mod1sph=variofit(var2,ini=ev[[3]]$cov.pars,nugget=ev[[3]]$nugget,fix.nugget=F,cov.model=ev[[3]]
$cov.model,weights="equal")
```

```
mod2sph=variofit(var2,ini=ev[[3]]$cov.pars,nugget=ev[[3]]$nugget,fix.nugget=F,cov.model=ev[[3]]
$cov.model,weights="npairs")
```

```
mod3sph=variofit(var2,ini=ev[[3]]$cov.pars,nugget=ev[[3]]$nugget,fix.nugget=F,cov.model=ev[[3]]
$cov.model,weights="cressie")
```

```
mod4sph=likfit(geo,ini=ev[[3]]$cov.pars,nugget=ev[[3]]$nugget,fix.nugget=F,cov.model=ev[[3]]$c
ov.model,lik.method = "ML")
```

```
mod5sph=likfit(geo,ini=ev[[3]]$cov.pars,nugget=ev[[3]]$nugget,fix.nugget=F,cov.model=ev[[3]]$c
ov.model,lik.method = "REML")
```

```
x11()
```

```
op=par(mfrow=c(1,3))
```



```

plot(var2, main = expression(paste("Exponential estimated ", tau^2)), ylim = c(4, 14))

lines(mod1exp, max.dist = 400, col = 1)

lines(mod2exp, max.dist = 400, col = 2)

lines(mod3exp, max.dist = 400, col = 3)

lines(mod4exp, max.dist = 400, col = 4)

lines(mod5exp, max.dist = 400, col = 5)

legend(150, 7, legend = c("OLS", "WLS - npairs", "WLS - cressie", "ML", "REML"),col = 1:5, lty = c(1,
1, 2, 2), lwd = c(1, 2, 1, 2), cex = 0.7)

plot(var2, main = expression(paste("Gaussian estimated ", tau^2)), ylim = c(4, 14))

lines(mod1gau, max.dist = 400, col = 1)

lines(mod2gau, max.dist = 400, col = 2)

lines(mod3gau, max.dist = 400, col = 3)

lines(mod4gau, max.dist = 400, col = 4)

lines(mod5gau, max.dist = 400, col = 5)

legend(150, 7, legend = c("OLS", "WLS - npairs", "WLS - cressie", "ML", "REML"),col = 1:5, lty = c(1,
1, 2, 2), lwd = c(1, 2, 1, 2), cex = 0.7)

plot(var2, main = expression(paste("Spherical estimated ", tau^2)), ylim = c(4, 14))

lines(mod1sph, max.dist = 400, col = 1)

lines(mod2sph, max.dist = 400, col = 2)

lines(mod3sph, max.dist = 400, col = 3)

lines(mod4sph, max.dist = 400, col = 4)

lines(mod5sph, max.dist = 400, col = 5)

legend(150, 7, legend = c("OLS", "WLS - npairs", "WLS - cressie", "ML", "REML"),col = 1:5, lty = c(1,
1, 2, 2), lwd = c(1, 2, 1, 2), cex = 0.7)

par(op)

#Validación Cruzada

```

La selección definitiva del modelo de correlación espacial se hace con base en aquel modelo que genere las mejores predicciones

del atributo en estudio. Al ser el kriging un metodo de interpolacion exacto, se acostumbra a usar la tecnica de la validacion

cruzada con el fin de evaluar la calidad de las predicciones.

```

ve.fit1exp <- as.vgm.variomodel(mod1exp)
ve.fit2exp <- as.vgm.variomodel(mod2exp)
ve.fit3exp <- as.vgm.variomodel(mod3exp)
ve.fit4exp <- as.vgm.variomodel(mod4exp)
ve.fit5exp <- as.vgm.variomodel(mod5exp)
ve.fit1gau <- as.vgm.variomodel(mod1gau)
ve.fit2gau <- as.vgm.variomodel(mod2gau)
ve.fit3gau <- as.vgm.variomodel(mod3gau)
ve.fit4gau <- as.vgm.variomodel(mod4gau)
ve.fit5gau <- as.vgm.variomodel(mod5gau)
ve.fit1sph <- as.vgm.variomodel(mod1sph)
ve.fit2sph <- as.vgm.variomodel(mod2sph)
ve.fit3sph <- as.vgm.variomodel(mod3sph)
ve.fit4sph <- as.vgm.variomodel(mod4sph)
ve.fit5sph <- as.vgm.variomodel(mod5sph)
cvolsexp <- krige.cv(res ~ 1, datos5, ve.fit1exp, maxdist = 400)
cvwlsnpairsexp <- krige.cv(res ~ 1, datos5, ve.fit2exp, maxdist = 400)
cvwlsncressieexp <- krige.cv(res ~ 1, datos5, ve.fit3exp, maxdist = 400)
cvmlsexp <- krige.cv(res ~ 1, datos5, ve.fit4exp, maxdist = 400)
cvremlexp <- krige.cv(res ~ 1, datos5, ve.fit5exp, maxdist = 400)
cvolsgau <- krige.cv(res ~ 1, datos5, ve.fit1gau, maxdist = 400)
cvwlsnpairsgau <- krige.cv(res ~ 1, datos5, ve.fit2gau, maxdist = 400)
cvwlsncressiegau <- krige.cv(res ~ 1, datos5, ve.fit3gau, maxdist = 400)
cvmlgau <- krige.cv(res ~ 1, datos5, ve.fit4gau, maxdist = 400)
cvremlgau <- krige.cv(res ~ 1, datos5, ve.fit5gau, maxdist = 400)

```

```

cvolssph <- krige.cv(res ~ 1, datos5, ve.fit1sph, maxdist = 400)
cvwlsnpairssph <- krige.cv(res ~ 1, datos5, ve.fit2sph, maxdist = 400)
cvwlsncressiesph <- krige.cv(res ~ 1, datos5, ve.fit3sph, maxdist = 400)
cvmlsph <- krige.cv(res ~ 1, datos5, ve.fit4sph, maxdist = 400)
cvremlsph <- krige.cv(res ~ 1, datos5, ve.fit5sph, maxdist = 400)

sqrt((round(mean(cvolsexp$residual), 5) - 0)^2 + (round(mean(cvolsexp$zscore),5) - 0)^2 +
(round(var(cvolsexp$zscore), 5) - 1)^2)

sqrt((round(mean(cvwlsnpairsexp$residual), 5) - 0)^2 + (round(mean(cvwlsnpairsexp$zscore),5) -
0)^2 + (round(var(cvwlsnpairsexp$zscore), 5) - 1)^2)

sqrt((round(mean(cvwlsncressieexp$residual), 5) - 0)^2 +
(round(mean(cvwlsncressieexp$zscore),5) - 0)^2 + (round(var(cvwlsncressieexp$zscore), 5) - 1)^2)

sqrt((round(mean(cvmlsexp$residual), 5) - 0)^2 + (round(mean(cvmlsexp$zscore),5) - 0)^2 +
(round(var(cvmlsexp$zscore), 5) - 1)^2)

sqrt((round(mean(cvremlexp$residual), 5) - 0)^2 + (round(mean(cvremlexp$zscore),5) - 0)^2 +
(round(var(cvremlexp$zscore), 5) - 1)^2)

sqrt((round(mean(cvolsgau$residual), 5) - 0)^2 + (round(mean(cvolsgau$zscore),5) - 0)^2 +
(round(var(cvolsgau$zscore), 5) - 1)^2)

sqrt((round(mean(cvwlsnpairsgau$residual), 5) - 0)^2 + (round(mean(cvwlsnpairsgau$zscore),5) -
0)^2 + (round(var(cvwlsnpairsgau$zscore), 5) - 1)^2)

sqrt((round(mean(cvwlsncressiegau$residual), 5) - 0)^2 +
(round(mean(cvwlsncressiegau$zscore),5) - 0)^2 + (round(var(cvwlsncressiegau$zscore), 5) - 1)^2)

sqrt((round(mean(cvmlgau$residual), 5) - 0)^2 + (round(mean(cvmlgau$zscore),5) - 0)^2 +
(round(var(cvmlgau$zscore), 5) - 1)^2)

sqrt((round(mean(cvremlgau$residual), 5) - 0)^2 + (round(mean(cvremlgau$zscore),5) - 0)^2 +
(round(var(cvremlgau$zscore), 5) - 1)^2)

sqrt((round(mean(cvolssph$residual), 5) - 0)^2 + (round(mean(cvolssph$zscore),5) - 0)^2 +
(round(var(cvolssph$zscore), 5) - 1)^2)

sqrt((round(mean(cvwlsnpairssph$residual), 5) - 0)^2 + (round(mean(cvwlsnpairssph$zscore),5) -
0)^2 + (round(var(cvwlsnpairssph$zscore), 5) - 1)^2)

sqrt((round(mean(cvwlsncressiesph$residual), 5) - 0)^2 +
(round(mean(cvwlsncressiesph$zscore),5) - 0)^2 + (round(var(cvwlsncressiesph$zscore), 5) - 1)^2)

```

$\sqrt{(\text{round}(\text{mean}(\text{cvmlsph}\$\text{residual}), 5) - 0)^2 + (\text{round}(\text{mean}(\text{cvmlsph}\$\text{zscore}), 5) - 0)^2 + (\text{round}(\text{var}(\text{cvmlsph}\$\text{zscore}), 5) - 1)^2}$

$\sqrt{(\text{round}(\text{mean}(\text{cvremlsph}\$\text{residual}), 5) - 0)^2 + (\text{round}(\text{mean}(\text{cvremlsph}\$\text{zscore}), 5) - 0)^2 + (\text{round}(\text{var}(\text{cvremlsph}\$\text{zscore}), 5) - 1)^2}$

ve.fit1exp

ve.fit2exp

ve.fit3exp

ve.fit4exp

ve.fit5exp

ve.fit1gau

ve.fit2gau

ve.fit3gau

ve.fit4gau

ve.fit5gau

ve.fit1sph

ve.fit2sph

ve.fit3sph

ve.fit4sph

ve.fit5sph

### Anexo 8: Código componentes principales espaciales

```
require(ade4)
require(spdep)
require(e1071)
Pred <- read.table ("C: \\Users \\mbalzarini \\Desktop \\Libro \\Pred.txt", header = TRUE)
Pred
pca <- dudi.pca(Pred[,3:7], center=T,scannf = FALSE, nf = 5)
cord_2 <- coordinates(Pred[,1:2])
gri_2 <- dnearneigh(cord_2,0,25)
lw_2 <- nb2listw(gri_2, style = "W")
ms2 <- multispati(pca, lw_2, scannf = F, nfposi = 5)
add.scatter.eig().
s.arrow(ms2$c1,xax = 1, yax = 2, clabel = 1)
add.scatter.eig(ms2$eig, xax = 1, yax = 2, posi = "bottomleft", ratio = 0.2)
PredAM <- cbind(Pred,ms2$li)
```

## Anexo 9: Código cálculo de correlación espacial

```
setwd("C:\\.....") # SE SELECCIONA EL ESPACIO DE TRABAJO

dir()

require(XLConnect)

#####
#####

##### CORRELACION - REGION O DISTRITO CON ORDENES Y SUBORDENES DE SUELO CON
DENSIFICACION 150 HA

#####
#####

x11()

dat1 <- read.table("mXXXX_ORDEN_SUBORDEN.csv.csv", header=TRUE, sep=";", na.strings="NA",
dec=".", strip.white=TRUE)

summary(dat1)

names(dat1)

#Test de Moran - verificar correlación espacial

cord_1 <- coordinates(dat1[,2:3])

grid_1 <- dnearneigh(cord_1,0,24850)

lw_1 <- nb2listw(grid_1, style = "W")

i.moran <- moran.mc(dat1$MOD4_PRED, list=lw_1, nsim=999)

i.moran

fix(dat1)
```

## Anexo 10: Código hipercubo latino condicionado

```
setwd("C:\\.....") # SE SELECCIONA EL ESPACIO DE TRABAJO
dir()
library(clhs)
library(openxlsx)
require(XLConnect)
library(clhs)
library(openxlsx)
require(XLConnect)
require(car)
require(MASS)
require(akima)
require(gstat)
require(geoR)
require(lattice)
require(maptools)
require(rgdal)
require(ape)
require(vegan)
require(Rcmdr)
library(openxlsx)
require(spdep)
require(nortest)
require(ade4)
```

```
#####
#####
```

```
##### REGION O DISTRITO CON ORDENES Y SUBORDENES DE SUELO CON DENSIFICACION 150  
HA
```

```
#####  
#####
```

```
x11()
```

```
dat <- read.table("*****.csv", header=TRUE, sep=";", na.strings="NA", dec=".", strip.white=TRUE)  
# SE CARGA LA BASE DE DATOS
```

```
fix(dat)
```

```
str(dat)
```

```
names(dat)
```

```
#### VERIFICACION Y ASIGNACION DE TIPO DE VARIABLE (CLASS)
```

```
dat <- data.frame(apply(dat, 2, as.numeric))
```

```
dat$SUBORDEN_A <- factor(dat$SUBORDEN_A)
```

```
dat$ORDEN_AREA <- factor(dat$ORDEN_AREA)
```

```
dat$DISTRITO <- NULL
```

```
str(dat)
```

```
#### HIPERCUBO LATINO CONDICIONADO PARA SELECCION DE "XXXX" MUESTRAS
```

```
mXXXX <- clhs(dat, size = "XXXX", progress = FALSE, iter = 100000, simple = FALSE)
```

```
str(mXXXX)
```

```
plot(mXXXX)
```

```
##### SALIDA EN CSV CON LA UBICACION DE LOS PUNTOS DE DENSIFICACION
```

```
write.csv(mXXXX$sampled_data, file = "mXXXX_ORDEN_SUBORDEN.csv")
```



**Anexo 11: Formato de asistencia a reuniones y/o capacitaciones.**

No	NOMBRE	PROFESIÓN / LABOR	CELULAR	CORREO ELECTRÓNICO	FIRMA
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					

 <b>IGAC</b>	<b>REGISTRO DE ASISTENCIA GESTIÓN SOCIAL</b>		FECHA DE REALIZACIÓN	HOJA D E
	CAPACITACIÓN <input type="checkbox"/> *OTRO <input type="checkbox"/> EVENTO <input type="checkbox"/>		AAAA - MM - DD	
HOJA DE RUTA Y PROCEDIMIENTOS PARA LA ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS DE PÁRAMOS Y HUMEDALES DE COLOMBIA				
CIUDAD _____	SITIO _____	HORA DE INICIO _____	HORA DE FINALIZACIÓN _____	
NOMBRE DEL EVENTO/TEMA _____				
RESPONSABLE _____				
COORDINADOR / CONVOCANTE _____				



**Anexo 12: Formato de planeación comisión en campo.**

	<b>CRONOGRAMA COMISIÓN EN CAMPO</b>	FECHA										
	GESTIÓN AGROLÓGICA	AAAA - MM - DD										
NOMBRE DEL PROYECTO DE ESTIMACIÓN DE CONTENIDO DE COS: _____												
LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO: _____												
TIPO DE FASE: <input type="checkbox"/> MONITOREO <input type="checkbox"/> DENSIFICACIÓN        ECOSISTEMA: <input type="checkbox"/> PÁRAMOS <input type="checkbox"/> HUMEDALES												
_____ RESPONSABLE DEL PROYECTO		_____ COORDINADOR DEL PROYECTO										
<b>CRONOGRAMA PRELIMINAR PARA EL DESARROLLO DEL TRABAJO EN CAMPO</b>												
RECONOCEDOR	TIEMPO (mes o semanas)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Fase de monitoreo o densificación</b>	<b>Cantidad de cajuelas o perfiles a realizar</b>											
Reconocedor 1												
Reconocedor 2												
Reconocedor 3												
Reconocedor 4												
Reconocedor 5												
Reconocedor 6												
Reconocedor 7												

No de resolución de autorización de comisión de campo

**RIESGOS NATURALES Y ANTRÓPICOS**

POTENCIALES RIESGOS NATURALES Y/O ANTRÓPICOS	CAUSA O FUENTE	SOLUCIÓN O CONTROL REQUERIDO (PREVENTIVO Y REACTIVO)

ELABORÓ

\_\_\_\_\_

Nombre

\_\_\_\_\_

Firma

REVISÓ

\_\_\_\_\_

Nombre

\_\_\_\_\_

Firma

APROBÓ

\_\_\_\_\_

Nombre

\_\_\_\_\_

Firma


**Anexo 13: Formato programación gastos de la comisión de campo.**

	<p><b>PROGRAMACIÓN GASTOS DE LA COMISIÓN DE CAMPO</b></p> <p>HOJA DE RUTA Y PROCEDIMIENTOS PARA LA ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS DE PÁRAMOS Y HUMEDALES DE COLOMBIA</p>	<p>FECHA</p> <p>AAAA - MM - DD</p>			
<p>NOMBRE DEL PROYECTO DE ESTIMACIÓN DE CONTENIDO DE COS: _____</p>					
<p>LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO: _____</p>					
<p>TIPO DE FASE: <input type="checkbox"/> MONITOREO    <input type="checkbox"/> DENSIFICACIÓN    ECOSISTEMA: <input type="checkbox"/> PÁRAMOS    <input type="checkbox"/> HUMEDALES</p>					
<p>_____ RESPONSABLE DEL PROYECTO</p>		<p>_____ COORDINADOR DEL PROYECTO</p>			
<b>MEDIOS DE TRANSPORTE</b>					
VEHÍCULOS, BOTES U OTROS	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR DÍA	No. DE DÍAS	TOTAL
MULAS/ CABALLOS					\$ 0
BOTES/ CANOAS/ LANCHAS					\$ 0
CAMPEROS/ CAMIONETAS					\$ 0
OTROS					\$ 0
TOTAL VEHÍCULOS					\$ 0
<b>AUXILIARES DE CAMPO</b>					
ITEM	CANTIDAD	VALOR DÍA	No. DE DÍAS	TOTAL	
AUXILIARES DE CAMPO (OBSERVACIONES)				\$ 0	
AUXILIARES DE CAMPO (CALICATAS)				\$ 0	
				\$ 0	
				\$ 0	

				\$ 0
TOTAL AUXILIARES DE CAMPO				\$ 0
<b>ARRENDAMIENTOS</b>				
ITEM	CANTIDAD	VALOR DÍA	No. DE DÍAS	TOTAL
COMPUTADORES				\$ 0
OFICINAS				\$ 0
EQUIPO				\$ 0
				\$ 0
TOTAL ARRENDAMIENTOS				\$ 0
<b>PARQUEADEROS</b>				
ITEM	CANTIDAD	VALOR DÍA	No. DE DÍAS	TOTAL
				\$ 0
				\$ 0
				\$ 0
				\$ 0
TOTAL PARQUEADEROS				\$ 0
<b>VARIOS</b>				
ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	TOTAL
CAJAS DE ICOPOR PARA DENSIDADES				\$ 0
BOLSAS PLÁSTICAS 500 G				\$ 0
LONAS DE FIBRA				\$ 0
FLETES (HERRAMIENTAS)				\$ 0
PILAS - CÁMARA Y GPS				\$ 0
INTERNET				\$ 0
COMPRA Y REPARACIÓN DE HERRAMIENTAS				\$ 0

CABOS PARA PALAS				\$ 0
NIVEL ABNEY				\$ 0
				\$ 0
TOTAL VARIOS				\$ 0
<b>OTROS GASTOS</b>				
ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	TOTAL
COMISIONES BANCARIAS				\$ 0
FOTOCOPIAS				\$ 0
COMBUSTIBLES				\$ 0
PAPELERÍA				\$ 0
TRANSPORTE SEDES COMISIONES				\$ 0
SERVICIO DE TELÉFONO				\$ 0
				\$ 0
TOTAL OTROS GASTOS				\$ 0
<b>TOTAL PROGRAMADO</b>				<b>\$ 0</b>
ELABORÓ	REVISÓ	APROBÓ		
_____	_____	_____		
Nombre	Nombre	Nombre		
_____	_____	_____		
Firma	Firma	Firma		

**Anexo 14: Formato lista de chequeo de preparación de información en la etapa de precampo para los levantamientos de suelos.**

	<b>LISTA DE CHEQUEO DE INSUMOS REQUERIDOS PARA FASE DE CAMPO</b>																	FECHA		
	HOJA DE RUTA Y PROCEDIMIENTOS PARA LA ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS DE PÁRAMOS Y HUMEDALES DE COLOMBIA																	AAAA - MM - DD		
NOMBRE DEL PROYECTO DE ESTIMACIÓN DE CONTENIDO DE COS: _____																				
LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA: _____																				
TIPO DE FASE: <input type="checkbox"/> MONITOREO <input type="checkbox"/> DENSIFICACIÓN                          ECOSISTEMA: <input type="checkbox"/> PÁRAMOS <input type="checkbox"/> HUMEDALES																				
RESPONSABLE DEL PROYECTO										COORDINADOR DEL PROYECTO										
No.	INSUMOS	*PROFESIONAL 1			*PROFESIONAL 2			*PROFESIONAL 3			*PROFESIONAL 4			*PROFESIONAL 5			*PROFESIONAL 6			
		SI	NO	N.A	SI	NO	N.A	SI	NO	N.A	SI	NO	N.A	SI	NO	N.A	SI	NO	N.A	
<b>Documentación</b>																				
1	Pago ARL																			
2	Carné																			
3	Cartas de presentación																			
4	Formatos de campo																			
6	Etiquetas para muestras																			
<b>Equipo Técnico</b>																				
1	Planchas (cartografía base)																			
2	Fotografías Aéreas																			



3	Gps, brújula o equipo de georreferenciación																		
4	Barreno																		
5	Barreno de aleta																		
6	Palín																		
7	Tabla Munsell																		
8	Nivel Abney																		
9	Cilindros o ucla																		
10	Mazo de goma																		
11	Tablitas de madera																		
12	Pala																		
13	Machete																		
14	Tablet durabook																		
15	Cuchillo pedológico																		
16	Cinta Métrica																		
17	Cámara fotográfica																		
19	Bolsas plásticas para muestra de suelos																		
20	Sacos de fibra o lonas																		
21	Marcadores, lapiceros																		
22	Bisturí																		
23	Cinta pegante																		
24	Cajas de icopor																		
25	Vinipel																		
26	Cabuya																		

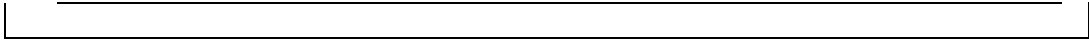
Imagen Institucional																		
1	Chaleco institucional																	
2	Camisa Institucional																	
3	Gorra Institucional																	
4	Logotipo para vehículo																	
Otros																		
1	Tienda de Campaña																	
2	Bloqueador Solar																	
3	Repelente																	
4	Botiquín primeros auxilios																	
5	Suero antiofidico																	
6	Impermeable																	
7	Botas de campo																	
* Este campo debe diligenciarse con el nombre de cada profesional perteneciente a cada grupo																		
_____						_____						_____						
NOMBRE DE QUIEN ELABORÓ						NOMBRE DE QUIEN REVISÓ						NOMBRE DE QUIEN APROBÓ						
_____						_____						_____						
FIRMA						FIRMA						FIRMA						

**Anexo 15: Formato control de calidad levantamiento de suelos**


	<b>CONTROL DE CALIDAD</b>	FECHA
		AAAA-MM-DD
HOJA DE RUTA Y PROCEDIMIENTOS PARA LA ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS DE PÁRAMOS Y HUMEDALES DE COLOMBIA		
<p>NOMBRE DEL PROYECTO DE ESTIMACIÓN DE CONTENIDO DE COS: _____</p> <p>LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO: _____</p>		
<p>TIPO DE FASE:                    MONITOREO    <input type="checkbox"/>    DENSIFICACIÓN    <input type="checkbox"/>                    ECOSISTEMA:    <input type="checkbox"/> PÁRAMOS                    <input type="checkbox"/> HUMEDALES</p>		
_____ RESPONSABLE DEL PROYECTO		_____ COORDINADOR DEL PROYECTO
<b>CONTROL DE CALIDAD DEL PROYECTO ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS DE PÁRAMOS Y HUMEDALES DE COLOMBIA</b>		
<p>1 Identifique la fase del estudio estimación del contenido de carbono orgánico en suelos de páramos y humedales de Colombia</p> <p style="text-align: center;">             FASE PRELIMINAR I (Precampo)    <input type="checkbox"/>                    FASE DE CAMPO II (Campo)    <input type="checkbox"/>                    FASE DE ANÁLISIS O FINAL III (Postcampo)    <input type="checkbox"/> </p>		
<p>2 Registre el criterio de selección para el desarrollo del control de calidad, en caso de determinar el desarrollo de otro criterio indicarlo como adicional:</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p>		
<p>3 Se encuentran todos los registros solicitados y diligenciados de forma clara, completa y sin tachones o enmendaduras</p> <p>SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> Cuál _____ Se verificó el registro después de corrección SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/></p> <p>Observaciones _____</p> <p>_____</p>		








**Anexo 17: Formato entrega de muestras para análisis.**

	<p><b>ENTREGA DE MUESTRAS PARA ANALISIS</b></p> <p>           QUÍMICA <input type="checkbox"/>                FÍSICA <input type="checkbox"/>                MINERALOGÍA <input type="checkbox"/>                BIOLOGÍA <input type="checkbox"/> </p> <p style="text-align: center;">GESTIÓN AGROLÓGICA</p>	<p>FECHA DE ENTREGA AAAA-MM-DD</p>	
<p>Exclusivo para muestra duplicado:</p> <p>Muestra Duplicado _____ Paquete Analítico _____</p>			
FECHA ACORDADA DE ENTREGA DE RESULTADOS AAAA-MM-DD	No. SOLICITUD / No. LABORATORIO	No. DE MUESTRAS	PAQUETE ANALÍTICO
OBSERVACIONES			
RESPONSABLE			
_____		_____	
Nombre		Firma	

**Anexo 18: Formato solicitud de análisis cliente externo.**

 <b>IGAC</b>	<b>SOLICITUD DE ANÁLISIS CLIENTE EXTERNO</b>		<b>FECHA DE SOLICITUD</b>
	GESTIÓN AGROLÓGICA		AAAA-MM-DD
<b>APRECIADO CLIENTE, DILIGENCIE ÚNICAMENTE LOS ESPACIOS EN NEGRILLA</b>			
<b>Nombre y Apellido/ Empresa/ Proyecto</b>		No. Solicitud	
_____		_____	
<b>Departamento / Municipio / Localización</b>			
_____			
<b>Número telefónico</b>	<b>Dirección correspondencia</b>	<b>Dirección electrónica</b>	
_____	_____	_____	
<b>Forma de entrega:</b>	<input type="checkbox"/> Fax	<input type="checkbox"/> Correo Electrónico	
	<input type="checkbox"/> Personal	<input type="checkbox"/> Correspondencia	
<b>TIPO DE MUESTRA</b>	Agua <input type="checkbox"/> Suelo <input type="checkbox"/> Hojarasca <input type="checkbox"/>	Compost <input type="checkbox"/> Material vivo <input type="checkbox"/> Otro <input type="checkbox"/>	Cuál? _____
<b>TIPO DE RIESGO:</b>	BIOLÓGICO <input type="checkbox"/>	QUÍMICO <input type="checkbox"/> OTRO <input type="checkbox"/>	NINGUNO <input type="checkbox"/>



#	INFORMACIÓN BÁSICA													
	Número de laboratorio	Identificación de la muestra	Profundidad (cm) si aplica	QUÍMICOS (TEJIDO VEGETAL Y AGUA PARA RIEGO)			* FÍSICOS E INGENIERÍA			MINERALÓGICOS Y MICROMORFOLÓGICOS			BIOLÓGICOS (SUSTRATOS, AGUA Y TEJIDO VEGETAL)	
1														
2														
3														
4														
5														
6														
7														
8														
9														
10														
11														

\*PARA ANALISIS F-01 ESPECIFICAR TENSIONES EN kPa APLICADAS. \*\* PARA ANÁLISIS F-12 Y F-13 NO INCLUYE COSTOS POR DESPLAZAMIENTO Y APLICA PARA LA SABANA DE BOGOTÁ.

**Nota:** Apreciado cliente para el tipo de análisis requerido especificar el código del análisis donde: Q: Químicos, P: Tejido vegetal, W: Agua para riego, F= Físicos, I: Ingeniería, M= Mineralogía, B= Biológicos; de la resolución de tarifas vigente

CONTINÚA AL RESPALDO

**SI LA SOLICITUD INCLUYE ANÁLISIS QUIMICOS Y/O BIOLÓGICOS DILIGENCIE**

Fertilizantes aplicados

---

Dosis

---

Enmiendas aplicadas

---

Dosis

---

Clima	Frío	<input type="checkbox"/>	Cultivo:	_____	Edad:	_____
	Medio	<input type="checkbox"/>				
	Cálido	<input type="checkbox"/>	Rendimiento	_____		

USO DEL SUELO    Forestal     Pecuario

                         Cultivo     Otro     Cuál? \_\_\_\_\_

USO DE FERTILIZANTES O ABONOS

SI  NO

**MODIFICACIÓN A LA SOLICITUD DE ANÁLISIS**

(sólo cuando se requiera)

Detalle

---

---

---

Solicitado por

---

Aprobado por

---

AAAA-MM-DD

Fecha

**OBSERVACIONES**

<b>INSPECCIÓN DE LA MUESTRA Y REVISIÓN DE LA SOLICITUD</b>						
		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="text-align: center;">AAAA-MM-DD</td></tr> <tr><td style="height: 20px;"></td></tr> </table>	AAAA-MM-DD		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="height: 40px;"></td></tr> </table> <p>N° Factura</p>	
AAAA-MM-DD						
Fecha de pago de Factura						
FIRMA INSPECCIONÓ QUÍMICA	FIRMA INSPECCIONÓ BIOLÓGÍA					
FIRMA INSPECCIONÓ FÍSICA E INGENIERÍA	FIRMA INSPECCIONÓ MINERALOGÍA					
		<p><b>Firma Cliente</b></p> <p>Acepto haber recibido información de las condiciones para el análisis, métodos a utilizar y la eliminación final de la(s) muestra(s).</p>				
PARA INICIAR ANÁLISIS (Coordinador de Laboratorio)		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="text-align: center;">AAAA-MM-DD</td></tr> <tr><td style="height: 20px;"></td></tr> </table>	AAAA-MM-DD			
AAAA-MM-DD						
Firma		Fecha de entrega al cliente				
No. Muestras _____		No. Laboratorio de _____ a _____				



APRECIADO CLIENTE: Le informamos que por su carácter transitorio, las muestras de agua y abono líquidos serán eliminadas posteriormente al envío de los resultados; las muestras de suelo para análisis físicos, químicos y mineralógicos serán eliminadas 6 meses después y para análisis biológicos 15 días después.

\* Determinación analítica acreditada ante IDEAM con Resolución No. 2509 del 17 de Noviembre de 2015

## Anexo 19. Ajuste de funciones de pedotransferencia para estimación de datos faltantes de densidad aparente para suelos de páramos y humedales de Colombia en el software R.

```

base <- read.csv("PERFILES_GENERAL_NUEVOS.csv", sep=",")
names(base)
#=====
#MODELO- PÁRAMOS
#=====
base <- subset(base,ECOSISTEMA=="PARAMOS")
dim(base)
library(moments)
descr <- function(columna){
  MAX <- max(columna,na.rm=T)
  MIN <- min(columna,na.rm=T)
  PROM <- mean(columna,na.rm=T)
  MED <- median(columna,na.rm=T)
  VAR <- var(columna,na.rm=T)
  DESVEST <- sd(columna,na.rm=T)
  CV <- DESVEST/PROM*100
  CURT <- kurtosis(columna)
  SKEW <- skewness(columna)
  return(data.frame(MAX, MIN, PROM,MED,VAR,DESVEST,CV, CURT, SKEW))
}
descr(base$DA_FINAL)
descr(base$A_B)
descr(base$L_B)
descr(base$Ar_B)
descr(base$CO)

#=====
#MODELO- PÁRAMOS- TEXTURA POR BOUYOUCOS
#=====

names(base)
dim(base)
bouy <- subset(base, DA_FINAL!="NA"&A_B!="NA")
allrows <- 1:nrow(bouy)
set.seed(3245)
cal1 <- sample(allrows, replace = F, size = 0.75*length(allrows))
val1 <- allrows[-cal1]
train <- bouy[cal1,]
train$DA_FINAL
test <- bouy[val1,]
hist(base$DA_FINAL, breaks=100, main="Densidad aparente")
descr(base$DA)
descr(base$A_b)
descr(base$L_b)
descr(base$Ar_b)
descr(base$CO)
hist(base$DA, breaks=100,main="Histograma densidad aparente")
par(mfrow=c(1,2))
plot(density(base$CO),main="CO")
plot(density(base$DA_FINAL),main="DA")
cor(base$DA_FINAL, base[14:16])

library(nortest)
library(MASS)

mod1 <- lm(DA_FINAL^4-A_B+CO, data=train)###Textura por byc

```

```

boxcox(mod1)
abline(v=0.42)
summary(mod1)
residuals(mod1)
shapiro.test(residuals(mod1))###Normalidad
lillie.test(residuals(mod1))###Normalidad
ad.test(residuals(mod1))###Normalidad
par(mfrow=c(2,2))
plot(mod1)
coef <- mod1$coefficients
coef
predict(mod1)###valores predichos
pred <- predict(mod1)###valores predichos
range(pred)
obs <- train$DA_FINAL #valores observados
cor(pred,obs)
A_B <- test$A_B
CO <- test$CO
func <- expression(3.90561277+0.03386514*A_B-0.43557932*CO)
eval(func)#####Predichos obtenidos con el modelo ajustado con el conjunto train utilizando los datos del conjunto test

library(hydroGOF)
cor(eval(func), test$DA_FINAL)
rmse(eval(func), test$DA_FINAL)
mae(eval(func), test$DA_FINAL)
me(eval(func), test$DA_FINAL)
mse(eval(func), test$DA_FINAL)

```

## Anexo 20. Ajuste de splines cúbicos para interpolación de densidad aparente y contenido de carbono orgánico en suelos de páramos y humedales a 30 cm en el software R.

```

library(GSIF)
library(aqp)
library(plyr)
library(sp)
library(readxl)

excel_sheets("BASE.xlsx")
base <- data.frame(read.csv("PERFILES_GENERAL_NUEVOS.csv"))
dim(base)
names(base)
prof1_paramo <- join(data.frame(base$ID,base$PERFIL, base$PROF_INI,
base$PROF_FIN,base$CO,base$DA_FINAL),data.frame(base$ID,base$W,base$N), type='inner')
## promote to SPC and plot
depths(prof1_paramo) <- base.PERFIL~ base.PROF_INI + base.PROF_FIN
## fit MP spline by profile
str(prof1_paramo)
try(SOC <- mpspline(prof1_paramo, 'base.CO', d = t(c(0,30))))
try(BLD <- mpspline(prof1_paramo, 'base.DA_FINAL', d = t(c(0,30))))
try(S_COS_FINAL <- mpspline(prof1_paramo, 'base.S_COS_FINAL1', d = t(c(0,30))))

dim(SOC)
str(prof1_paramo)
dat_subset <- data.frame(PERFIL =
prof1_paramo@site,CO=SOC$var.std[,1],DA=BLD$var.std[,1],S_COS_FIN1=S_COS_FINAL$var.std[,1])
head(dat_subset)

write.csv(data.frame(PERFIL =
prof1_paramo@site,CO=SOC$var.std[,1],DA=BLD$var.std[,1],S_COS_FIN1=S_COS_FINAL$var.std[,1]),
"HUMED.csv", row.names=F)

```



## Anexo 21. Homogenización y unión de covariables ambientales, y estructuración de matriz de regresión para el proceso de mapeo digital de carbono orgánico de suelos a 30 cm en páramos y humedales de Colombia en el software R.

```

=====
#PREPARACIÓN DE COVARIABLES AMBIENTALES
=====

#Crear una carpeta con las capas raster dentro

COV <- stack('COV.tif')##Esto solo puede hacerse con aquellas covariables que por defecto tengan el mismo extent y la
misma resolución
namesCovariables <- names(COV) #Creando objeto tipo rasterStack
saveRDS(namesCovariables, file= 'namesCovariables.rds') #Creando el archivo con el nombre de las covariables
#En caso de contar con capas raster con diferente resolución y extensión, debe seguirse el proceso enunciado a
continuación
#Homogenizando covariables
Orden <-
readOGR(dsn="C:\\Users\\joan.gutierrez\\Documents\\INSUMOS_GEOMÁTICA\\DUMMY_SUELOS_PARAMOS\\A
QUANDS\\DUMMI_AQUANDS.shp") #Leyendo capa raster de interés
Orden_geog <- spTransform (Orden, CRS=projection(COV)) #Homogenizando sistema de proyección
Orden_geog_rasterized <- rasterize(Orden_geog, COV, 'ORDEN') #Rasterizando, en caso de ser necesario
Orden_geog_rasterized <- resample(Orden_geog_rasterized,COV,method="ngb") #Homogenizando resolución espacial
names(Orden_geog_rasterized) <- 'Orden'
COV <- stack(COV, Orden_geog_rasterized)#Uniendo la capa raster de interés al archivo tipo rasterStack creado
anteriormente
names(COV)

#Para juntar covariables con los datos. Extracción por puntos

dat_subset <- read.csv2("D:/PARAMOS_VF/ALL_DATA_VF.csv",sep=";",dec=",")#Este archivo plano contiene la
ubicación geográfica de cada perfil y su correspondiente dato de COS a 30 cm.
#Convertir a objeto tipo spatialpointsdataframe
dat_subset_sp <- dat_subset
coordinates(dat_subset_sp) <- ~ W + N
proy <- CRS("+proj=longlat +datum=WGS84")
dat_subset_sp@proj4string <- proy
#dat_subset_sp <- spTransform(dat_subset_sp, CRS("+init=epsg:32618")) #Necesario en caso de trabajar con
coordenadas proyectadas
#COV <- projectRaster(COV, crs = CRS("+init=epsg:32618"), method='ngb') #Necesario en caso de trabajar con
coordenadas proyectadas
dat_subset_sp@proj4string <- COV@crs
dat_subset <- cbind(dat_subset, extract(COV, dat_subset_sp))#Es este paso se hace la extracción por puntos de los datos
de las covariables ambientales
write.csv(dat_subset, 'RegMatrix_VF_Antes.csv') #Guardando primer versión de la tabla resultante
#Se eliminan columnas que tengan muchos datos faltantes
dat_subset$Aquents <- NULL
dat_subset_2 <- dat_subset[complete.cases(dat_subset),]
write.csv(dat_subset_2, 'RegMatrix_VF.csv')#Guardando versión de matriz de regresión sin datos faltantes

```

## Anexo 22. Proceso de ajuste de modelo predictivo espacial de COS en páramos y humedales de Colombia, mediante regression kriging en el software R.

```
## Establecemos el directorio de trabajo
setwd("E:/MODELOS_VF")
# Cargar librerías requeridas
library(sp)
library(raster)
library(car)
library(rgdal)
library(gstat)
library(lattice)
library(ggplot2)
library(caret)
library(reshape)
library(aplpack)
library(tcltk)
library(MASS)
library(akima)
library(geoR)
library(maptools)

#Cargando la matriz de regresión
dat <- read.csv("E:/MODELOS_VF/RegMatrix_VF.csv")
names(dat)
dim(dat)

#Gráficos- estadística descriptiva
par(mfrow=c(1,3))
hist(dat$COS30CM, prob=T,main="COS 30 cm", xlab="Stock COS (t.ha^-1)",col="lightblue",breaks=100,
ylab="Densidad")
lines(density(dat$COS30CM))
rug(dat$COS30CM,col="blue")
grid(10,10)
curve(dnorm(x,mean=mean(dat$COS30CM),sd=sd(dat$COS30CM)), col="darkblue",lwd=2,add=T,yaxt="n")
text(400,0.004,bquote(" "*bar(x)* " "*.(round(mean(dat$COS30CM),2))*"))
plot(ecdf(dat$COS30CM),ylab="Frecuencia",xlab="Stock COS (t.ha^-1)",main="COS 30 cm")
boxplot(dat$COS30CM,col="lightblue",main="COS 30 cm",ylab="Stock COS (t.ha^-1)")
points(mean(dat$COS30CM),col="red",pch=16)

# # Transform data
par(mfrow=c(1,3))
hist(log(dat$COS30CM), prob=T,main="COS 30 cm", xlab="Stock COS (t.ha^-1)",col="lightblue",breaks=100,
ylab="Densidad")
lines(density(log(dat$COS30CM)))
rug(log(dat$COS30CM),col="blue")
grid(10,10)
curve(dnorm(x,mean=mean(log(dat$COS30CM)),sd=sd(log(dat$COS30CM))), col="darkblue",lwd=2,add=T,yaxt="n")
text(2,0.5,bquote(" "*bar(x)* " "*.(round(mean(log(dat$COS30CM),2))*"))
plot(ecdf(log(dat$COS30CM)),ylab="Frecuencia",xlab="Stock COS (t.ha^-1)",main="COS 30 cm")
boxplot(log(dat$COS30CM),col="lightblue",main="COS 30 cm",ylab="Stock COS (t.ha^-1)")
points(mean(log(dat$COS30CM)),col="red",pch=16)

## Recreamos el objeto con la ubicacion de los puntos
dat_sp <- dat
coordinates(dat_sp) <- ~ W + N

## Ajustamos un modelo de regresión lineal multiple
### Análisis de correlación
```

```

names(dat_sp@data)
str(dat_sp)
COR <- cor(as.matrix(log(dat_sp@data[,4])), as.matrix(dat_sp@data[,c(5:7,14:15,18:20,38:65,83)]))
COR
x <- subset(melt(COR), value != 1 | value != NA)
x <- x[with(x, order(-abs(x$value))),]
#as.character(x$X2[1:10])
x[1:9,]
idx <- as.character(x$X2[1:9])

#Ajustando modelo
modelo.MLR <- lm(COS30CM ~ . -N-W, data = dat2)
summary(modelo.MLR)
anova(modelo.MLR)

##Seleccionando variables explicativas "setpwise"
modelo.MLR.step <- step(modelo.MLR, direction="both")
summary(modelo.MLR.step)
anova(modelo.MLR.step)

#Gráficos diagnósticos del modelo ajustado
par(mfrow=c(2,2))
plot(modelo.MLR.step)

#Multicolinealidad mediante factor de inflación de la varianza (VIF)
library(car)
vif(modelo.MLR.step)
sqrt(vif(modelo.MLR.step))
modelo.MLR.step <- update(modelo.MLR.step, . ~ . - tx1mod3a )
sqrt(vif(modelo.MLR.step))
modelo.MLR.step <- update(modelo.MLR.step, . ~ . - twisre3a )
sqrt(vif(modelo.MLR.step))

#Detección de atípicos con la prueba de Bonferroni
outlierTest(modelo.MLR.step)
summary(modelo.MLR.step)

#Importando rasterStack de covariables ambientales
COV<- stack('E:/MODELOS_VF/COV.tif')
namesCov<- readRDS("E:/MODELOS_VF/namesCovariables.rds")
names(COV)
names(COV) <- namesCov
names(COV)
COV<- COV[[idx]]
COV
dat2_sp <- dat_sp
coordinates(dat2_sp) <- ~ W + N
dat2_sp@proj4string <- COV@crs
dat2_sp <- spTransform(dat2_sp, CRS("+init=epsg:32618"))

# Proyectando covariables de WGS84 a UTM zona 18N Colombia
COV <- projectRaster(COV, crs = CRS("+init=epsg:32618"), method='ngb')
COV.sp <- as(COV, "SpatialGridDataFrame")

#Detectando datos duplicados
zerodist(dat_sp)

#Modelo Regression Kriging
library(automap)

```

```

dat_sp <- dat_sp[dat_sp$COS30CM != 0,]
OCS.krige <- autoKrige(formula = as.formula(modelo.MLR.step$call$formula),
  input_data = dat2_sp,
  new_data = COV.sp,
  verbose = TRUE,
  block = c(1000, 1000))
RKprediction <- exp(raster(OCS.krige$krige_output[1]))
RKpredsd <- exp(raster(OCS.krige$krige_output[3]))
summary(RKprediction)
summary(RKpredsd)
print(Sys.time() - start)
summary(RKprediction)
summary(RKpredsd)
plot(RKprediction)
plot(RKpredsd)
#Exportando resultados
writeRaster(RKprediction, filename = "RK_PRED_COS.tif")
writeRaster(RKpredsd, filename = "RK_PREDSD_COS.tif")

#Validación del modelo
dat_sp = dat_sp[which(!duplicated(dat_sp@coords)), ]
OCS.krige.cv <- autoKrige.cv(formula = as.formula(modelo.MLR.step$call$formula),
  input_data = dat2_sp, nfold = 5)
summary(OCS.krige.cv)

```

## Anexo 23. Proceso de ajuste de modelo predictivo espacial de COS en páramos y humedales de Colombia, mediante random forest en el software R.

```
## Establecemos el directorio de trabajo
setwd("E:/MODELOS_VF")
# Cargar librerías requeridas
library(caret)
library(bindr)
library(raster)
library(randomForest)
library(quantregForest)
library(dplyr)
library(plyr)
library(reshape2)
library(Metrics)

COV <- stack("COV.tif")
namesCovariables <- readRDS(namesCovariables_VF.rds)
names(COV) <- namesCovariables
names(COV)

dat <- read.csv("RegMatrix_VF.csv")
names(dat)
dim(dat)
plot(density(dat$COS30CM), main='Distribución COS 30 cm- Valores originales')
plot(density(dat$COS30CMlog), main='Distribución COS 30 cm- Valores transformados')
names(dat)
#Matriz de correlación
d_cor <- as.matrix(cor(dat[,c(6:9,16:17,20:22,40:67,85:86)]))
d_cor_melt <- arrange(melt(d_cor), -abs(value))
d_cor_melt[d_cor_melt$Var2=="COS30CM",]
d_cor_melt[d_cor_melt$Var2=="COS30CMlog",]
names(dat)
write.csv(data.frame(d_cor_melt[d_cor_melt$Var2=="COS30CM",],d_cor_melt[d_cor_melt$Var2=="COS30CMlog",]),"C
OR_MAT_RF.csv")
names(COV)
paste0(names(COV)[[c(1,8,24,37:38,46,79,50:53,76,77,78)]],collapse="+")

fm <- as.formula(paste("COS30CMlog ~", paste0(names(COV)[[c(1,8,24,37:38,46,79,50:53,76,77,78)]],collapse="+")))
fm
set.seed(123)
smp_size <- floor(0.75 * nrow(dat))
names(dat)
dat <- dat[-c(1:6)]
#Segmentación aleatoria de la base de datos para entrenamiento y validación del modelo mediante el algoritmo random
forest
train_ind <- sample(seq_len(nrow(dat)), size = smp_size)
train <- dat[train_ind, ]
test <- dat[-train_ind, ]
train$COS30CMlog
plot(density (train$COS30CMlog), col='red', main='Statistical distribution of train and test datasets')
lines(density (test$COS30CMlog), col='blue')
legend('topleft', legend=c("train", "test"),
      col=c("red", "blue"), lty=1, cex=1.5)
#Validación cruzada
ctrl <- trainControl(method = "cv", savePred=T)
#Selección del número de árboles
names(train)
mod <- train(fm, data=train, method = "rf", trControl = ctrl, importance=TRUE)
```

```

varImpPlot(mod[11][[1]], main='model decreasing error and node purity')
plot(mod[11][[1]], main='select ntree')
pred <- predict(COV, mod)
plot(pred, 'prediction of log transformed values')
test$pred <- predict(mod[11][[1]], test)
print(rmse(test$COS30CMlog, test$pred))
print(cor(test$COS30CMlog, test$pred)^2)
plot(test$COS30CMlog, test$pred, main='validation plot')
abline(lm(test$pred~test$COS30CMlog), col='black', xlab='observed', ylab='modeled')
validation <- data.frame(rmse=numeric(), r2=numeric())
for (i in 1:10){
  #Construcción de modelos mediante 10 iteraciones usando 25% de las muestras
  smp_size <- floor(0.25 * nrow(dat))
  train_ind <- sample(seq_len(nrow(dat)), size = smp_size)
  train <- dat[train_ind, ]
  test <- dat[-train_ind, ]
  #Validación cruzada para revarsar predicción de cada modelos
  modn <- train(fm, data=train, method = "rf", trControl = ctrl)
  pred <- stack(pred, predict(COV, modn))
  test$pred <- predict(modn[11][[1]], test)
  validation[i, 1] <- rmse(test$COS30CMlog, test$pred)
  validation[i, 2] <- cor(test$COS30CMlog, test$pred)^2
  #Graficar la línea de regresión de cada modelo
  abline(lm(test$pred~test$COS30CMlog), col='gray')
  print(i)
}
sensitivity <- calc(pred[[-1]], sd)
summary(validation)
#Mapa de predicción con el 75% de los datos
prediction75 <- exp(pred[[1]])
plot(prediction75, main='OCSKGM prediction based on 75% of data', col=rev(topo.colors(10)))
plot(sensitivity, main='Sensitivity based on 10 realizations using 25% random samples', col=rev(topo.colors(10)))

#Uso de random forest por cuantiles para predicción, las variables
#que se incluyen en el argumento "x" de la función quantregForest deben corresponder a las variables especificadas en
#el objeto creado anteriormente llamado "fm" --> formula
names(dat)
model <- quantregForest(y=dat$COS30CMlog, x=dat[,c(1,8,24,37,38,46,79,50,51,52,53,76,77,78)], ntree=500,
keep.inbag=TRUE)
str(model)
#para ejecutar en paralelo varios procesos
beginCluster(3,type="SOCK")
#Incertidumbre del modelo
unc <- clusterR(COV, predict, args=list(model=model,what=sd))
#Predicción a partir de la totalidad de los datos
mean <- clusterR(COV, predict, args=list(model=model,what=mean))
#Incertidumbre total del modelo
unc <- unc + sensitivity
#Incertidumbre en porcentaje
Total_unc_Percent <- exp(unc)/exp(mean)
#Visualización de mapas de predicción e incertidumbre
plot(exp(mean),, main='OCSKGM based in all data', col=rev(topo.colors(10)))
plot(Total_unc_Percent, col=rev(heat.colors(100)), zlim=c(0, 5), main='Total uncertainty')
endCluster()
getwd()

```

## Anexo 24. Proceso de validación del modelo predictivo espacial de COS en páramos y humedales de Colombia, mediante cálculo de medidas de incertidumbre asociadas a la estimación en el software R.

```
#setwd("E/MODELOS_VF")
library(sp)
library(raster)
library(GSIF)
library(aqp)
library(plyr)
library(rgdal)
library(gstat)
library(pillar)
#rm(list=ls())

#Carga del mapa del modelo de interés
MOD1 <- raster('MOD1_RK_PRED_LOGCOS30_07042018_PROY.tif')
MOD1

#Importación de la matriz de regresión donde están los valores observados que se compararán con los valores predichos o simulados
dat_subset <- read.csv("RegMatrix_VF.csv")
dat_subset_sp <- dat_subset
coordinates(dat_subset_sp) <- ~ W + N
proy <- CRS("+proj=longlat +datum=WGS84")
dat_subset_sp@proj4string <- proy
MOD1@crs <- proy
MOD1@crs <- dat_subset_sp@proj4string
coordinates(MOD1)
coordinates(dat_subset_sp)
#dat_subset_sp <- spTransform(dat_subset_sp, CRS("+init=epsg:32618"))
#MOD1 <- projectRaster(MOD1, crs = CRS("+init=epsg:32618"), method='ngb')
#Extracción por puntos de los datos simulados
dat_subset <- cbind(dat_subset, extract(MOD1, dat_subset_sp))
summary(dat_subset)
#Cálculo de medidas de error de la predicción
library(hydroGOF)
res <- dat_subset$MOD_1 - dat_subset$COS30CM
rbind(cor(dat_subset$MOD_1, dat_subset$COS30CM, use="complete.obs"),
me(dat_subset$MOD_1, dat_subset$COS30CM),
mae(dat_subset$MOD_1, dat_subset$COS30CM),
mse(dat_subset$MOD_1, dat_subset$COS30CM),
rmse(dat_subset$MOD_1, dat_subset$COS30CM),
(rmse(dat_subset$MOD_1, dat_subset$COS30CM))/sd(dat_subset$COS30CM),
nrmse(dat_subset$MOD_1, dat_subset$COS30CM),
sqrt((sum(res^2, na.rm=T) / length(res)) - mean(res, na.rm=T)^2),
IQR(res, na.rm=T)
```

**Anexo 25: Tabla de metadatos con las principales secciones.**

CUADRO COMPARATIVO DE LA CONFORMIDAD DE LA PLANTILLA PARA INFORMACIÓN DE METADATOS GEOGRÁFICOS A LA NORMA NTC-4611			METADATO	DATOS EJEMPLO
Numeración de acuerdo a la Norma Técnica Colombiana NTC-4611			METADATO	DATOS EJEMPLO
8.11. Identificador único del conjunto de datos			Identificador de archivo	
No Aplica			Lenguaje (idioma) del metadato	
7.4. Nombre del estándar y versión del metadato			Nombre del estándar del metadato	
			Versión del estándar de metadato	
No Aplica			Código de carácter utilizado para metadato	
1. Identificación (información básica acerca del conjunto de datos)			DATOS DE IDENTIFICACIÓN	
1.1. Citación - 1.1.1. información de la citación			INFORMACIÓN DE LA CITACIÓN	
8. Citación			CITACIÓN	
8.3. Título			Título del recurso (curvas de nivel)	
8.4. Título alternativo			Título alternativo	
8.2. Fecha			Fecha de referencia	
8.1. Responsable			RESPONSABLE	
8.1.1. Nombre del responsable - 9.1. Organización			Nombre de la organización	
8.1.2. Tipo de responsable			Rol	
1.8. Punto de Contacto - 9. Contacto			CONTACTO	
9.2. Cargo/Persona			Nombre del responsable	
9.3.1. Dirección			Dirección	
9.3.2. Ciudad			Ciudad	
9.3.3. Departamento			Área administrativa	
No Aplica			Código Postal	
9.3.4. País			País	
9.3.5. Teléfono			Teléfono	
9.3.6. Fax			Fax	
9.3.7. Email			Email	-
8.1. Responsable			RESPONSABLE	
8.1.1. Nombre del responsable - 9.1. Organización			Nombre de la organización	
8.1.2. Tipo de responsable			Rol	
1.8. Punto de Contacto - 9. Contacto			CONTACTO	
9.2. Cargo/Persona			Nombre del responsable	



			Contacto	9.3.1. Dirección	Dirección	
				9.3.2. Ciudad	Ciudad	
				9.3.3. Departamento	Área administrativa	
				No Aplica	Código Postal	
				9.3.4. País	País	
				9.3.5. Teléfono	Teléfono	
				9.3.6. Fax	Fax	
				9.3.7. Email	Email	
1.2.1. Resumen		Resumen				
1.2.2. Propósito		Propósito (Resumen de los motivos por los cuales se desarrolló las curvas de nivel)				
1.2.3. Uso / información Complementaria		Uso (información básica sobre las aplicaciones específicas de las curvas de nivel)				
		Datos relacionados (información complementaria acerca de las curvas de nivel)				
1.10. Créditos		Créditos (Reconocimiento a todo aquel que contribuye al desarrollo de la curvas de nivel)				
1.5.4. Nivel de resolución		Escala de los datos				
No Aplica		Lenguaje de los datos				
1.5.1. Extensión Geográfica		Descripción Geográfica				
1.11. Ambiente de desarrollo / 2.1.6. Historia - 2.1.6.2. Procesos		Procesos de generación (información sobre las fuentes de datos que contribuyeron para obtener la curvas de nivel, identificando: información aportada, escala y/o resolución, fecha de los datos y una descripción de la secuencia de procesos aplicada a dicha información.				
1.4. Estado - 1.4.1. Avance		Estado (Avance)				
3. Representación Espacial de los datos		Tipo de representación espacial				
No Aplica		Código de carácter de los datos				
1.5. Dominio Espacial		EXTENSIÓN DE LOS DATOS				

	1.5.1. Extensión geográfica - 1.6. Descriptores / 1.6.2. Lugar / 1.6.2.2. Descriptor de Lugar	Descripción de la extensión de los datos	
	1.5. Dominio Espacial	ELEMENTO GEOGRÁFICO	
	1.5.2. Coordenadas geográficas limites	COORDENADAS GEOGRÁFICAS LIMITES	
	1.5.2.1. Oeste	Coordenada Oeste	
	1.5.2.2. Este	Coordenada Este	
	1.5.2.3. Norte	Coordenada Norte	
	1.5.2.4. Sur	Coordenada Sur	
	1.3. Periodo de tiempo	EXTENSIÓN TEMPORAL	
	1.3.1. Fecha inicio	Fecha inicio	
	1.3.2. Fecha final	Fecha final	
	4.2. Sistema de coordenadas verticales	ELEMENTO VERTICAL	
		VALORES DEL EJE VERTICAL	
	No Aplica	Mínimo	
	No Aplica	Máximo	
	4.2.2. resolución y unidades de distancia de altitudes	Unidad de medida	
	6. Distribución	DISTRIBUCIÓN DE LA INFORMACIÓN	
	1.7. Restricciones	Derechos de autor	
	6.5. Proceso personalizado de pedido	Servicio de soporte	
	6.4.3. Precio	Precio de lista	
	4.1.2.4.2. Unidades de distancia planas	Unidades de distancia	
	6.4.2.2.2.1. Medio digital / Ubicación	Medio de entrega de datos	
	6.4.2.2.2.3. Formato de grabación	Formatos	
	6.4.2.2.1. Opción en línea	Acceso en línea	
	6.4.4. Instrucciones de pedido	Orden	
	1.7. Restricciones	Restricciones	
	2. Calidad de los datos	CALIDAD DE DATOS	
	2.1.6.1. Fuentes de información	Fuente (información sobre las fuentes de datos que contribuyeron para obtener la curvas de nivel)	

2.1.4. Informe de exactitud de posición	INFORME DE EXACTITUD POSICIONAL	
	Descripción	
	Unidad	
	Valor	
	Fecha	
2.1.1. Informe de exactitud temática	INFORME DE EXACTITUD TEMÁTICA	
	Descripción (De la exactitud de la clasificación de los objetos y/o atributos con respecto a las verdaderas características presentadas en el terreno)	
	Unidad	
	Valor	
	Fecha	
2.1.5. Informe de exactitud temporal	INFORME DE EXACTITUD TEMPORAL	
	Descripción (Del grado de realidad en la escala del tiempo de los elementos existentes en la curvas de nivel y sus relaciones temporales con respecto a las especificaciones del producto)	
	Unidad	
	Valor	
	Fecha	
2.1.2. Informe de consistencia lógica	INFORME DE CONSISTENCIA LÓGICA	
	Descripción	
	Unidad	
	Valor	
	Fecha	
2.1.3. Informe de totalidad	INFORME DE TOTALIDAD	
	Descripción (información sobre contenido (datos omitidos o en exceso respecto a las especificaciones del producto) y cubrimiento (porcentaje de la extensión geográfica que está realmente cubierta por la curvas de nivel))	
	Unidad	
	Valor	
	Fecha	
7. Referencia del metadato	MANTENIMIENTO DE LA INFORMACIÓN	
7.1. Fecha de creación del metadato	Fecha de creación del metadato	
7.2. Fecha de revisión del metadato	Fecha de la última actualización	

			Fecha de la próxima actualización	
		1.4. Estado - 1.4.2. Mantenimiento y actualización	Nota de mantenimiento	
			Frecuencia de actualización	
		3. Representación espacial de los datos	REPRESENTACIÓN ESPACIAL DE LA INFORMACIÓN	
		3.2. Representación raster	REPRESENTACIÓN RASTER	
		3.2.2. Numero de filas - 3.3.3. Numero de columnas	Numero de dimensiones	
		3.2.1. Tipo de objeto	Geometría de la celda	
		3.2.4. Parámetros de representación raster	Parámetros de representación	
		3.1. Representación vectorial	REPRESENTACIÓN VECTOR	
		3.1.2. Numero de objetos	Numero de objetos geométricos	
		3.1.1. Tipo de objeto	Código del nivel superior de representación	
		5. Entidades y atributos	DESCRIPCIÓN DE LA GEOMETRÍA	
		5.2.1. Tipo de entidad	OBJETO GEOMÉTRICO	
		5.2.1.1. Nombre de la entidad	Nombre	
		5.2.1.2. definición y fuente de la entidad	Descripción	
			Código	
		No Aplica	Categoría	
		1.5.4. Nivel de resolución	Escala	
		No Aplica	Ocurrencias	
		1.5.4. Nivel de resolución	Resolución	
		4.1.2.4.2. Unidades de distancia planas	Unidades de medida	
		2.1.4. Informe de exactitud de posición	Exactitud posicional	
		2.1.1. Informe de exactitud temática	Exactitud temática	
		2.1.3. Informe de totalidad	Totalidad	
		3.1.1. Tipo de objeto	Tipo de primitiva geométrica	
		5.2.2. Atributo	ATRIBUTOS DEL OBJETO GEOMÉTRICO	
		5.2.2.1. Nombre del atributo	Nombre	
		5.2.2.2. definición y fuente del atributo	Descripción	
			Código	
		2.1.5. Informe de exactitud temporal	Exactitud temporal	
		2.1.1. Informe de exactitud temática	Exactitud temática	

				5.2.2.3. Dominio del atributo	Dominio	
4. Referencia espacial					SISTEMA DE REFERENCIA DE LA INFORMACIÓN	
					Tipo de sistema de referencia	
4.1.4. Modelo geodésico					SISTEMA DE REFERENCIA DIRECTO	
4.1.4.1. Nombre de datum horizontal					Datum	
4.1.4.2. Nombre del elipsoide					Elipsoide	
4.1.2.1. Proyección cartográfica					Proyección	
4.1. Sistema de coordenadas horizontales					Sistema de coordenadas	
No Aplica					SISTEMA DE REFERENCIA INDIRECTO	
No Aplica					Descripción	

**CONVENCIONES**



Numeración de acuerdo a la estructura del programa GIS XML Metadata Viewer & Editor



Numeración de acuerdo a la Norma Técnica Colombiana NTC-4611



Elemento Obligatorio



Elemento Condicional



Elemento Opcional



No Aplica a la norma