16 MAPAS FISICOS

SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE
Radicación: 2019ER168250
AL RESPONDER CITE ESTE NUMERO
Fecha: 2019-07-24 11:23:1
Proceso: 4517922
Folios: 124 Anexos: NO Si 1 USB
Asunto: INFORME DEL PROYECTO CON RESULTA
Destino: DIRECCION DE GESTION AMBIENTAL
Origen: JOSE GABRIEL ALMANZA ROJAS
Tipo: Oficio Recibido

GEOTEM S.A.S.

Bogotá, julio 24 de 2019

ADRIANA LUCIA SANTA MÉNDEZ
Dirección de Gestión Ambiental
Secretaría Distrital de Ambiente
E.S.D.

Asunto: Entrega del Producto 2: Informe del proyecto con resultados, análisis, conclusiones y recomendaciones técnicas y cartografía final, en formato físico y digital, que incluye Geodatabase con la información generada en el proyecto (alfanumérica, vectorial, ráster), memoria explicativa y metadato IDECA. Contrato SDA-CM-2018-SECOP II-E-0055.

Cordial saludo Dra Adriana,

Mediante la presente hacemos entrega del Producto 2 relacionado en el asunto, en versión final, ajustado según la revisión de la supervisión del contrato. Se entrega informe en medio físico, conformado por 123 folios (papel carta) y 17 anexos (papel doble carta), y en medio magnético en una USB que contiene el mismo documento en formato digital, así como los respectivos anexos, tal como se citan en el informe, también se incluye la Geodatabase con la información generada en el proyecto (alfanumérica, vectorial, ráster), memoria explicativa y metadato IDECA,

Con lo cual se da cumplimiento a los compromisos del Contrato SDA-CM-2018-SECOP II-E-0055.

Sin otro particular,

SANDRA PILAR CORTÉS SÁNCHEZ
COORDINACIÓN BIÓTICA
GEOTEM S.A.S.

CALLE 22C # 29 A – 47, Torre 2 Of. 1403
TELEFONO 7 265370
MOVIL: 3107650594
geotemsas@gmx.es
BOGOTÁ-COLOMBIA

PRODUCTO 2

CONTRATO SDA-CM-2018-SECOP II- E-0055

ELABORAR EL MAPA DE LA INVASIÓN DEL RETAMO ESPINOSO EN EL ÁREA URBANA DE BOGOTÁ D.C.

GEOTEM S.A.S.

Versión final

EQUIPO DE TRABAJO

PROFESIONAL	CARGO	FIRMA
JUAN CARLOS PARRA GARZÓN INGENIERO CATASTRAL Y GEODESTA – ESPECIALISTA EN SIG M.P. 2522260460 CND.	PROFESIONAL 1 ESPECIALISTA EN SIG	
SANDRA VARÓN GUTIÉRREZ INGENIERA FORESTAL– ESPECIALISTA EN SIG M.P. 11926 MINAGRICULTURA	PROFESIONAL 1 ESPECIALISTA EN SIG	
SANDRA PILAR CORTÉS SÁNCHEZ BIÓLOGA M.P. 52171630 CPB.	PROFESIONAL 2 BIÓLOGA	

PRODUCTO 2

Informe final del procesamiento digital de imágenes satelitales para la elaboración del Mapa de retamo espinoso (*Ulex europaeus*) en el área urbana de Bogotá D.C.



CONTRATO SDA-CM-2018-SECOP II- E-0055

ELABORAR EL MAPA DE LA INVASIÓN DEL RETAMO ESPINOSO EN EL ÁREA URBANA DE BOGOTÁ D.C.

GEOTEM S.A.S.

Bogotá, julio 23 de 2019

Tabla de contenido

1 INTRODUCCIÓN....10
2 ALCANCE....11
3 OBJETIVOS....11
3.1 Objetivo general....11
3.2 Objetivos específicos....11
4 ANTECEDENTES....12
5 METODOLOGÍA....14
5.1 Definición del área de estudio....15
5.2 Búsqueda y adquisición de imágenes de satélite del área de estudio....15
5.3 Búsqueda, organización y espacialización de la información secundaria documental....23
5.4 Levantamiento de información primaria y puntos de control....28
5.5 Pre-procesamiento de imágenes satelitales....35
5.5.1 Pre-procesamiento de Imágenes gratuitas....35
5.5.2 Pre-procesamiento de Imagen PLANET SCOPE, 2019....40
5.5.3 Resultados y conclusiones de la inspección de imágenes gratuitas y de la imagen PLANET SCOPE....43
6 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DE SATÉLITE PARA IDENTIFICAR A LA ESPECIE INVASORA....45
6.1 Identificación de la especie invasora....45
6.1.1 Características de la especie *Ulex europaeus* (retamo espinoso)....45
6.1.2 Fichas de resumen de las principales características de la especie *Ulex europaeus* (retamo espinoso) definidas en campo para fines de su identificación en la imagen satelital....49
6.1.3 Identificación del Área Potencial de Retamo (APR) con imagen Planet Scope 2019. 56
6.1.4 Identificación de composición de las bandas espectrales en las cuales se identifica el retamo espinoso con imagen PLANET SCOPE 2019 y sinergismo....60
6.1.5 Definición de firmas espectrales de Retamo con imagen Planet Scope 2019. 62
6.2 Identificación de la especie invasora por interpretación visual....83

6.3 Identificación de la especie invasora por clasificación supervisada con imagen planet scope, 2019. 93

6.4 Identificación de la especie invasora por otros procesos digitales 104

6.5 Verificación en campo de los resultados....111

6.6 Comparación de resultados y ajustes a los modelos cartográficos. 113

6.7 Evaluación y análisis de los modelos cartográficos resultantes. 115

7 MAPA DE PRESENCIA Y DISTRIBUCIÓN DE RETAMO ESPINOSO *Ulex europaeus* EN LA ZONA URBANA DE BOGOTÁ D.C. 124

8 CONCLUSIONES 128

9 BIBLIOGRAFÍA 132

10 ANEXOS 136

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características de las imágenes SENTINEL-2. 17

Tabla 2. Características de las imágenes LANDSAT-8 OLI. 18

Tabla 3. Imágenes de satélite disponibles para el área del proyecto. 19

Tabla 4. Imágenes de satélite con mejor opción para el proyecto. 22

Tabla 5. Información secundaria incluida en la base de datos por localidades 24

Tabla 6. Distribución de clases de área en los polígonos de control 29

Tabla 7. Categorización de polígonos de control por tipo de crecimiento de la especie invasora. 29

Tabla 8. Categorización de polígonos de control por tipo de Estado de desarrollo de la especie invasora. 30

Tabla 9. Coberturas asociadas en los polígonos de control. 30

Tabla 10. Categorías de tipos de floración en los polígonos de control. 31

Tabla 11. Representación de polígonos control según especie del complejo de especies invasoras. 31

Tabla 12. Coberturas colindantes a los polígonos de control. 32

Tabla 13. Localidades y sectores de localización de los polígonos de control. 32

Tabla 14. Tipos de crecimiento 50

Tabla 15. Tipo de estados de desarrollo 52

Tabla 16. Tipos de asociación 54

Tabla 17. Análisis del Coeficiente de correlación entre las bandas de imagen Planet Scope para la especie *Ulex europaeus* L. 60

Tabla 18. Análisis del Coeficiente de correlación entre las bandas del sinergismo Planet Scope - Sentinel para la especie *Ulex europaeus* L. 62

Tabla 19. Estadísticos analizados el ejercicio sinergismo Planet Scope – Sentinel 67

Tabla 20. Valores de reflectancia para la cobertura de retamo espinoso en el ejercicio de sinergismo PLANET SCOPE – SENTINEL 80

Tabla 21. Localidades representadas con presencia de registros aislados del complejo de retamo. 84

Tabla 22. Distribución de clases de área en los polígonos interpretación visual. 87

Tabla 23. Categorización de polígonos interpretación visual por tipo de crecimiento de la especie invasora. 87

Tabla 24. Categorización de polígonos de interpretación visual por tipo de Estado de desarrollo de la especie invasora. 88

Tabla 25. Coberturas asociadas en los polígonos interpretados. 88

Tabla 26. Porcentaje de confianza según número de polígonos interpretados. 89

Tabla 27. Porcentaje de confianza según área interpretada. 89

Tabla 28. Representación de polígonos según especie del complejo de especies invasoras. 90

Tabla 29. Localidades representadas en el registro de polígonos de interpretación visual con presencia del complejo de retamo. 91

Tabla 30. Representación del complejo de retamo en las localidades de la zona urbana de Bogotá D.C. de acuerdo al Modelo cartográfico con la Clasificación Supervisada. 102

Tabla 31. Representación del complejo de retamo en las localidades de la zona urbana de Bogotá D.C. de acuerdo al Modelo cartográfico de probabilidades. 106

Tabla 32. Representación del complejo de retamo en las localidades de la zona urbana de Bogotá D.C. de acuerdo al Modelo cartográfico de Reflectancia. 109

Tabla 33. Representación del complejo de retamo en las localidades de la zona urbana de Bogotá D.C., comparación de resultados de los diferentes Modelos Cartográficos resultantes. 114

Tabla 34. Representación del complejo de retamo en las localidades de la zona urbana de Bogotá D.C. de acuerdo al Modelo cartográfico de la Propuesta integrada. 124

Tabla 35. Representación del complejo de retamo en las localidades de la zona urbana de Bogotá D.C. de acuerdo al Modelo cartográfico de la Propuesta integrada. 125

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Pasos metodológicos para la obtención del Mapa de la invasión del retamo espinoso en el área urbana de Bogotá D.C. 14

Figura 2. Vista previa de imagen Digital Globe enero a diciembre de 2018. 21

Figura 3. Vista previa de imagen Planet Scope con cobertura del 100% - 23

Figura 4. Etapas de trabajo para uso de imágenes de satélite....35

Figura 5. Procesamiento de la imagen LANDSAT-8. 36

Figura 6. Vista de un sector de la zona urbana de Bogotá D.C. con SENTINEL-2....37

Figura 7. Vista de un sector de la zona urbana de Bogotá D.C. con SENTINEL-2....37

Figura 8. Vista de un sector de la zona urbana de Bogotá D.C. con SENTINEL-2....38

Figura 9. Vista de un sector de la zona urbana de Bogotá D.C. con SENTINEL-2....39

Figura 10. Vista de un sector de la zona urbana de Bogotá D.C. con SENTINEL-2....39

Figura 11. Layer Stack en el Software Erdas imagine....40

Figura 12. Layer Stack en el Software Erdas imagine....41

Figura 13. Vista de un sector de la zona urbana de Bogotá, D.C. con la imagen SENTINEL-2....42

Figura 14. Vista de un sector de la zona urbana de Bogotá, D.C. con sinergismo de imagen SENTINEL y PLANET SCOPE....42

Figura 15. Índice de vegetación de diferencia normalizada....56

Figura 16. Reclasificación de la imagen en Zonas con vegetación y Zonas sin vegetación....57

Figura 17. Vista de un sector de la imagen que muestra el Área potencial de retamo (APR) identificado para el área urbana de Bogotá D.C. 58

Figura 18. Clasificación preliminar no supervisada con imagen PLANET SCOPE....61

Figura 19. Flujograma de trabajo para la identificación de Retamo....63

Figura 20. Polígonos identificados en campo para el muestreo de la cobertura....64

Figura 21. Extracción de la información de los pixeles....65

Figura 22. Identificación de rango de la cobertura de retamo sin entremezclamiento con otras coberturas para la banda 1 Sinergismo Planet Scope - Sentinel....69

Figura 23. Identificación de rango de la cobertura de retamo sin entremezclamiento con otras coberturas para la banda 2 Sinergismo PLANET SCOPE - SENTINEL 70

Figura 24. Identificación de rango de la cobertura de retamo sin entremezclamiento con otras coberturas para la banda 3 Sinergismo PLANET SCOPE - SENTINEL 71

Figura 25. Identificación de rango de la cobertura de retamo sin entremezclamiento con otras coberturas para la banda 4 Sinergismo PLANET SCOPE – SENTINEL. 72

Figura 26. Identificación de rango de la cobertura de retamo sin entremezclamiento con otras coberturas para la banda 5 Sinergismo PLANET SCOPE – SENTINEL. 73

Figura 27. Identificación de rango de la cobertura de retamo sin entremezclamiento con otras coberturas para la banda 6 Sinergismo PLANET SCOPE - SENTINEL 74

Figura 28. Identificación de rango de la cobertura de retamo sin entremezclamiento con otras coberturas para la banda 7 Sinergismo Planet Scope - Sentinel.....75

Figura 29. Identificación de rango de la cobertura de retamo sin entremezclamiento con otras coberturas para la banda 8 Sinergismo Planet Scope - Sentinel.....76

Figura 30. Identificación de rango de la cobertura de retamo sin entremezclamiento con otras coberturas para la banda 9 Sinergismo Planet Scope – Sentinel.....77

Figura 31. Identificación de rango de la cobertura de retamo sin entremezclamiento con otras coberturas para la banda 10 Sinergismo PLANET SCOPE - SENTINEL 78

Figura 32. Identificación de rango de la cobertura de retamo sin entremezclamiento con otras coberturas para la banda 11 Sinergismo PLANET SCOPE - SENTINEL 79

Figura 33. Imagen de trabajo conformada por 11 bandas.....94

Figura 34. Área de trabajo en formato raster. 95

Figura 35. Dominios de muestreo para el proyecto del retamo espinoso. 96

Figura 36. Selección de bandas para fase de muestreo. 96

Figura 37. Proceso de toma de muestras y asignación de dominios.....97

Figura 38. Toma de muestras de agua y tejido urbano. 98

Figura 39. Estadísticas de muestreo por unidad de cobertura. 98

Figura 40. Ejemplo de un Diagrama de correlación de bandas para el muestreo. 99

Figura 41. Menú de comando Classify.....100

Figura 42. Resultado de interpretación supervisada para el área urbana de Bogotá D.C. 101

Figura 43 Clasificación de retamo a partir de probabilidades con ND para el ejercicio Sinergismo PLANET SCOPE – SENTINEL. 105

Figura 44. Vista de un sector de Bogotá D.C de la imagen Raster en la clasificación por análisis de reflectancia. 108

Figura 45. Enmascaramientos de la cobertura de retamo espinoso con las demás coberturas analizadas.....115

Figura 46. Vista del análisis interactivo de la respuesta espectral de un cuerpo de agua, en el software Ilwis. 116

Figura 47. Vista del análisis interactivo de la respuesta espectral de un sector urbano, en el software Ilwis. 117

Figura 48. Vista del análisis interactivo de la respuesta espectral de un sector con suelo desnudo, en el software Ilwis. 117

Figura 49. Vista del análisis interactivo de la respuesta espectral de un sector con cobertura de pastos, en el software Ilwis. 118

Figura 50. Vista del análisis interactivo de la respuesta espectral de un sector con cobertura de matorrales nativos, en el software Ilwis. 118

Figura 51. Vista del análisis interactivo de la respuesta espectral de un sector con cobertura de matorrales nativos, en el software Ilwis. 119

Figura 52. Vista de la respuesta espectral de varias coberturas de suelo en su relación con los matorrales de retamo espinoso, en las 11 bandas, con Ilwis. 120

Figura 53. Enmascaramiento de la cobertura de retamo espinoso 121

Figura 54. Enmascaramiento de la cobertura de retamo espinoso. 122

LISTA DE MAPAS

Mapa 1. Área de trabajo que corresponde al perímetro urbano de Bogotá D.C. Decreto 190 de 2004 y 16

Mapa 2. Localización de puntos de información secundaria donde se registra la presencia de *Ulex europaeus L.* y *Genista monspessulana* (L.) L.A.S. Johnson, en zona urbana y rural de Bogotá D.C. 27

Mapa 3. Mapa de puntos y polígonos de control con presencia de *Ulex europaeus L.* y *Genista monspessulana* (L.) L.A.S. Johnson, tomados en zona urbana y rural de Bogotá D.C. 34

Mapa 4. Áreas verdes de la ciudad donde potencialmente podría crecer el complejo invasor de retamo (APR) *Ulex europaeus L.* y *Genista monspessulana* (L.) L.A.S. Johnson en la zona urbana de Bogotá D.C. 59

Mapa 5. Localización de la presencia aislada de individuos de retamo *Ulex europaeus* L. y *Genista monspessulana* (L.) L.A.S. Johnson, en zona urbana de Bogotá D.C. 85

Mapa 6. Mapa de presencia y distribución de *Ulex europaeus* L. y *Genista monspessulana* (L.) L.A.S. Johnson en zona urbana de Bogotá D.C., Producto de interpretación visual y verificación de campo. 92

Mapa 7. Mapa de presencia y distribución de *Ulex europaeus* L. y *Genista monspessulana* (L.) L.A.S. Johnson en zona urbana de Bogotá D.C., identificado con la Clasificación supervisada. 103

Mapa 8. Mapa de presencia y distribución de *Ulex europaeus* L. y *Genista monspessulana* (L.) L.A.S. Johnson en zona urbana de Bogotá D.C., Modelo de probabilidades de presencia de retamo. 107

Mapa 9. Mapa de presencia y distribución de *Ulex europaeus* L. y *Genista monspessulana* (L.) L.A.S. Johnson en zona urbana de Bogotá D.C., identificado con el Modelo de Reflectancia. 110

Mapa 10. Puntos de verificación y recorridos realizados para la verificación de la presencia de la especie invasora *Ulex europaeus*. 112

Mapa 11. Mapa de presencia y distribución de *Ulex europaeus* L. y *Genista monspessulana* (L.) L.A.S. Johnson, en la zona urbana de Bogotá D.C. Propuesta integrada. 127

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. Cartografía del proyecto 137

ANEXO 2. Formulario para toma de datos en campo 138

ANEXO 3. Cálculos de Valores de Pixeles 139

ANEXO 4. Archivo fotográfico georeferenciado y SHAPE.file complementario de los hallazgos de retamo espinoso en las salidas de verificación. 140

PRODUCTO 2

Informe final del procesamiento digital de imágenes satelitales para la elaboración del Mapa de retamo espinoso (*Ulex europaeus* L.) en el área urbana de Bogotá D.C.

1 INTRODUCCIÓN

La especie invasora *Ulex europaeus* actualmente está ampliamente extendida en la capital de la república; para su control, urge tener herramientas cartográficas que permitan conocer su presencia y distribución. La Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) desde el año 2016 realiza acciones para la ubicación de esta problemática mediante el uso de herramientas de percepción remota, tal como se evidencia en los resultados del Convenio Interadministrativo 20161324 con la Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá – EAAB – ESP y la SDA, que tuvo como objeto *"Aunar recursos técnicos, financieros y humanos para elaborar el mapa de la invasión de retamo espinoso en la zona rural del Distrito Capital"*; por lo anterior, mediante el presente contrato se pretende realizar dicha tarea en la *zona urbana*, donde también se ha identificado la especie invasora.

El presente documento muestra el resultado del procesamiento digital de imágenes de satélite para la elaboración del mapa actual de distribución y presencia del retamo espinoso (*Ulex europaeus*) en la zona urbana de Bogotá D.C. Dicho procesamiento se realizó, tanto con las herramientas de percepción remota de libre acceso, como con una imagen de bajo costo que mejora la resolución espectral; por lo tanto, en este documento se analizan sus alcances y limitaciones y se presentan los resultados obtenidos, los cuales se resumen en un modelo cartográfico de presencia y distribución de retamo, que combina diferentes estrategias para la obtención del resultado final, objeto de este contrato.

2 ALCANCE

El **Producto 2** del contrato SDA-CM-2018-SECOP II-E-0055, corresponde a un informe que presenta el resultado del procesamiento digital de imágenes satelitales de libre acceso y de una imagen de bajo costo (Planet Scope), de mejor resolución que las gratuitas, se analizan sus alcances y limitantes, y se generan modelos cartográficos que permiten identificar la presencia y distribución de la especie invasora *Ulex europaeus* (retamo espinoso) en la zona urbana de Bogotá D.C. Este documento también analiza los resultados obtenidos, presenta conclusiones y recomendaciones y se acompaña de cartografía a escala 1:5.000.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

- Elaborar el mapa de la invasión de retamo espinoso (*Ulex europaeus*) en el área urbana de Bogotá D.C., con imágenes satelitales de descarga gratuita y otra de bajo costo, con mejor resolución espacial.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Presentar el procesamiento digital realizado a una imagen de bajo costo PLANET SCOPE (2019) y de otras imágenes de libre acceso como LANDSAT-8 (2018), SENTINEL-2 (2018), ortofotomosaicos IDECA (2014, 2015) de uso público para Bogotá D.C. y ortofotomosaicos de drones de algunos sectores (suministrados por la SDA), para la identificación de la presencia de la especie invasora retamo espinoso (*Ulex europaeus*).

- Realizar la identificación y espacialización, en la zona urbana de Bogotá D.C., de la especie invasora retamo espinoso (*Ulex europaeus*), con las herramientas de percepción remota analizadas, según alcances y limitantes.

- Presentar como resultado, un modelo cartográfico que permita identificar la presencia y distribución de la especie invasora *Ulex europaeus* (retamo espinoso) en la zona urbana de Bogotá D.C.

4 ANTECEDENTES

Como antecedentes al estudio de la distribución de la especie *Ulex europaeus* con sensores remotos en la ciudad de Bogotá D.C., se tiene la guía para la restauración ecológica de áreas afectadas por el complejo invasor de retamo, (Ríos, 2005) donde se presenta un mapa de distribución del complejo invasor realizado con imágenes Landsat TM y zonifica las prioridades de restauración tanto para zonas urbanas, como rurales de Bogotá D.C. Posteriormente está el trabajo de Castillo (2008), quien presenta una propuesta metodológica para ubicar la invasión biológica, mediante el modelamiento de nichos específicos para el retamo espinoso, con el fin de identificar áreas vulnerables, considerando variables de escala regional, debido a que el área de estudio abarcó la totalidad de la cuenca alta del río Bogotá. El estudio concluyó que el retamo espinoso tiene un altísimo potencial de colonización en casi toda el área de estudio y que la variable que mejor se relaciona con la probabilidad de ocurrencia es la altitud, en su relación con los factores climáticos como precipitación y radiación solar; por otra parte, asigna un peso importante a las dinámicas socioeconómicas que muestran la prevalencia de esta especie en su proximidad a las vías. Este estudio también se refiere que la especie invasora responde positivamente a la transformación y degradación de ecosistemas, en el que la ciudad de Bogotá potencializa la vulnerabilidad a la invasión.

Por otra parte, Castro y Peñaloza (2015) buscaron una metodología para la identificación del complejo invasor de retamo en algunas zonas piloto de Bogotá, con imágenes multiespectrales de alta resolución (0,5 m), con lo cual aportan recomendaciones para los procesos digitales y resaltan las limitaciones que pueden existir, en cuanto a la resolución de las imágenes y a cada especie invasora.

De otro lado, FUNDASET (2017) realizó monitoreos desde el Convenio SDA 20161268 - IDRD 004195 de 2016, basados en el seguimiento de las respuestas espectrales de zonas que fueron objeto de control de retamo, con imágenes de satélite de baja resolución espacial (30 m), y mediante el cálculo de índices espectrales, mostrando la bondad de estas herramientas para realizar evaluación multitemporal de procesos de erradicación y la proyección de actividades en zonas específicas, previamente identificadas para el control de la invasora.

Se tiene, de igual manera, la investigación de Benavides et. al (2017) en la localidad de Santa Fe, en la que se identificó el amplio espectro invasivo del retamo espinoso en cuanto a zonas de vida y factores fisiográficos, y se destacó como la variable más importante para definir posibles invasiones, los tipos de cobertura y los cambios de uso del suelo, especialmente en zonas rurales.

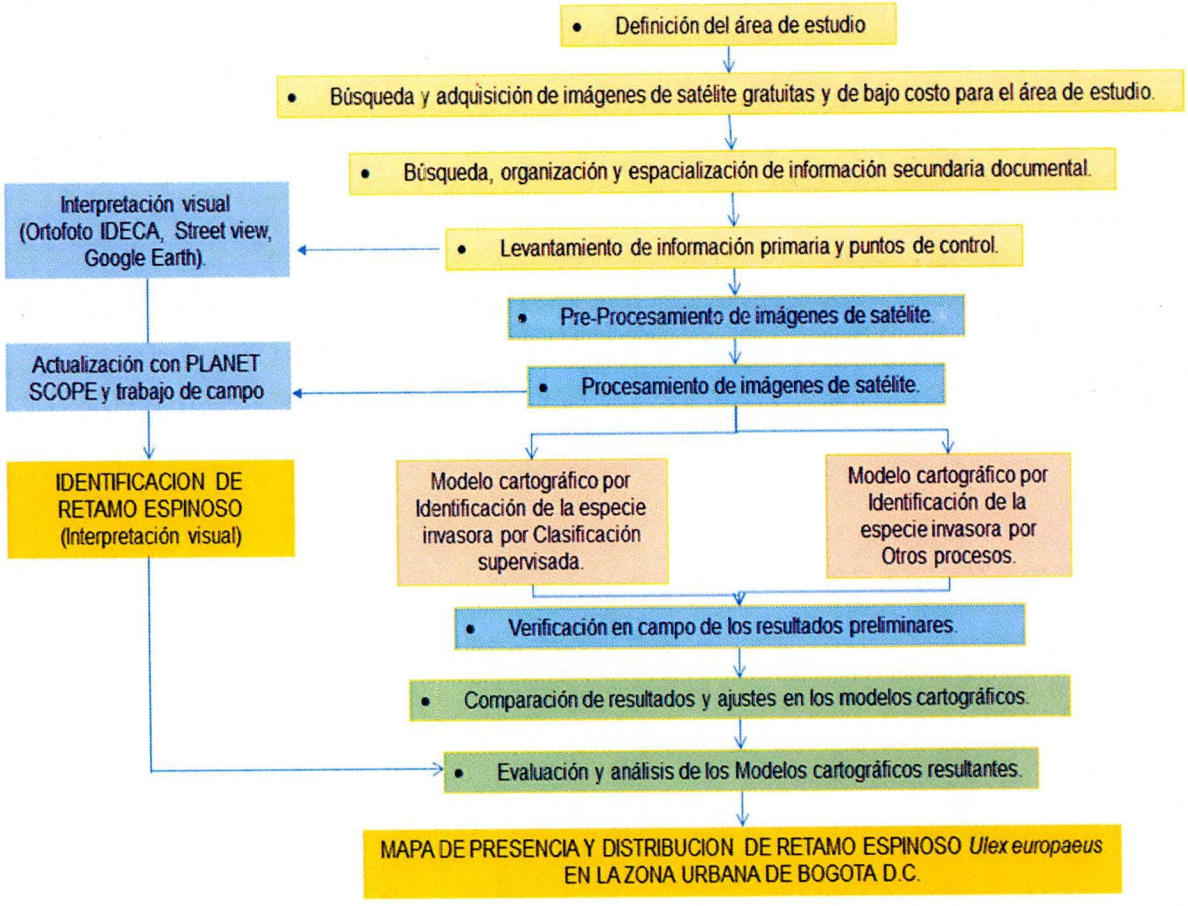
Por otra parte, la Secretaría Distrital de Ambiente y la Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá realizaron el mapa de la invasión de retamo

espinoso en la zona rural del Distrito Capital, mediante el Convenio Interadministrativo No. 20161324 (2018), para el cual se utilizaron imágenes satelitales de muy alta resolución y se obtuvieron las áreas tentativas con presencia de retamo en la zona rural. Los resultados muestran que, pese a la buena calidad de las imágenes, se dificulta determinar un único patrón para la respuesta espectral del retamo, hay enmascaramiento con otras coberturas y se aclara que una imagen con resolución de 0,5 m permite una mejor discriminación de clases.

5 METODOLOGÍA

La metodología general que se siguió para la obtención del MAPA DE LA INVASIÓN DEL RETAMO ESPINOSO EN EL ÁREA URBANA DE BOGOTÁ D.C. se resume en los siguientes pasos:

Figura 1. Pasos metodológicos para la obtención del Mapa de la invasión del retamo espinoso en el área urbana de Bogotá D.C.



Fuente: Geotem S.A.S.,2019.

5.1 DEFINICIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La cobertura del mapa objeto del contrato corresponde al área urbana de Bogotá D.C., por lo cual fue necesario acceder al perímetro urbano, el cual se obtuvo de la fuente oficial distrital: Infraestructura de Datos Espaciales del Distrito Capital (IDECA), una vez verificado por la supervisión del contrato y personal de la Dirección de Gestión Ambiental de la Secretaría Distrital de Ambiente - SDA.

En el **Mapa 1** se presenta el límite del área de estudio que corresponde al definido por el Decreto 190 de 2004 y la Resolución 228 de 2015 (Secretaría Distrital de Planeación). Este mapa se puede consultar en formato PDF (Mapas Documento), al igual que en la base de datos espacial del proyecto, en el Anexo cartográfico (**Anexo 1**).

El perímetro urbano de Bogotá incluye 19 localidades (algunas total y otras parcialmente) y corresponde a un área total de 379,45 km^2.

5.2 BÚSQUEDA Y ADQUISICIÓN DE IMÁGENES DE SATÉLITE DEL ÁREA DE ESTUDIO.

Se procedió con la búsqueda de imágenes satelitales de amplio espectro y alto nivel de detalle, con cubrimiento del área de estudio, en fuentes de acceso gratuito y de bajo costo.

Para el propósito del estudio se definieron lineamientos de selección de imágenes a utilizar, como son: la **temporalidad** (imágenes recientes, de ser posible de menos de 3 meses de registro); el **porcentaje de nubes** (debe estar por debajo del 15%); imágenes **multiespectrales** (al menos con una banda del infrarrojo); y **resolución** en relación a la escala (se considera que el **tamaño óptimo de pixel** debe ser de hasta 5 m, para lograr salidas gráficas de escala 1:10.000 a 1:5.000).

Teniendo en cuenta que inicialmente se propuso el uso de imágenes de libre acceso, se identificaron imágenes **SENTINEL-2** (tamaño de pixel de 10 m para bandas del espectro visible y del infrarrojo cercano; de 20 y 30 m para las bandas con mayor longitud de onda), cuyas características se citan en la tabla 1, e imágenes **LANDSAT-8** (resoluciones entre 15 y 60 m, también dependiendo de la banda que se registre), con características como las relacionadas en la tabla 2.

Tabla 1. Características de las imágenes SENTINEL-2.

Características Generales	BANDAS	LONGITUD DE ONDA (NM)	GSD (M)
Bandas Espectrales	1	443	60
	2	490	10
	3	560	10
	4	665	10
	5	705	20
	6	740	20
	7	783	20
	8	842	10
	8 A	865	20
	9	940	60
	10	1375	60
	11	1610	20
	12	2190	20
Altitud de Órbita	786 Km		
Ancho Pasada	290 Km		
Distancia de Muestreo (GSD)	15 – 30 Km		
Lanzamiento	2015		
Tiempo Revisita	10 días Individualmente, 5 días conjuntamente		

Fuente: https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions, consultado 31 marzo 2019

En ese sentido, se utilizaron imágenes **LANDSAT-8** (de diciembre de 2018) y **SENTINEL-2** (del 25 de diciembre de 2018), ambas con cobertura de nubes por debajo del 5% (para el área urbana de Bogotá D.C.).

Tabla 2. Características de las imágenes LANDSAT-8 OLI.

Características Generales	Bandas	Longitud de Onda (nm)	GSD (m)
Bandas Espectrales	1 – COASTAL AEROSOL	300	30
	2 – AZUL	450 - 510	30
	3 – VERDE	530 – 590	30
	4 – ROJO	640 - 670	30
	5- INFRAROJOS	850 – 880	30
	6 - SWIR 1	1570 - 1650	30
	7 - SWIR 2	2110 – 2290	30
	8- PANCROMÁTICA	500 - 680	15
	9- CIRRUS	1360 – 1380	30
	10- INFRAROJOS TÉRMICOS 1	10600 - 11190	100 (*30)
	11- INFRAROJOS TÉRMICOS 2	11500 - 12510	100 (*30)
Altitud de Órbita	705 Km.		
Ancho Pasada	185 Km		
Distancia de Muestreo (GSD)	15 – 30 Km		
Lanzamiento/Expectativa de vida	2013-2018 (tiene suministros hasta 2023)		
Tiempo Revisita	16 días		

Fuente: USGS 2013 - https://www.usgs.gov/ consultado 31 de marzo de 2019

Por otra parte, en cuanto a la información disponible del IDECA, se tuvo acceso a ortofotomosaicos, pero los más recientes disponibles al momento de realizar este proyecto fueron de los años 2014 y 2015, los cuales, aunque presentan muy buena resolución, tienen el inconveniente de no ser multiespectrales.

También se tuvo acceso a ortofotomosaicos tomados con drones, suministrados por la supervisión de este contrato y correspondientes a algunos sectores del Humedal Juan Amarillo, Parque Ecológico Distrital de Montaña Entrenubes y Humedal de Techo, resultantes de vuelos realizados a finales del año 2018.

Para mejorar la resolución por tamaño de pixel, se buscaron opciones comerciales que pudieran permitir una mejor visualización de elementos geométricos en la imagen y más recientes en el tiempo; es así como se identificaron satélites con imágenes de resolución espacial entre 0,30 m y 5 m, las cuales se detallan en la tabla 3.

Tabla 3. Imágenes de satélite disponibles para el área del proyecto.

Satélite	Resolución espacial	Archivo - > 90 días	Archivo 90 días
WorldView- 03-abr	30-cm Natural Color	$22,50/km2	$32,50/km2
	30-cm 4-band PS	25 km2	25 km2
	30-cm Pan + 1,2-m MS	Pan = $19	Pan = $29
WorldView-3	30-cm Pan + 1,2-m 8-band MS	25 km2	25 km2
WorldView-3	7.5-m 8-band SWIR only	25 km2	25 km2
GeoEye-1 WorldView-	40-cm Natural Color 40-cm 4-band PS 40-cm Pan + 1,6-m MS	$19,50/km2 25 km2 Pan = $16	$29,50/km2 25 km2 Pan = $26
WorldView-	40-cm Pan + 1,6-m 8-band MS	$21/km2	$31/km2
		25 km2	25 km2
GeoEye-1 WorldView-	50-cm Natural Color 50-cm 4-band PS 50-cm Pan + 2-m MS	$17,50/km2 25 km2 Pan = $14	$27,50/km2 25 km2 Pan = $24
WorldView-	50-cm Pan + 2-m 8-band MS	$19/km2 25 km2	$29/km2 25 km2
WorldView-1	50-cm Pan	25 km2	25 km2
SuperView-1	50-cm Pan + 2-m 4-band MS	25 km2	25 km2
KOMPSAT-3A	55-cm** Natural Color 55-cm 4-band PS 55-cm Pan + 2.2-m MS	$12/km2 25 km2 > 60 days	$16/km2 25 km2 ≤ 60 days
QuickBird	60-cm Natural Color 60-cm 4-band PS 60-cm Pan + 2.4-m MS	$17,50/km2 25 km2 Pan = $14	N/A
GeoEye-1 WorldView- 1/2/3/4 QuickBird	70-cm Pan 70-cm Natural Color 70-cm 4-band PS 70-cm Pan + 2,8-m MS	$10,50/km2 25 km2 Pan = $7	$10,50/km2 25 km2
WorldView-	70-cm Pan + 2,8-m 8-band	$12/km2	$12/km2

Satélite	Resolución espacial	Archivo - > 90 días	Archivo 90 días
	MS	25 km2	25 km2
KOMPSAT-3	70-cm Natural Color 70-cm 4-band PS 70-cm Pan + 2.8-m MS	$8/km2 25 km2 > 60 days	$11/km2 25 km2 ≤ 60 days
EROS B	70-cm Pan	$6/km2 25 km2 > 60 days	$15/km2 50 km2 ≤ 60 days
SkySat	≥ 72-cm Pan (raw) ≥ 1-m 4-band MS (raw) 80-cm Ortho Scene	$5000 min	$5.000 min
Deimos-2	75-cm Natural Color 75-cm 4-band PS 75-cm Pan + 3-m MS	$7/km2 25 km2	$7/km2 25 km2
SPOT 6/7	1.5-m Natural Color	$4,75/km2	$4,75/km2
	1.5-m 4-band PS	100 km2	100 km2
	1.5-m Pan + 6-m MS	Pan = $3.65	Pan = $3.65
GaoFen-1		$1,70/km2	$1,70/km2
	2-m Pan + 8-m MS	500 km2	500 km2
		Pan = $1,00	Pan = $1,00
	2-m Pan	375 km2	375 km2
ZiYuan-3	2,1-m Pan + 5,8-m MS	$2,10/km2 500 km2 Pan = $1.20	$2,10/km2 500 km2 Pan = $1.20
PlanetScope	3-m 4-band MS (some color only)	$5,000 min 500 km2/AOI	$5.000 min 500 km2/AOI

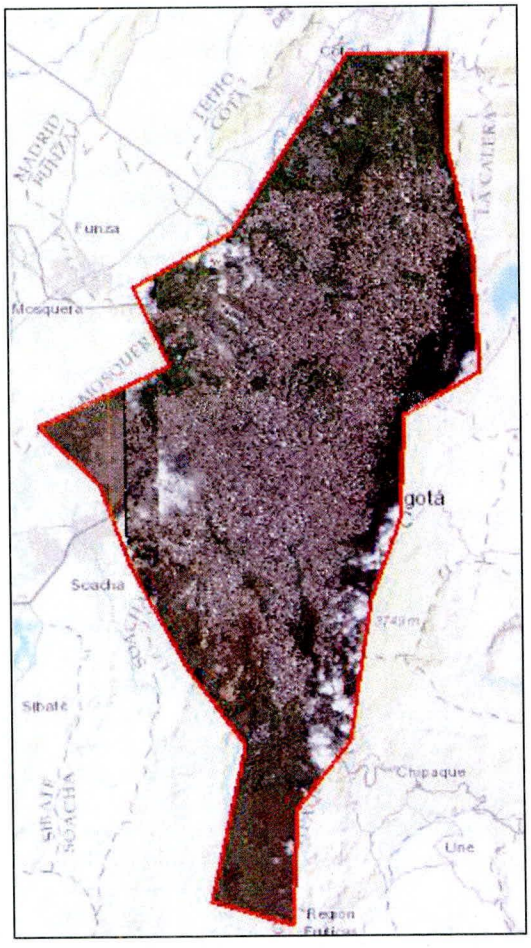
Fuente: Geotem S.A.S.,2019.

Como se ve en la tabla 3, se identificaron en el mercado 20 opciones de imágenes, de las cuales 15 son de menos de un metro de resolución, y las demás de menos de 5 m.

Hay que tener en cuenta que imágenes como WORLD/VIEW 3 cubren apenas el 65% del área de estudio, mientras que PLANET SCOPE (con 3 m de resolución espacial) cubren 100% del área y tienen menos de 5% de cobertura de nubes.

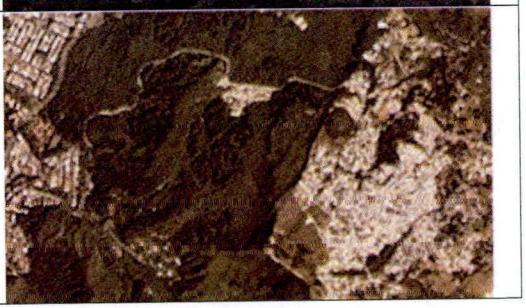
En las figuras 2 y 3 se muestran las vistas en pantalla de las imágenes DIGITAL GLOBE y PLANET SCOPE que presentan los mejores parámetros de temporalidad, cubrimiento de área y nubosidad para el área de estudio; no es posible presentar la vista de SKYSAT, ya que esta se solicita con programación previa del satélite, como se referencia en la tabla 4.

Figura 2. Vista previa de imagen Digital Globe enero a diciembre de 2018.



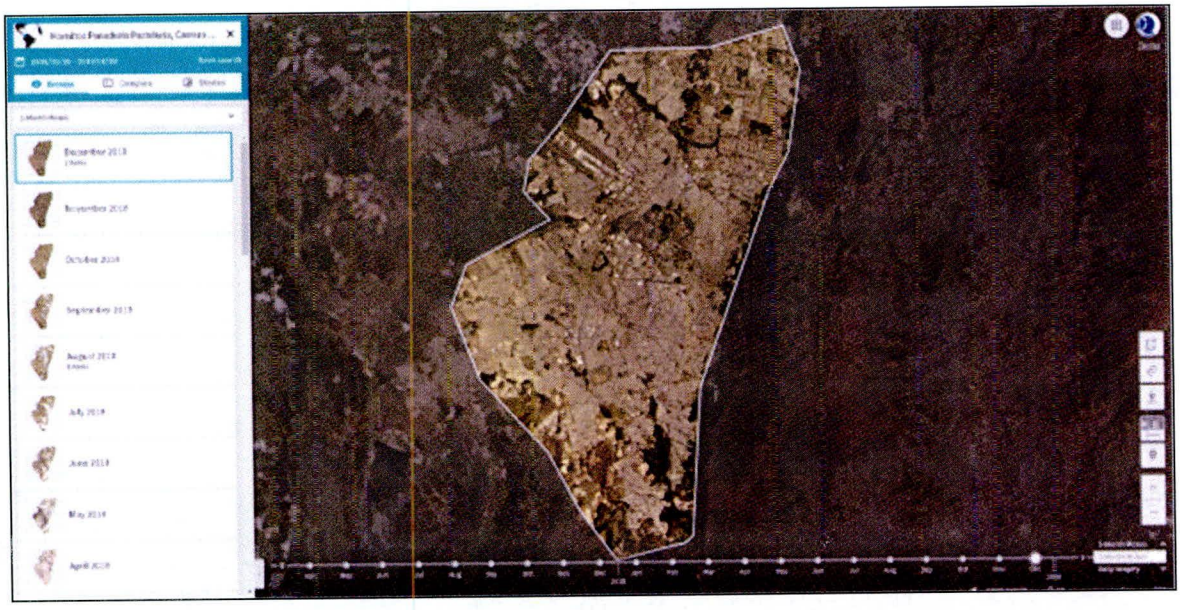
Fuente: Geotem S.A.S., 2019, adaptado de Procalculo 2019.

Tabla 4. Imágenes de satélite con mejor opción para el proyecto.

SENSOR	RESOLUCIÓN ESPACIAL	FECHA ADQUISICIÓN	COBERTURA DE NUBES	No. De BANDAS	PRECIO	EJEMPLOS DE LA VISTA GENERAL DE CADA SENSOR
DIGITAL GLOBE	0,5 m	Enero a diciembre de 2018.	<10%	4	U$29 Km^2	
SKYSAT	0,72 m	Por programación.	Se determina máxima cobertura de nubes permitida	4	U$12 Km^2	
PLANET SCOPE	3 m	22 de febrero de 2019	<5%	4	U$4 Km^2	

Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

Figura 3. Vista previa de imagen Planet Scope con cobertura del 100% - mes de enero de 2019.



Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

Se debe considerar que los costos por kilómetro cuadrado son más altos en la medida en que se quiera mayor resolución espacial (mejor escala), por lo cual, finalmente se optó por adquirir la imagen PLANET SCOPE (de febrero de 2019), por ser una imagen de satélite de bajo costo y de buen balance en cuanto a los criterios de selección antes descritos.

5.3 BÚSQUEDA, ORGANIZACIÓN Y ESPACIALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN SECUNDARIA DOCUMENTAL.

Se realizó la búsqueda de información documental y cartográfica, preferiblemente reciente, que evidenciara la presencia de retamo espinoso (*Ulex europaeus*), teniendo en cuenta los datos de fuente, año de la fuente, datos de ubicación, área y características fisionómicas, como datos principales; igualmente, si obedeció a un convenio o proyecto específico, si fue resultado de un control de retamo o evento como incendio y, dado que la invasión retamo está asociada tanto al retamo espinoso *Ulex europaeus* como al retamo liso *Genista monspessulana,* y algunos trabajos las referencian juntas, se incluyó dicha información.

En la ubicación se registra si se localizan en zona urbana o rural, ya que pese a que el mapa de distribución de retamo, objeto del presente estudio, tiene como alcance el área urbana, los registros del área rural fueron importantes para establecer puntos de control, dada la extensión de los parches y su crecimiento

consolidado, aspectos importantes para la calibración de bandas en la imagen multiespectral y para la consecución de respuestas espectrales.

Se conformó una base de datos de la información secundaria utilizada como insumo, la cual fue georeferenciada, incluyendo el dato citado directamente por la fuente o realizando una aproximación, dado que en algunas fuentes solo se presenta la descripción del lugar pero no se cita la coordenada.

Se presenta una base de datos de información secundaria con 1277 registros de 11 localidades de Bogotá, agrupados en 45 sitios, de los cuales 36 fueron verificados con visitas de campo, según se aprecia en la tabla 5.

Tabla 5. Información secundaria incluida en la base de datos por localidades.

Localidad (Código)	Rural	Urbano	Total general	VERIFICACIÓN
Usaquén (1)	**2**	**99**	**101**	**3**
23_Humedal de Torca		3	1	1
24_Humedal de Guaymaral		1	1	1
37_ Cabecera Q. La Floresta-Q. Novita	1		1	
43_Floresta de la Sabana	1		1	
5_Cantera Soratama		95	95	1
Chapinero (2)	**16**	**15**	**31**	**1**
12_Seminario Padres Píos Escolapios		5	5	
29_Quebrada Las Delicias		2	2	
3_Parque Nacional E.O.H.	14	3	17	1
31_Predio Ministerio de Defensa Nacional		5	5	
8_Cerro El Cable	2		2	
Santa Fe (3)	**22**	**30**	**52**	**1**
3_Parque Nacional E.O.H.	3	28	31	1
6_Cerro Monserrate	18	2	20	
7_Cerro Guadalupe	1		1	
San Cristóbal (4)	**444**	**33**	**477**	**11**
1_Cantera el Zuque	441	2	443	1
10_Q. Chorro Colorado		3	3	1
11_Colegio Monseñor Bernardo Sánchez	1	2	3	1
2_PM La Arboleda		13	13	1
26_Parque El Virrey		7	7	1
27_Parque Altos del Virrey		1	1	1

30_Parque Las Brujas		1	1	1
32_Vía Antigua al Llano		1	1	1
33_Tanque San Dionisio	1		1	
34_El Delirio	1		1	
41_Ramajal		1	1	1
44_Quebrada Chiguaza		1	1	1
45_Barrio Montebello		1	1	1
Usme (5)	**16**	**498**	**514**	**7**
13_Parque Entrenubes		496	496	1
14_Embalse La Regadera	3		3	1
25_Parque San Cayetano	1		1	
4_BITER La Australia	3		3	1
39_Sector Los Soches	4		4	1
9_Embalse de Chisacá	5		5	1
38_Bosque sur oriental		1	1	1
40_Quebrada Fucha		1	1	1
Tunjuelito (6)		**7**	**7**	**1**
35_Cantera La Fiscala		1	1	1
36_Humedal El Tunjo o La Libélula		6	6	
Kennedy (8)		**10**	**10**	**2**
15_Humedal El Burro		6	6	1
16_Humedal de Techo		4	4	1
Fontibón (9)		**40**	**40**	**2**
17_Humedal de Capellanía		37	37	1
18_Humedal Meandro del Say		3	3	1
Engativá (10)		**18**	**18**	**2**
19_Humedal del Jaboque		7	7	1
20_Humedal Juan Amarillo		11	11	1
Suba (11)	**2**	**24**	**26**	**5**
13_Parque Entrenubes		1	1	1
21_Humedal de Córdoba		4	4	1
22_Humedal La Conejera		8	8	1
24_Humedal de Guaymaral	1	7	8	1
28_Parque Mirador de Los Nevados		4	4	1
42_Cerro de La Conejera	1		1	

Rafael Uribe Uribe (18)		**1**	**1**	**1**
13_Parque Entrenubes		1	1	1
Total general	**502**	**775**	**1277**	**36**

Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

La base de datos se espacializó, como se aprecia en el **Mapa 2,** y se puede consultar en formato PDF y en el SHAPE.file (Mapas Documento), al igual que en la base de datos espacial del proyecto, en el Anexo cartográfico (**Anexo 1**).

5.4 LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN PRIMARIA Y PUNTOS DE CONTROL

Producto de las visitas de verificación de la información secundaria, se conformó una nueva base de datos con los lugares donde se verificaron nuevos sitios con la presencia de la especie invasora; igualmente se evaluó su pertinencia para ser considerado como un buen punto de control para procesos posteriores de análisis digital de imágenes.

Los resultados de este proceso se pueden apreciar en el **Mapa 3** y consultar en formato PDF y SHAPE.file (Mapas Documento), al igual que en la base de datos espacial del proyecto, en el Anexo cartográfico (**Anexo 1**).

Los puntos de control se utilizaron para calibrar los posteriores análisis digitales y facilitar la identificación de la respuesta espectral de los matorrales objeto de estudio, así como para ser usados como zonas de entrenamiento en procedimientos automatizados de clasificación de coberturas.

Se elaboró un formulario para la toma de datos en campo que permitiera una completa descripción de los hallazgos de retamo, donde se consignaron tanto las coordenadas geográficas y datos de barrio y localidad, como aquellas características de la especie relacionadas con las variaciones de tipo de crecimiento, estado de desarrollo, asociación con otras coberturas, coberturas colindantes, entre otras, que se pueden apreciar mejor en la estructura del formulario en el **Anexo 2.** Con esta información se conformó la base de datos del mapa de puntos de control.

En total, se tomaron 63 puntos de control (27 están en zona urbana y 36 en zona rural) para 36 sitios de 9 localidades, de los cuales 60 fueron evaluados como buenos puntos para ser analizados con la imagen multiespectral, por lo cual los siguientes análisis se hicieron a partir de estos 60 puntos.

➢ Poligonización de puntos de control

Una vez se definieron los puntos de control de mejor calidad, y ya caracterizados en cuanto al estado de crecimiento del retamo, asociación con otras coberturas, estado fenológico, coberturas adyacentes, entre otras, se incluyeron adicionalmente las características vistas en la imagen de referencia, con la cual se logró poligonizar la cobertura vista en campo y a la cual se recalculó el área, colindancias y asociación con otras coberturas. Se poligonizaron 60 puntos de control, de los cuales se puede decir que el 88,3% es inferior o igual a 1 ha; la predominancia está en polígonos entre 101 y 1.000 m^2, seguida por la categoría entre 1.001 y 3.000 m^2 (ver tabla 6).

Tabla 6. Distribución de clases de área en los polígonos de control

Categorías de área (m2)	No. Polígonos	%
<100	2	3,33
101-1000	19	31,67
1001-3000	17	28,33
3001-6000	8	13,33
6001-10000	7	11,67
10001-12000	3	5,00
>12000	4	6,67
Total general	**60**	100,00

Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

En cuanto al tipo de crecimiento, se identificó que en crecimiento consolidado está el 53,3% de los polígonos de control, seguido por los que crecen de manera dispersa, mixta y, en último lugar, los aislados, como se aprecia en la tabla 7. El registro "NA – No aplica" de la mencionada tabla, es el registro realizado en un área del Humedal de Capellanía, donde hubo erradicación de retamo, por tanto, no había presencia de la planta al momento de la visita, y se deja como muestra blanco para, igualmente, controlar este aspecto en los análisis posteriores de análisis digital.

Tabla 7. Categorización de polígonos de control por tipo de crecimiento de la especie invasora.

SÍMBOLO	TIPO DE CRECIMIENTO	No. Polígonos	%
NA	No aplica	1	1,67
A	Aislado	2	3,33
C	Consolidado	32	53,33
D	Disperso	13	21,67
M	Mixto	12	20,00
	Total general	**60**	**100.00**

Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

Respecto al tipo de estado de desarrollo, el 45 % de los polígonos de control presenta hasta 2 m de altura, el 35 % es mayor a 2 m de altura, y le siguen los rasantes y los de hasta 1 m de altura (ver tabla 8). El registro "NA – No aplica" es el mismo mencionado anteriormente del humedal de Capellanía.

Tabla 8. Categorización de polígonos de control por tipo de Estado de desarrollo de la especie invasora.

SÍMBOLO	TIPO DE ESTADO DE DESARROLLO	No. Polígonos	%
NA	No Aplica	1	1,67
R	Rasante	7	11,67
H	Hasta 1 m de altura	4	6,67
A1	Hasta 2 m de altura	27	45,00
A2	Mayor de 2 m de altura	21	35,00
	Total general	**60**	**100,00**

Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

En cuanto a las coberturas asociadas, es decir, aquellas que hacen parte de la matriz, en cualquiera de los estados de crecimiento y desarrollo, se presentan 8, de las cuales la que mayor ocurrencia presentó en la asociación 1, fue la de pastos, seguida por "No aplica" (se presenta cuando no hay cobertura asociada, debido a que la invasión es muy homogénea y consolidada) y por los matorrales nativos (ver tabla 9).

Tabla 9. Coberturas asociadas en los polígonos de control.

Cobertura	Asociación 1	%	Asociación 2	%
Arboles dispersos	5	8,33	7	11,67
Arbustos dispersos	6	10,00	4	6,67
Bosque nativo	2	3,33	0	0,00
Matorral nativo	7	11,67	6	10,00
No aplica	8	13,33	22	36,67
Pastos	29	48,33	9	15,00
Plantación de exóticas	2	3,33	5	8,33
Suelo desnudo	1	1,67	7	11,67
Total general	**60**	**100,00**	**60**	**100,00**

Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

La asociación 2 se presenta en el caso en que la matriz está conformada por más de una cobertura, por tanto, esta sería la segunda matriz subdominante que, en el 36,6% de los puntos de control no se evidenció, pero que fue del 15% para pastos, seguida de 11,6% de árboles dispersos y suelo desnudo, en cada una de estas coberturas (ver tabla 9).

Se considera que la respuesta espectral podría variar de acuerdo con el estado de floración de la especie *Ulex europaeus*, por tanto, en los puntos de control se tuvo en cuenta su estado fenológico para, de esta manera, identificar con el procesamiento digital de imágenes si hay alguna incidencia de este aspecto en la respuesta espectral. El 33,3% de los puntos de control presenta individuos en mezcla de todos los estados fenológicos, el 38,33% no presentó flores y el 28,33% mostró presencia notoria de flores (ver tabla 10).

Tabla 10. Categorías de tipos de floración en los polígonos de control.

TIPO DE FLORACIÓN	No. Polígonos	%
No hay presencia de flores	23	38,33
Presencia de los diferentes estados fenológicos	20	33,33
Si hay presencia flores notoria	17	28,33
Total general	**60**	100,00

Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

De los 60 puntos de control, el 78,3% correspondió a registros de *Ulex europaeus*, el 10% a *Genista monspessulana* y el 11,67% a parches con proporciones similares de las dos especies invasoras (ver tabla 11).

Tabla 11. Representación de polígonos control, según especie del complejo de invasoras.

Especie invasora	No. Polígonos	%
Genista monpessulana	6	10,00
Proporciones similares de los dos	7	11,67
Ulex europaeus	47	78,33
Total general	**60**	**100,00**

Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

En cuanto a las coberturas que colindan con el retamo, se dividieron en: colindante 1, que es aquella que después de la cobertura de la especie invasora es la cobertura colindante dominante; seguida por la colindante 2 o cobertura colindante subdominante, por ello, en la base de datos aparecen estos tipos de coberturas. Cuando aparece *no aplica* en la colindante 2, es porque había solo una cobertura colindante. En los polígonos interpretados se aprecia que la cobertura colindante mejor representada son los pastos, las plantaciones de exóticas y las vías (ver tabla 12).

Tabla 12. Coberturas colindantes a los polígonos de control.

COBERTURA	No. polígonos COLINDANTE 1	%	No. polígonos COLINDANTE 2	%
Chusque	1	1,67	0	0,00
Construcciones	6	10,00	4	6,67
Cultivos	2	3,33		0,00
Matorral nativo	4	6,67	5	8,33
Pastos	29	48,33	8	13,33
Plantación de exóticas	8	13,33	10	16,67
Suelo desnudo	2	3,33	2	3,33
Vías	8	13,33	17	28,33
Arbustos dispersos		0,00	4	6,67
Bosque nativo		0,00	2	3,33
No aplica		0,00	8	13,34
Total general	**60**	**100,00**	**60**	100,00

Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

En la tabla 13 se observa que los polígonos de control estuvieron representados en 8 localidades, en 35 sectores y, de los 60 puntos de control, 35 están en el área rural y 25 están en el área urbana.

En el **Mapa 3** se puede apreciar la ubicación de puntos y polígonos de control, los cuales fueron tomados tanto en área rural como en área urbana del Distrito, dado que en la primera se pueden encontrar parches consolidados y de gran dimensión, los cuales son más escasos al interior del área urbana.

Tabla 13. Localidades y sectores de localización de los polígonos de control.

LOCALIDAD (Código localidad) Y SECTOR	RURAL	URBANO	TOTAL
Chapinero (2)	**1**		**1**
35_San Luis La Sureña	1		1
San Cristóbal (4)	**4**	**9**	**13**
14_Parque Entrenubes		1	1
16_Borde de vía Q. Verejones		1	1
17_Parque Altos del Virrey		1	1
18_Alrededores Cantera el Zuque		2	2
19_Urbanización Santa Rosa, Altos del Zipa		1	1
20_Borde de Vía Bosque de los Alpes		1	1
21_ San Blas II		1	1
22_San Jerónimo del Yuste - El Delirio	2		2

23_Vitelma	2		2
24_San Jerónimo - La Castaña		1	1
Usme (5)	**20**	**3**	**23**
10_Vereda Los Soches	3		3
11_Bosque sur oriental	2		2
13_Colegio San Cayetano	1		1
14_Parque Entrenubes		1	1
15_Colegio Monseñor Bernardo Sánchez	2	2	4
4_Río Tunjuelo	3		3
5_Embalse de Chisacá	3		3
6_Vía interna Colegio El Hato	1		1
7_Vereda Arrayanes	2		2
8_Biter La Australia	1		1
9_Vereda El Uval	2		2
Kennedy (8)		**3**	**3**
30_Humedal del Burro y alrededores		3	3
Fontibón (9)	**2**	**3**	**5**
29_Humedal Meandro del Say	1		1
31_Humedal de Capellanía		2	2
32_Oreja Ferrocaja Av.Cali Av Esperanza		1	1
34_Parque Distrital Zona Franca	1		1
Engativá (10)		**1**	**1**
33_Humedal La Florida		1	1
Suba (11)	**1**	**6**	**7**
12_Estación 21 Ángeles		1	1
25_Humedal Guaymaral	1	2	3
26_Autopista Norte		1	1
28_Mirador de los Nevados		2	2
Ciudad Bolívar (19)	**7**		**7**
1_Mochuelo Bajo	4		4
2_Mochuelo Alto	1		1
3_Santa Bárbara	1		1
4_Río Tunjuelo	1		1
Total general	**35**	**25**	**60**

Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

5.5 PRE-PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES.

Las fases de desarrollo para el procesamiento comprendieron etapas de selección y adquisición de imágenes, pre procesamiento, procesamiento y pos procesamiento digital de imágenes. En la figura 4 se ilustran las fases de tratamiento digital de imágenes multiespectrales, con el objeto de generación de mapas de coberturas de la tierra.

Figura 4. Etapas de trabajo para uso de imágenes de satélite.



Fuente: Geotem S.A.S.

5.5.1 Pre-procesamiento de Imágenes gratuitas

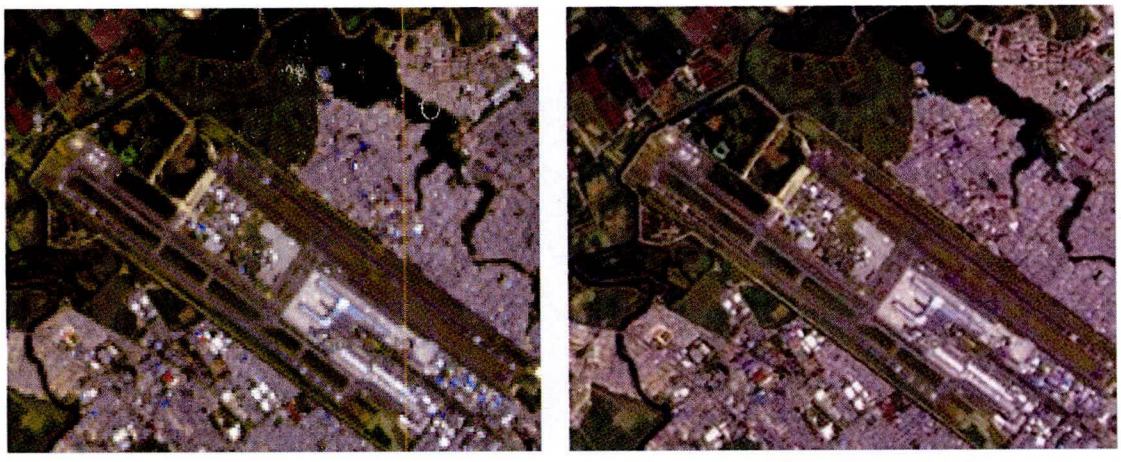
En la actualidad, existe una gran oferta de imágenes de sensores remotos de libre acceso como son: LANDSAT-8 OLI y SENTINEL-2, la ventaja de estos dos tipos

de imágenes es que son multiespectrales (con bandas infrarrojas para discriminar coberturas vegetales) y, por otra parte, que son recientes. En cuanto a temporalidad, para la ciudad de Bogotá D.C. se pueden obtener cada 16 días.

Como se mencionó anteriormente, se consiguieron imágenes LANDSAT-8 (30 de diciembre de 2018) y SENTINEL-2 (del 25 de diciembre de 2018), ambas con cobertura de nubes por debajo del 5% (para el área urbana de Bogotá).

Con la imagen LANDSAT-8 se realizó un proceso de realce mediante la composición de bandas en el software Arc/GIS, empleando las bandas de la 1 a la 8, mediante proceso Pansharp. Este procedimiento consiste en combinar las propiedades espaciales de la banda pancromática (banda 8) con las propiedades espectrales de las demás bandas, con el fin de aumentar el nivel de detalle del producto, pasando de pixeles originales de 30 metros a pixeles de 15 metros, con niveles digitales distintos a los originales (ver figura 5). Igualmente, a esta información se le hizo la reproyección al sistema de Magna Ciudad Bogotá, proyección Transverse Mercator.

Figura 5. Procesamiento de la imagen LANDSAT-8.



Nota: En la imagen izquierda se observa la composición de bandas 1 a 8 con resolución espacial de 30 m; en la imagen derecha se observa el mismo sector, con el proceso Pansharp (resolución espacial de 15 m). Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

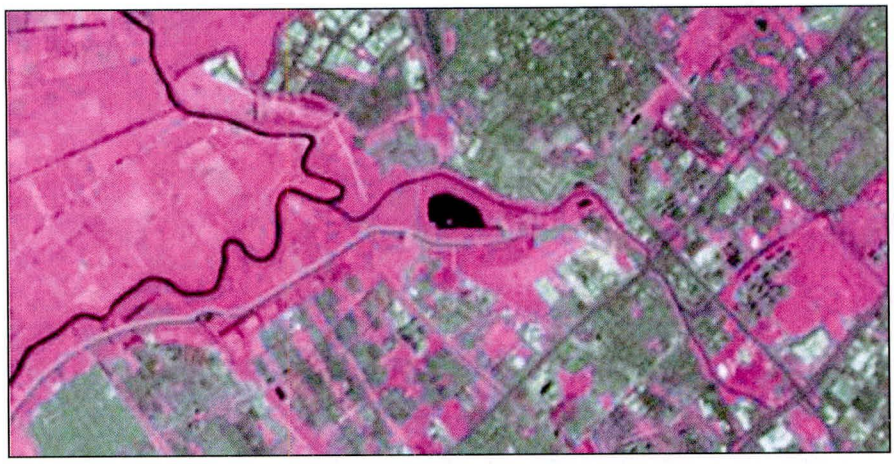
Sin embargo, dados los tamaños de pixel se identificó que la conformación espacial de los matorrales de la especie invasora en campo es de dimensiones pequeñas, que no alcanzan a ser cubiertas por los pixeles de la imagen LANDSAT-8, lo cual es un gran inconveniente para lograr la discriminación espectral propia del retamo en la zona urbana de Bogotá D.C.

Por otra parte, con la imagen SENTINEL, L1C _ T18NWL _ A018326 _ 20181225T153106, de fecha 25 de diciembre de 2018, luego de ser descargada de manera gratuita, específicamente el sector de la zona urbana de Bogotá D.C,

se procedió a unir las bandas en un solo archivo, con el programa especializado para procesamiento digital de imágenes ERDAS IMAGINE.

De acuerdo con las características de la imagen SENTINEL-2 descritas en la tabla 1, se hizo el procesamiento digital (*Resolution Merge*, en ERDAS IMAGINE), para dejar todas las bandas del rango visible (10 metros) e infrarrojas (20 metros) con tamaño de 10 metros (ver figuras 6, 7 y 8).

Figura 6. Vista de un sector de la zona urbana de Bogotá D.C. con SENTINEL-2.



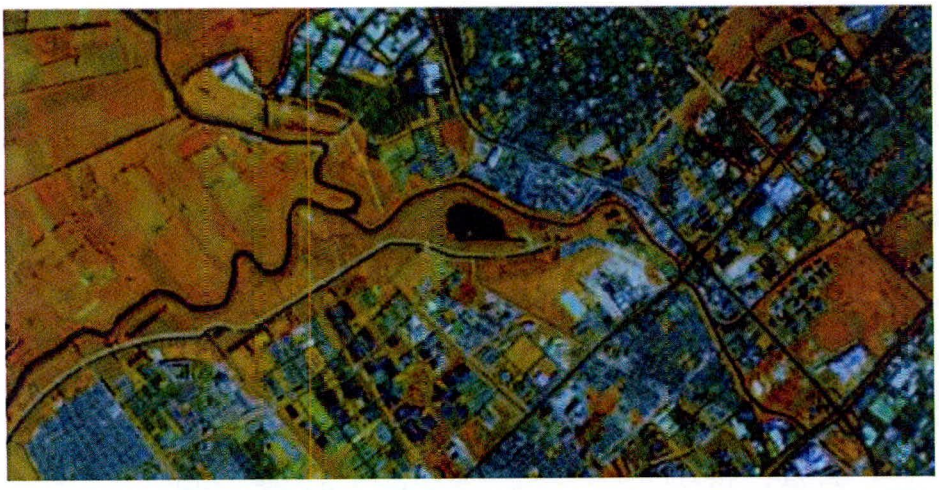
Nota: Imagen SENTINEL-2 L1C_T18NWL_A018326_20181225T153106 del 25 de diciembre de 2018, con las bandas infrarrojas de 20 metros (el color rosado muestra las zonas con vegetación). Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

Figura 7. Vista de un sector de la zona urbana de Bogotá D.C. con SENTINEL-2.



Nota: Vista de un sector de la zona urbana de Bogotá, D.C. con la imagen SENTINEL-2 L1C_T18NWL_A018326_20181225T153106 del 25 de diciembre de 2018, con las bandas visibles de 10 metros (el color verde muestra las zonas con vegetación). Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

Figura 8. Vista de un sector de la zona urbana de Bogotá D.C. con SENTINEL-2.



Nota: Vista de un sector de la zona urbana de Bogotá, D.C. con la imagen SENTINEL-2 L1C_T18NWL_A018326_20181225T153106 del 25 de diciembre de 2018, con una banda visible y dos infrarrojas de 10 metros, después de haber hecho el procedimiento de Resolution Merge (los colores naranjas y rojizos muestran las zonas con vegetación). Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

Después de hacer el procedimiento digital de *Resolution Merge*, las imágenes se desplegaron y con herramientas del programa ERDAS Imagine, en diferentes composiciones a color, se mejoró el contraste de la imagen, de manera que se diferencian las coberturas que se encuentran en la zona de estudio. Ver figuras 9 y 10.

La idea fue patronar la respuesta de la cobertura terrestre de interés, en este caso el retamo espinoso, con la información recogida en campo sobre la imagen.

Las imágenes LANDSAT-8 OLI y SENTINEL-2 vienen con corrección geométrica (georeferenciadas) en el sistema de proyección UTM Zona 18; de acuerdo con la información dada en la página https://www.usgs.gov/, los datos de precisión y exactitud planimétrica se encuentran dentro de los estándares, de acuerdo con el tamaño del pixel. A esta información se le hizo la reproyección al sistema de Magna Ciudad Bogotá, proyección Transverse Mercator.

Figura 9. Vista de un sector de la zona urbana de Bogotá D.C. con SENTINEL-2.



Nota: Imagen SENTINEL-2 L1C_T18NWL_A018326_20181225T153106 del 25 de diciembre de 2018, con una banda visible y dos infrarrojas de 10 metros, sin mejoramiento en contraste (los colores en la gama del naranja muestran las zonas con vegetación). Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

Figura 10. Vista de un sector de la zona urbana de Bogotá D.C. con SENTINEL-2.



Nota: Imagen SENTINEL-2 L1C_T18NWL_A018326_20181225T153106 del 25 de diciembre de 2018, con una banda visible y dos infrarrojas 10 metros, con mejoramiento en contraste (los colores en la gama del naranja muestran las zonas con vegetación). Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

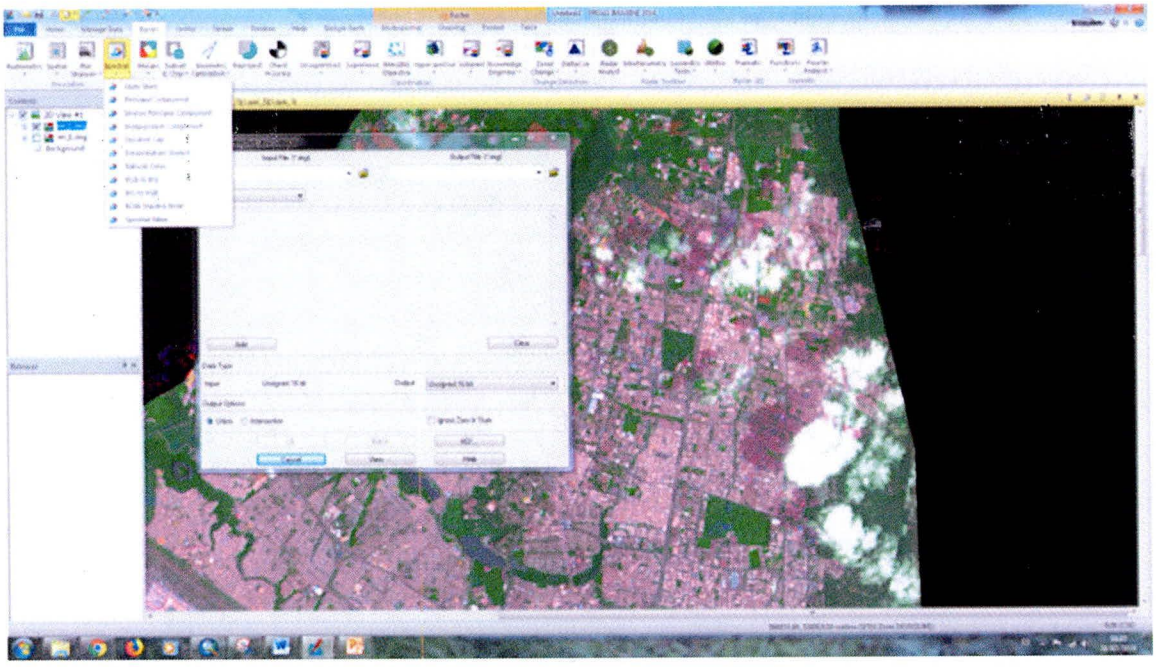
5.5.2 Pre-procesamiento de Imagen PLANET SCOPE, 2019

Con el objetivo tener mayor número de bandas con infrarrojos (cercanos y lejanos), se realizó un sinergismo con las 7 bandas infrarrojo (B4, B5, B6, B7, B8, B8A, B11 y B12) de la imagen SENTINEL, L1C_T18NWL_A018326_20181225T153106 con las 4 bandas de la imagen PLANET SCOPE, para lo cual se realizó el siguiente procedimiento en el Software ERDAS IMAGINE.

- **Pre-procesamiento de imagen SENTINEL 2.**

El primer paso fue unir las bandas infrarrojas con resolución espacial de 20 m (B5, B6, B7, B8A, B11 y B12) de la imagen SENTINEL 2, por medio del proceso conocido como *Layer Stack* (ver figura 11).

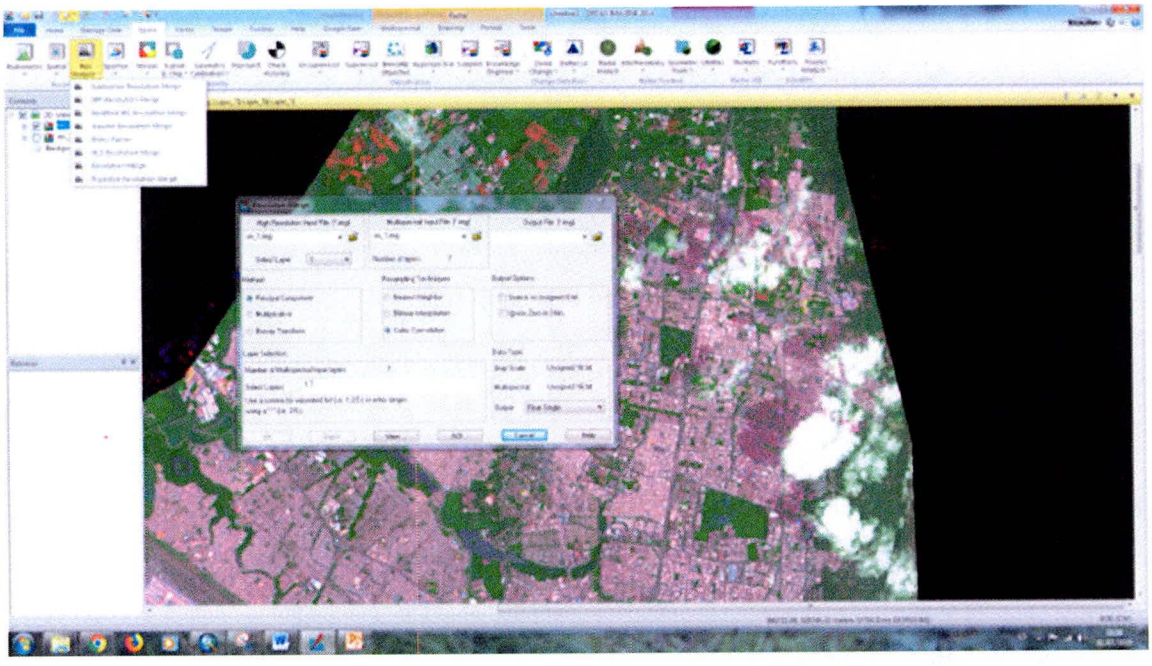
Figura 11. Layer Stack en el Software Erdas imagine.



Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

Posteriormente, se utilizó el procesamiento *Resolution Merge* para dejar las bandas de 20 m en una resolución espacial de 10 m, conservando su resolución espectral (ver figura 12). Para esto, se utilizó la banda 8 como imagen de mayor resolución (10 m) y el resultado del anterior proceso como imagen multiespectral de menor resolución (20 m en este caso).

Figura 12. Layer Stack en el Software Erdas imagine.



Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

Luego de este proceso se realizó un nuevo Layer Stack, obteniendo como resultado una imagen con 7 bandas y con 10 m de resolución espacial, ver figura 13.

Por último, este resultado (imagen de 7 bandas) se georreferenció, de manera que coincidiera con la imagen Planet Scope.

- **Sinergismo imagen SENTINEL 2 e imagen PLANET SCOPE.**

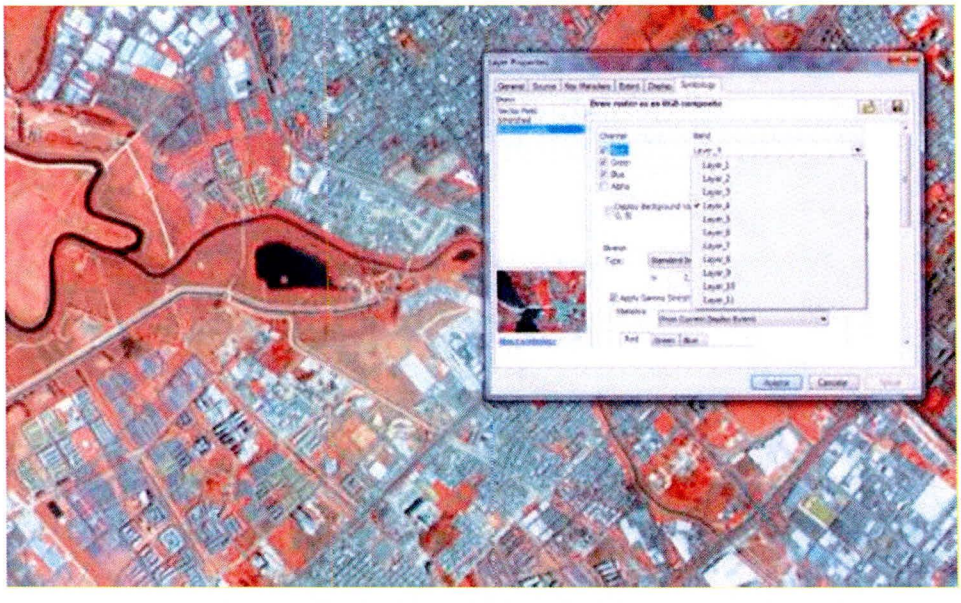
Una vez finalizado el preprocesamiento y georreferenciación de la imagen SENTINEL 2, se efectuó un proceso denominado *Resolution Merge* para obtener una imagen SENTINEL de 7 bandas y resolución espacial de 3 m, para lo cual se empleó la banda 4 de la imagen PLANET SCOPE, como imagen de mayor resolución, y el resultado obtenido del preprocesamiento de la imagen SENTINEL, como imagen multiespectral de menor resolución. Por último, se hizo un sinergismo, de manera que se fusionaron las 7 bandas de la imagen SENTINEL (ya convertidas a 3 metros) con las 4 bandas Imagen PLANET SCOPE, es decir, se obtuvo una imagen con 11 bandas y 3 metros de resolución espacial, ver figura 14.

Figura 13. Vista de un sector de la zona urbana de Bogotá, D.C. con la imagen SENTINEL-2.



Nota: Sinergismo con 7 bandas Sentinel (B4, B5, B6, B7, B8, B8A, B11 y B12) y resolución de 10 m. Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

Figura 14. Vista de un sector de la zona urbana de Bogotá, D.C. con sinergismo de imagen SENTINEL y PLANET SCOPE.



Nota: Sinergismos con 7 bandas de SENTINEL y las 4 bandas de la imagen PLANET SCOPE y 3 metros de resolución espacial. Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

5.5.3 Resultados y conclusiones de la inspección de imágenes gratuitas y de la imagen PLANET SCOPE.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, y según el análisis técnico de las diferentes imágenes de distribución gratuita, como son las correspondientes a los sensores SENTINEL-2 y LANDSAT-8 de fechas recientes, se identifica como aspecto positivo que dichas imágenes presentan facilidades de adquisición, son multiespectrales y la temporalidad y la cobertura de nubosidad son óptimas; sin embargo, por el tamaño de pixel (10 a 15 m), limita la generación de información final detallada, pues las salidas cartográficas estarían entre escalas 1:50.000 a 1:25.000, lo cual no es conveniente para la identificación del retamo ubicado en la zona urbana de Bogotá D.C., ya que en estas zonas, a diferencia de las zonas rurales, no se presenta tan concentrado ni en parches lo suficientemente extensos para ser captados por este tipo de sensores.

De acuerdo a muestras de campo, se observa que, en la zona urbana, las unidades de retamo tienen áreas pequeñas consolidadas; en las muestras iniciales se identificó que hay predominancia de áreas inferiores a 1000 m^2, lo cual es de esperar, dada la escasez de espacios verdes en la urbe.

También se observa que la invasora se presenta en estrecha asociación con otras coberturas (naturales y transformadas), y en muchos casos presentan crecimiento aislado y disperso, requiriéndose sensores que ofrezcan una mejor escala de trabajo, los cuales no se encuentran entre los analizados de libre acceso.

Por otra parte, los ortofotomosaicos IDECA 2014 y 2015 presentan muy buena resolución espacial, ideal para la identificación visual de la especie a escala 1:5000, sin embargo son dos los principales inconvenientes al trabajar con estas imágenes: en primer lugar, la temporalidad, ya que hay un lapso de 5 y 4 años, respectivamente, en relación a la época actual, tiempo en el que muy seguramente han ocurrido cambios en las coberturas de la especie de interés, ya sea por manejo dado por las autoridades ambientales, por incendios o por aumento del área de los parches o colonización de nuevos sitios, dado el carácter agresivo de invasión de *Ulex europaeus*. En segundo lugar, dicha imagen no tiene acceso al manejo multiespectral, por tanto, solo permitiría una interpretación visual, con lo cual no se podría hacer la automatización de procesos digitales de la imagen para el monitoreo.

Respecto a los ortofotomosaicos tomados con drones de los sectores Humedal de Juan Amarillo, Parque Entrenubes y Humedal de Techo, estos ofrecen buena resolución y también son un buen insumo para apoyar la interpretación visual mejorando en estos sectores la temporalidad, dado que la fecha de toma es de finales de 2018.

Respecto a la imagen PLANET SCOPE, se logró aumentar su número de bandas con ayuda del sinergismo realizado con la imagen gratuita SENTINEL 2, quedando un mosaico con una resolución espacial de 3 m, que mejora, en este sentido, la posibilidad de generar procesos digitales con 7 bandas del espectro infrarrojo.

La posibilidad de mejorar la resolución espectral (mayor número de bandas), permite hacer diferenciación de algunos tipos de cobertura, como es el caso de mezclas de pastos con vegetaciones arbóreas, así como zonas de humedales o zonas inundables. También es posible tener información relacionada con el tipo de suelo, aunque no es el objeto del presente análisis, como atributos especiales de bandas del infrarrojo medio y el infrarrojo lejano.

Por último, dentro de los productos disponibles en el mercado, la imagen PLANET SCOPE permite, a un bajo costo, el mejor nivel de escala posible para estudios de carácter local, reforzado por la resolución temporal del sensor (un paso diario), que mejora la probabilidad de monitoreo reciente del perímetro urbano de Bogotá D.C.

6 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DE SATÉLITE PARA IDENTIFICAR A LA ESPECIE INVASORA

6.1 IDENTIFICACIÓN DE LA ESPECIE INVASORA.

6.1.1 Características de la especie *Ulex europaeus* (retamo espinoso).

A continuación, se presenta una descripción de la especie invasora objeto de este contrato y se presentan las fichas descriptivas de los tipos de crecimiento, estados de desarrollo y asociación observadas en campo y registradas en la base de datos de información primaria y atributos del mapa de interpretación visual, al igual que los productos de procesamiento digital de la imagen PLANET SCOPE, según su pertinencia. Igualmente, se presenta el cuadro comparativo de cómo se visualizan los ejemplos tipo en las imágenes satelitales LANDSAT-8, SENTINEL-2, Ortofotomosaicos (IDECA, 2014-2015) e imagen PLANET SCOPE.

- **Especie invasora *Ulex europaeus* (retamo espinoso)**

Ulex europaeus L.	
	
Clase	Equisetopsida C. Agardh
Subclase	Magnoliidae Novák ex Takht.
Superorden	Rosanae Takht.
Orden	Fabales Bromhead
Familia	Fabaceae Lindl.
Género	*Ulex* L.

» **Origen**

El retamo espinoso, también conocido en Europa como tojo, aulaga, aliaga, árgoma, escajo, jabulaga, rebolla, otea, gorse, entre otros, es una especie autóctona en Galicia y en la Cornisa Cantábrica; posiblemente fue introducida en otras provincias del norte y centro de la Península Ibérica con fines forrajeros, abonos orgánicos, cama para el ganado y uso doméstico de carbón y leña; en las islas Canarias, fue introducida con las repoblaciones de pinos realizadas en la segunda mitad del siglo XX (Sanz et al, 2004).

En Galicia y en la Cornisa Cantábrica forma extensos matorrales (brezal-tojal), generalmente asociado a brezos (*Erica mackaiana, Erica ciliaris*), que sustituyen a los bosques climácicos (robledales o carbayedas, abedulares, hayedos, etc.) sobre suelos silíceos y pobres (Sanz et al, 2004).

» **Características de la especie**

Sanz et al (2004) lo define en el ambiente europeo como un arbusto de hasta 2,5 m de altura, sin embargo, hay datos en la literatura que indican que en arbustales de más de 30 años en Nueva Zelanda pueden llegar a los 7 m (Lee et al. 1986, citado en Díaz, 2009). Ríos (2005) cita que en Bogotá se pueden encontrar individuos hasta de 4 m de altura, en especial, cuando están mezclados con vegetación subarbórea o arbórea.

Su hábito de crecimiento puede ser erecto o rastrero, muy ramificado y enmarañado. Ramas de color verde oscuro, con 7-9 costillas longitudinales, las jóvenes con indumento formado por tricomas largos y patentes y otros cortos y adpresos. Espinas principales de hasta 4 cm, situadas en el extremo de las ramillas, rectas o algo arqueadas. Espinas secundarias y terciarias, a menudo fasciculadas e insertas en la base de las ramillas. Hojas reducidas a filodios espinosos, de sección triangular, de 5-12 mm, rígidos, de glabros a villosos. Flores amarillas, con bractéolas de 1,5-6 x 1,5-7,5 mm, ovado-lanceoladas, ovadas, suborbiculares o reniformes, con pubescencia variable, más anchas que el pedicelo que mide 3-13 mm. Cáliz de 10-20 mm, pubescente, aplanado lateralmente, hendido hasta la base en dos lóbulos rematados en 2 y 3 pequeños dientes respectivamente, con aspecto bilabiado. Corola con el estandarte y las alas sobrepasando muy poco al cáliz. Estandarte oval o redondeado, de 12-21 x 8-17 mm, glabro, a menudo escotado en el ápice. Alas de 12-21 x 3-6,5 mm. Quilla netamente más corta que las alas, de 11-16 x 4-7 mm. Androceo con 10 estambres monoadelfos. Gineceo con el ovario piloso y el estilo arqueado. Fruto en legumbre de 10-20 x 5-7 mm, de longitud similar a la del cáliz que es persistente, aovado-oblongo u oboval, velloso, con 2-8 semillas en su interior. Semillas ovoideas, algo aplanadas, de 2,1-2,8 x 1,8-2,4 mm, con la testa lisa y brillante, pardas, con estrofíolo (Sanz, et al 2004).

Las plántulas presentan inicialmente hojas trifoliadas y, posteriormente, se desarrollan hojas reducidas debajo de las espinas; en juveniles y adultos las ramas son espinosas, profundamente surcadas y pueden ramificarse en grado secundario y terciario.

Los arbustos conforman parches densos de difícil penetración, lo cual se favorece al quedar materia muerta en pie, acumulando así ramas secas en las partes bajas del arbustal, lo cual potencia el inicio de incendios en estos matorrales y favorece la población, dado que luego de una quema esta se rejuvenece a partir de rebrotes o plántulas (Puentes & Basanta 2002 en Díaz, 2009).

Debido a su gran capacidad de adaptación, múltiples tipos de propagación y desplazamiento de los ecosistemas naturales, está incluido en la lista de las cien especies invasoras más agresivas del mundo (Invasive Species Specialist Group, 1998).

» **Floración**

En Europa, se reporta que florece de diciembre a junio, aunque en climas suaves con influencia oceánica puede florecer durante casi todo el año (Sanz, et al 2004). En zonas tropicales presenta flores y frutos durante todo el año (Ríos 2002). Su polinización es entomófila por abejas y abejorros (Díaz, 2009; Pinilla et al 2016).

» **Propagación**

El arbusto tiene la capacidad de reproducirse por vía sexual y asexual, esta última mediante rebrotes de las yemas radiculares. La dispersión por semillas es de tipo explosivo siendo lanzadas entre 2 y 6 m de distancia desde la planta madre (Hoshovsky, 1989, citado en Ríos 2005). Aunque la propagación de la semilla es principalmente barócora, también puede ser dispersada por el viento, el agua y transportada por hormigas, roedores, aves y por el mismo hombre en sus implementos de labranza (Parsons, 1958 en Hoshovsy, 1989 citados en Ríos 2005, Díaz, 2009).

Las semillas son muy longevas, conforman bancos de semillas persistentes de hasta 30 años en el suelo (Lee et al. 1986, citado en Díaz, 2009) que conservan viabilidades superiores al 80% (Hoshovsky 1989, citado en Díaz, 2009); la germinación se activa con la entrada de luz, agua y cambios en la temperatura (Rees y Hill 2001, Ivens 1978, citados en Díaz, 2009); luego de un disturbio se expresan masivamente, aunque sólo sea el 25% del banco de semillas en los primeros cinco centímetros del suelo (Ivens 1982, citado en Díaz, 2009).

» **Requerimientos Ambientales**

En el ambiente europeo se describe como una especie silicícola, propia de terrenos ácidos o calizos descarbonatados, que necesita humedad ambiental, por lo que prefiere los climas con influencia marítima y lluviosos, igualmente tiene altos requerimientos de luz, pues no prospera en condiciones de sombreado (Sanz, et

al 2004). En el trópico crece bien en la mayoría de los tipos de suelos, tolerando bastante bien suelos alterados, pobres y ácidos (Ríos, 2005).

El retamo espinoso (*Ulex europaeus*) se reporta principalmente en los pisos bioclimáticos subandino y andino; se ha evidenciado su capacidad de invasión en ecosistemas de alta montaña, como el caso de los páramos secos en donde, gracias a su carácter pirófilo, su capacidad de rebrote puede verse favorecida (Vargas et al 2009).

Ocampo y Solorza (2017) estimaron que hay heterogeneidad en la distribución altitudinal del banco de semillas de *U. europaeus*, y su mayor expresión puede localizarse sobre la cota de los 3.100 metros de altura; esto podría evidenciar el avance de la especie en zonas de páramo.

De acuerdo con lo encontrado por Torres (2009), los parches de retamo espinoso pueden establecerse en las zonas abiertas como pastizales y cultivos, representando sitios potenciales para nuevas invasiones, donde su establecimiento se ve favorecido por la entrada directa de la luz y suelos pobres que dificultan el establecimiento de otras especies (León y Vargas, 2009).

» **Aspectos normativos respecto al complejo invasor conformado por retamo espinoso (*Ulex europaeus*) y retamo liso (*Genista monspessulana*).**

En Colombia, en el 2008, fueron declaradas por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible ciertas especies de plantas exóticas como invasoras, entre las cuales se destacaron el retamo liso y el retamo espinoso (Resolución 0848 del 23 de mayo de 2008). Posteriormente, el mismo ministerio, mediante la Resolución 0207 del 3 de febrero de 2010, adicionó el listado de especies exóticas invasoras declaradas por el artículo primero de la Resolución 848 de 2008 y se tomaron otras determinaciones.

Por otra parte, la Resolución 469 del 11 de marzo de 2009, de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), adoptó la veda de las especies Retamo Espinoso (*Ulex europaeus)* y Retamo Liso (*Teline monspessulana*) dentro del territorio de su jurisdicción. Posteriormente, la Secretaria Distrital de Ambiente hace lo propio con la Resolución 7615 del 4 de noviembre de 2009, donde se prohíbe, en el perímetro urbano de Bogotá, la plantación, el trasplante, la venta, la distribución y la comercialización de las especies Retamo Espinoso (*Ulex europaeus)* y Retamo Liso (*Teline monspessulana*).

En el 2011, se publicó el "Plan Nacional para la Prevención, el Control y Manejo de las especies introducidas, trasplantadas e invasoras" (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), 2011) en el cual ambas especies invasoras quedan identificadas como de alto riesgo para el país. Posteriormente, el Plan Nacional de Restauración (MADS 2015) reconoció a las invasiones biológicas como uno de los impulsores que generan la pérdida y transformación de los ecosistemas en el país (UNESIS-CAR, 2017).

La Resolución No. 684 (MADS,2018), establece los lineamientos para la prevención y manejo integral de las especies de retamo espinoso (*U. europaeus*) y retamo liso (*G. monspessulana*), así como para la restauración ecológica, rehabilitación y recuperación de las áreas afectadas por estas especies en el territorio nacional, cuya implementación le corresponde a las Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible, Parques Nacionales Naturales de Colombia, las Unidades Ambientales de los Grandes Centros Urbanos (artículo 66 de la Ley 99 de 1993) y los Establecimientos Públicos Ambientales (Ley 768 de 2002 y Ley 1617 de 2013) citado en González (2018).

6.1.2 Fichas de resumen de las principales características de la especie *Ulex europaeus* (retamo espinoso) definidas en campo para fines de su identificación en la imagen satelital.

Dado que se partió de un mapa de polígonos, producto de la interpretación visual de Ortofotomosaicos (2014-2015), Google earth (2016-2019), Street-view (2016-2019) y verificaciones de campo, se realizó una categorización de las variantes de crecimiento (Tabla 14) que presenta la especie invasora en relación a cómo pueda afectar esto su detección en imágenes de sensores remotos; por otra parte, se realizó también una categorización de sus estados de desarrollo (Tabla 15), con el fin de plantear la posibilidad de analizar si estos diferentes estados se podían discriminar en el proceso digital a realizar en las imágenes de satélite..

Igualmente, se presenta un registro de las asociaciones más reiteradas del retamo con otras coberturas (Tabla 16), como un indicador de coberturas que puedan enmascarar las respuestas espectrales de los complejos de retamo.

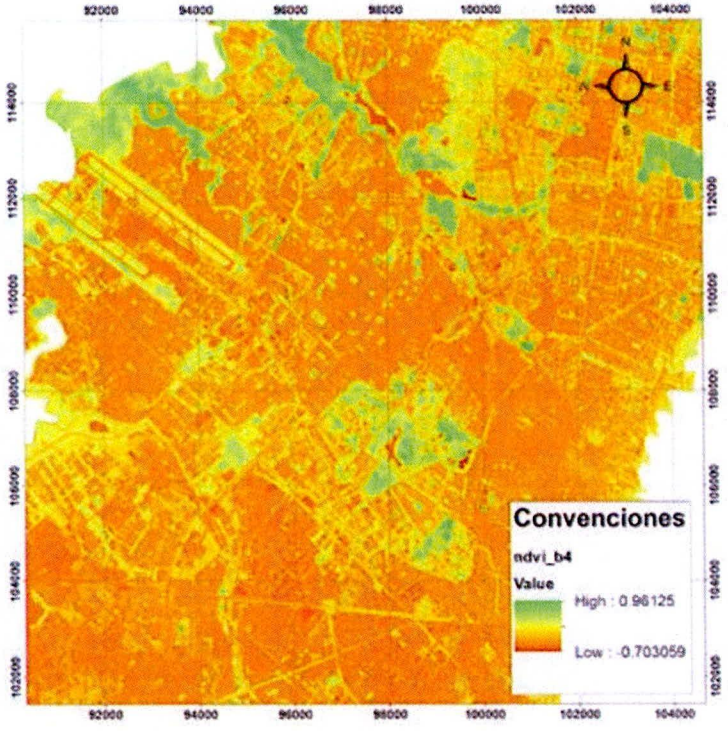
También se presenta en la ficha, la comparación de la vista de las diferentes imágenes utilizadas LANDSAT-8, SENTINEL-2 y Ortofotomosaicos (2014, 2015), e imagen PLANET SCOPE, de tal manera que se aprecie la variación en cuanto a su visualización, respecto al recurso digital utilizado, lo cual está directamente relacionado con el tamaño del pixel y el tipo de sensor utilizado (ver tablas 14 a 16).

6.1.3 Identificación del Área Potencial de Retamo (APR) con imagen Planet Scope 2019.

Debido a que el comportamiento espectral de la vegetación es muy característico respecto a otras coberturas (agua, tejido urbano, suelo desnudo, entre otras), el paso inicial fue separar en dos grupos generales la escena a clasificar o interpretar, en Zonas con vegetación y Zonas sin vegetación. El proceso se realizó con el software QGis.3.6.

Para este paso, se utilizó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) para cada una de las bandas de infrarrojo utilizadas: "*NIR Planet Scope(B4), Vegetation Red edge (B5 Sentinel), Vegetation red edge (B6 Sentinel), Vegetation red edge (B7 Sentinel), NIR (B8 Sentinel), Narrow NIR (B8A Sentinel), SWIR-1 (B11 Sentinel) y SWIR-2 (B10)*". Estos generan valores entre -1 y +1, siendo Zonas sin vegetación todos aquellos pixeles con valores menores a aproximadamente 0,2 y Zonas con vegetación todos los pixeles mayores a 0,2, aproximadamente. El resultado es una salida en formato raster, con lo cual se puede determinar el área potencial de retamo (APR); ver figura 15.

Figura 15. Índice de vegetación de diferencia normalizada.



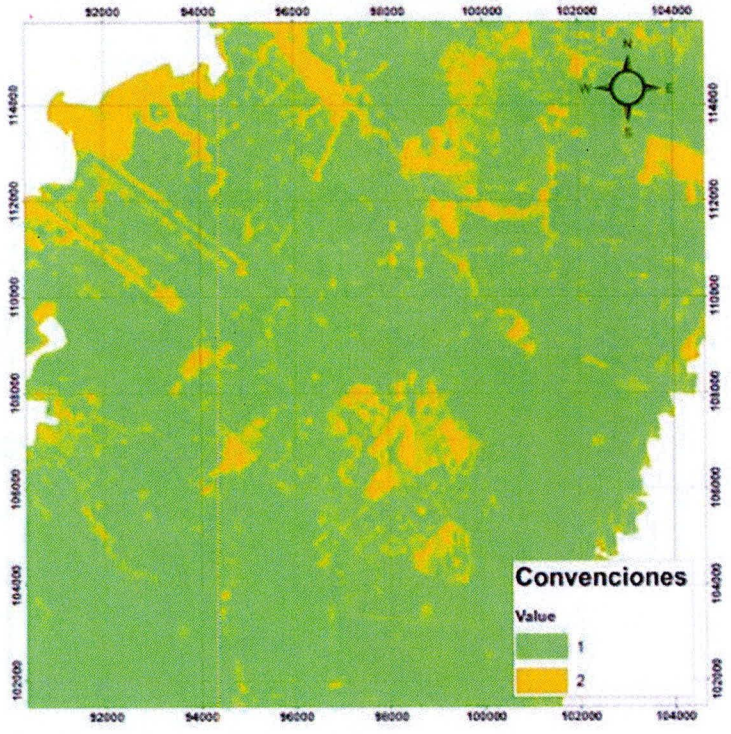
Nota: (NDVI) Con el Infrarrojo cercano (NIR) imagen PLANET SCOPE.

Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

- **Reclasificación del raster en áreas con y sin vegetación**

Se realizó la reclasificación de la imagen correspondiente al NDVI, dando la siguiente orden al software utilizado: todos los valores de los pixeles <0,2 convertirlos a 1 y todos los valores de los pixeles >=0,2 convertirlos a 2. Con ello se obtuvo un raster con dos colores o dos valores digitales (1 y 2), para el cual el valor numérico 1 representa las Zonas sin vegetación y el valor 2 representa las Zonas con vegetación (ver figura 16).

Figura 16. Reclasificación de la imagen en Zonas con vegetación y Zonas sin vegetación.



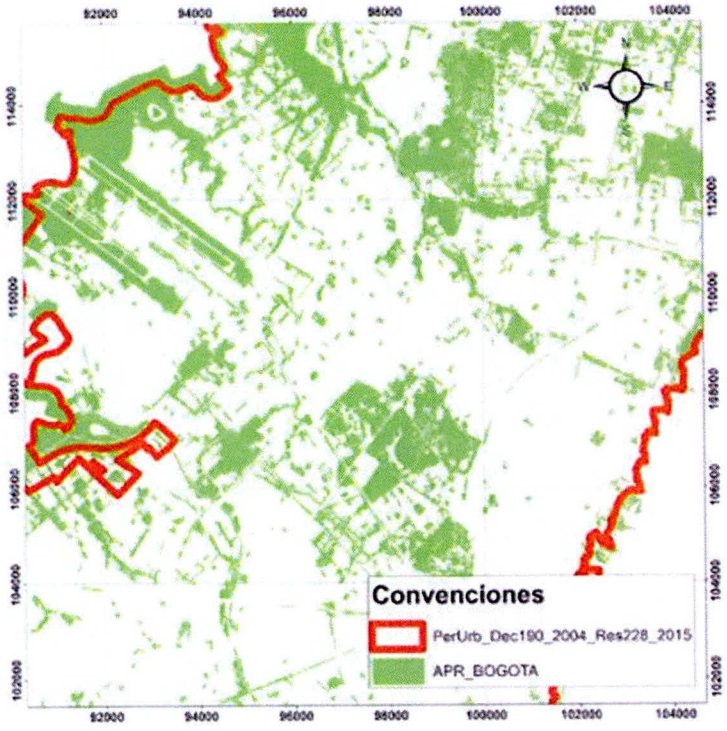
Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

- **Vectorización de las Zonas con vegetación o área potencial de retamo (APR)**

Por último, se realizó la conversión de formato raster a formato shape, de las zonas ya reclasificadas, eliminando la Zona sin vegetación, puesto que no es de interés o potencial para la localización de retamo. Así mismo, en los polígonos que

conforman las Zonas con vegetación, se realizó un post procesamiento, el cual consistió en eliminar los polígonos inferiores al área mínima cartografiable (625 m^2), la cual se estableció de acuerdo a la escala de trabajo (1:5000).

Figura 17. Vista de un sector de la imagen que muestra el Área potencial de retamo (APR) identificado para el área urbana de Bogotá D.C.



Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

Según los resultados obtenidos para la zona urbana de Bogotá D.C., el área con zonas verdes y desarrollo de vegetación es de 8.850,6 ha que corresponde al 23,3 %, del área total del perímetro de la ciudad (37.945,2 ha), dentro de esta área se considera el potencial desarrollo de crecimientos de retamo.

Se observó una mayor cantidad de áreas verdes hacia el norte de la ciudad en las localidades de Suba, Usaquén y Engativá, originados gracias a las áreas en pastos y zonas de humedales, seguidas por las localidades de Usme al sur de la ciudad por la presencia de áreas seminaturales y agrícolas, y Fontibón en sector centro occidental de la ciudad, como se aprecia en el **Mapa 4;** también se puede consultar en formato PDF (Mapas Documento), al igual que en la base de datos espacial del proyecto, en el Anexo cartográfico (**Anexo 1**).

6.1.4 Identificación de composición de las bandas espectrales en las cuales se identifica el retamo espinoso con imagen PLANET SCOPE 2019 y sinergismo.

En primera medida, se realizó un análisis estadístico entre bandas. La matriz de correlación muestra los valores de los coeficientes de correlación que representan la relación entre dos bandas. En el caso de un conjunto de bandas, la matriz de correlación presenta los valores de celda de una banda, a medida que se relacionan con los valores de celda de otra banda. La correlación entre las bandas es una medida de dependencia entre las bandas. Es la relación de la covarianza entre las bandas, dividido por el producto de su desviación estándar.

La correlación varía de +1 a -1, donde una correlación positiva indica una relación directa entre dos bandas; tal como cuando los valores de celda de una capa aumentan, es probable que los valores de celda de otra capa también aumenten. Por otra parte, una correlación negativa significa que una variable cambia de manera inversa a la otra, mientras que una correlación de cero significa que las bandas son independientes entre sí.

Para la identificación preliminar de las bandas para el muestreo de retamo espinoso (*Ulex europaeus*), se realizó el análisis de correlación para la imagen de PLANET SCOPE, obteniendo como resultado que las bandas de mayor correlación, para los puntos de muestreo de retamo, son: banda 2 (Green), Banda 3 (Red) y Banda 4 (NIR- infrarrojo cercano); y las distintas combinaciones (4-3-2, 4-2-3, 3-4-2 y 2-3-4); lo anterior se ve referenciado en la Tabla 17.

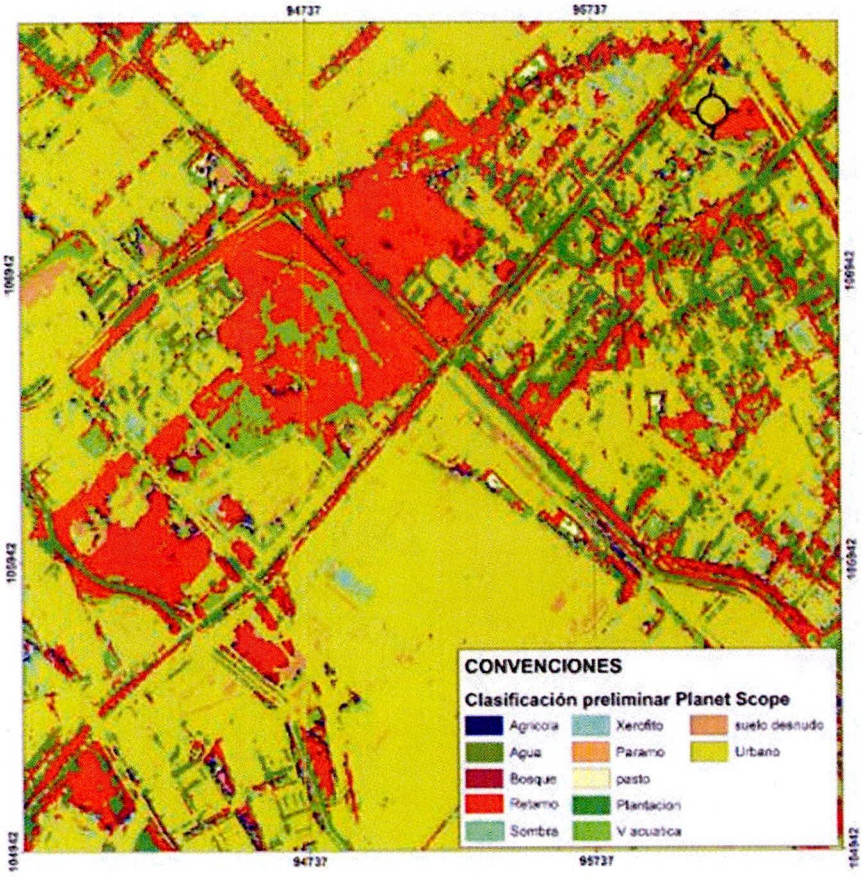
Tabla 17. Análisis del Coeficiente de correlación entre las bandas de imagen Planet Scope para la especie *Ulex europaeus* L.

BANDA	B1 (BLUE)	B2 (GREEN)	B3 (RED)	B4 (NIR)
B1 (BLUE)		0.944	0.910	0.120
B2 (GREEN)	0.944		0.944	0.910
B3 (RED)	0.910	0.944		0.965
B4 (NIR)	0.120	0.910	0.965	

Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

La anterior tabla muestra que la banda cuatro presenta una correlación del 91,0 % con la banda 2 (Green) y del 96,5 % con la banda 3 (Red); la banda Azul presentó una correlación inversa del 12,0 %.

Figura 18. Clasificación preliminar no supervisada con imagen PLANET SCOPE



Fuente: GEOTEM S.A.S., 2019.

Para la búsqueda de una mejor clasificación se realizó el ejercicio de sinergismo con la imagen SENTINEL (Sentinel_L1C_T18NWL_A018326_20181225T153106), para aumentar el número de rangos espectrales, con el fin de obtener una mejor clasificación para la especie de retamo (*Ulex europaeus*); de esta forma, se obtuvo una mayor información en los valores de los pixeles identificados con la cobertura de estudio.

Se procedió luego a realizar el análisis de correlación para la cobertura de estudio entre las bandas, para determinar preliminarmente cuales son las que mayor relación tienen y en qué composición presentan mayor utilidad para identificar la cobertura de estudio, tal como se resalta en la tabla 18.

Tabla 18. Análisis del Coeficiente de correlación entre las bandas del sinergismo PLANET SCOPE - SENTINEL para la especie *Ulex europaeus* L.

Bandas	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7	b8	b9	b10	b11
b1		0.97	0.96	0.49	0.38	0.48	0.47	0.37	0.47	0.48	0.38
b2	0.97		0.98	0.55	0.45	0.53	0.51	0.42	0.52	0.56	0.45
b3	0.96	0.98		0.50	0.46	0.48	0.45	0.36	0.46	0.57	0.47
b4	0.49	0.55	0.50		0.59	0.98	0.96	0.94	0.96	0.71	0.45
b5	0.38	0.45	0.46	0.59		0.52	0.40	0.52	0.39	0.90	0.91
b6	0.48	0.53	0.48	0.98	0.52		0.97	0.88	0.97	0.64	0.37
b7	0.47	0.51	0.45	0.96	0.40	0.97		0.87	0.99	0.55	0.24
b8	0.37	0.42	0.36	0.94	0.52	0.88	0.87		0.87	0.58	0.34
b9	0.47	0.52	0.46	0.96	0.39	0.97	0.99	0.87		0.55	0.24
b10	0.48	0.56	0.57	0.71	0.90	0.64	0.55	0.58	0.55		0.91
b11	0.38	0.45	0.47	0.45	0.91	0.37	0.24	0.34	0.24	0.91	

Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

Se obtuvo que las bandas con mayor correlación entre ellas, con respecto a los puntos muestreados, son:

La banda 4 (NIR Planet Scope), banda 6 (*Vegetation red edge- VRE 2* Sentinel), banda 7 (*VRE3* Sentinel) y la banda 9 (*Narrow NIR*). Por lo anterior, se tienen las siguientes composiciones: 4-6-7, 4-6-9, 4-7-6, 4-7-9, 4-9-6, 4-9-7, 6-4-7, 6-4-9, 6-7-9, 6-7-4, 7-4-6, 7-4-9, 7-6-9, 7-6-4, 7-9-4, 7-9-6, 9-4-6, 9-4-7, 9-6-4, 9-6-7, 9-7-4, 9-7-6.

6.1.5 Definición de firmas espectrales de Retamo con imagen Planet Scope 2019.

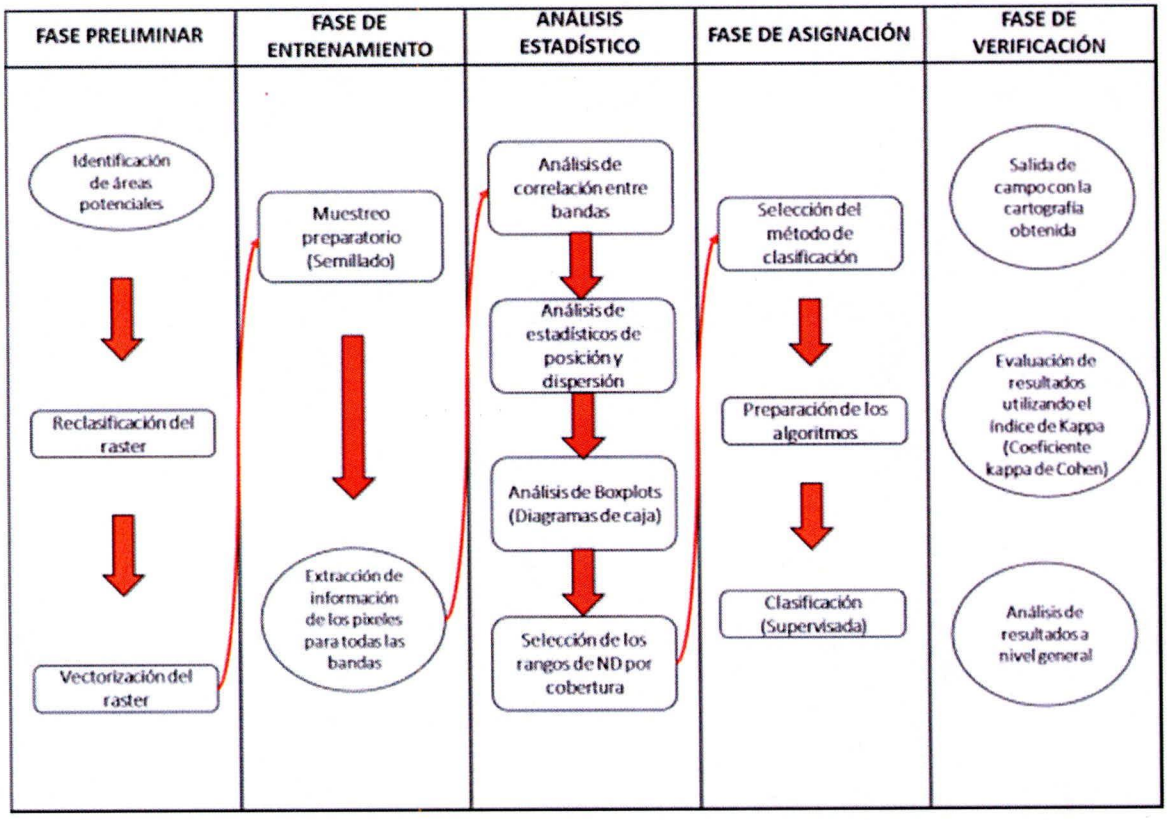
Para la identificación de la firma espectral para el retamo espinoso (*Ulex europaeus*), se realizó el ejercicio de identificación de los pixeles con sus valores, para cada una de las bandas del sinergismo.

El objetivo de una clasificación consiste en agrupar los píxeles que posean una misma característica. Generalmente la característica tomada es el valor digital de los mismos, que corresponderá con un tipo de cobertura del terreno. Básicamente, la clasificación digital de imágenes satelitales consiste en un método estadístico

por el cual, a través de un muestreo de píxeles, se agrupa en categorías o clases al resto de los píxeles de una imagen.

Dentro del flujo de trabajo llevado a cabo para la clasificación de coberturas a partir de imágenes satelitales, se siguieron las siguientes fases: 1) Fase preliminar, 2) Fase de entrenamiento o definición numérica de las categorías, 3) Análisis estadístico, 4) Fase de asignación o categorización de los píxeles de la imagen y 5) Fase de verificación de resultados; (ver figura 19).

Figura 19. Flujograma de trabajo para la identificación de Retamo.



Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

- Fase preliminar

Esta consiste en seleccionar del área total de trabajo y con base en criterios gruesos, los sitios con mayor probabilidad de encontrar a la especie invasora en la zona urbana, mediante la identificación del Área Potencial de Retamo (APR), que se remite a descartar las áreas duras o construidas de la ciudad y deja como sitios

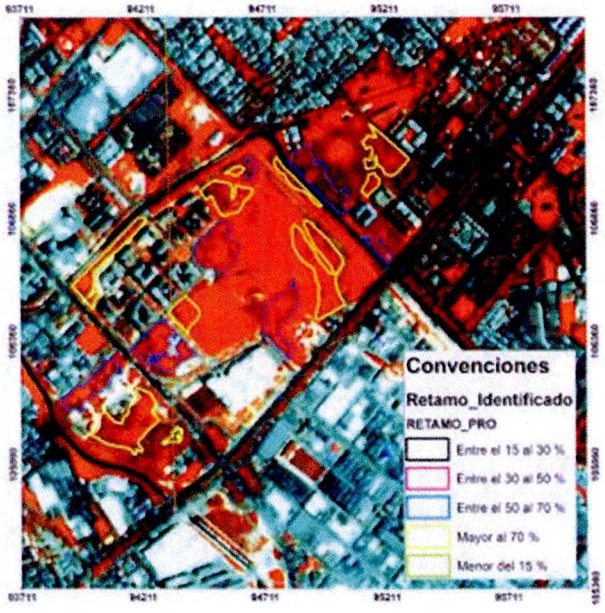
potenciales de presencia de retamo las zonas verdes incluidas dentro del perímetro urbano. Este aspecto se desarrolló en el numeral 6.1.3.

- Fase de entrenamiento o definición numérica de las categorías

- **Muestreo preparatorio (Semillado)**

Con base en los puntos y polígonos de control tomados en la fase inicial de campo, en los cuales se tenía la certeza de la presencia de la especie invasora, al igual que sus descripciones especificas en relación a crecimiento, desarrollo, coberturas colindantes y asociaciones, se hizo una selección sobre la imagen de las áreas con Retamo. Dicha información, al estar georefenciada en campo, y con asistencia del intérprete de coberturas, permitió realizar una acertada selección e identificación de los sitios de interés (*Clusters*), como se aprecia en la figura 20.

Figura 20. Polígonos identificados en campo para el muestreo de la cobertura



Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

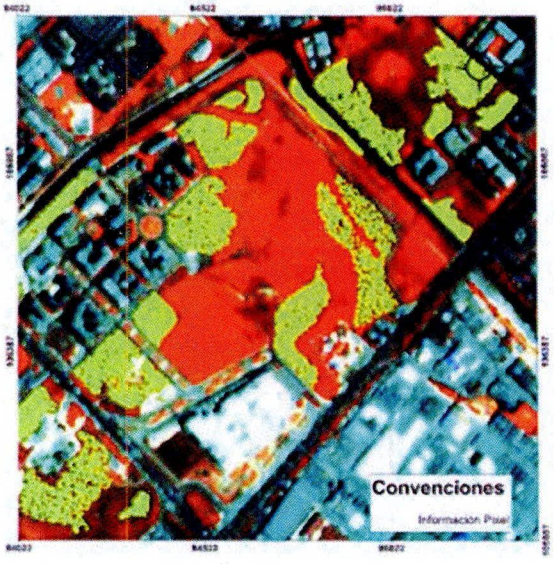
- **Extracción de información de los pixeles**

Las imágenes satelitales están conformadas por una matriz de pixeles, siendo estos el mínimo elemento de detalle que un sistema sensor puede captar, determinando con ello la resolución espacial que tendrá la imagen. Dicho de otra forma, los pixeles se encuentran agrupados en imágenes multiespectrales

formadas por varias bandas, que representan la reflectancia de las distintas coberturas en cada una de las bandas del espectro electromagnético.

Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó la extracción de la información contenida dentro de los pixeles que se encontraban dentro de las áreas de interés o áreas identificadas con el muestreo preliminar. Dicha información podía estar contenida en forma de Niveles Digitales (ND) que, por lo general, corresponden a 8, 16 o 32 bytes, o en forma de reflectancia, la cual se genera a partir de una serie de cálculos matemáticos que corrigen las diferentes fuentes de variación en la información contenida por la imagen satelital (sensor, iluminación, condiciones atmosféricas, entre otras), tal como se ilustra en la figura 21.

Figura 21. Extracción de la información de los pixeles



Fuente: GEOTEM S.A.S., 2019.

- Análisis estadístico de la información

La capacidad que tiene el ojo humano para la identificación de coberturas crece a medida que el nivel de detalle de la imagen a clasificar aumenta (mayor resolución espacial). Sin embargo, algunas coberturas vegetales muy específicas presentan una mayor complejidad en su identificación, debido a que tienden a confundirse con otras. Si bien es cierto, el ojo humano es la principal fuente de información en la interpretación visual y la asignación de *clusters*, se pueden presentar fallas inherentes al intérprete como el cansancio visual (entre otros factores), lo cual conlleva a la identificación errónea y a confusiones entre clases o categorías, que al final se ven reflejados en los resultados.

Para disminuir este tipo de error, se aplicó un método estadístico que permitió separar por rangos de información las diferentes clases temáticas ya identificas o interpretadas, teniendo en cuenta que la visualización del histograma de una imagen de satélite, por sí sola, no puede interpretarse como el contenido o la respuesta espectral de los elementos de la imagen de satélite. Por lo anterior, fue necesario calcular algunos parámetros estadísticos para determinar la correlación que existe entre las bandas y, de esta manera, escoger la combinación de ellas que resultaba más efectiva para la interpretación o clasificación de los datos que almacenaba la imagen satelital.

- **Estadísticos de posición y dispersión**

Por otra parte, se realizó el análisis estadístico más específico, es decir, entre valores numéricos de cada cobertura. Para ello, se analizaron los siguientes estadísticos: Media, Mediana, Moda, Cuartiles (Cuartiles), Valor mínimo, Valor máximo, Rango, Desviación estándar, Coeficiente de variación y Límites de confianza.

Con esta información se graficaron los resultados, siendo la mejor forma de visualización e interpretación los Boxplots o Diagramas de cajas, los cuales, partiendo de la idea de que a cada clase temática le corresponde un rango especifico de información, permitieron observar los campos de cruce entre los rangos de cada cobertura y la distribución de los diferentes valores extraídos de los pixeles seleccionados en la fase de entrenamiento (ver tabla 19 y **Anexo 3.** Cálculos de valores de pixeles).

Tabla 19. Estadísticos analizados en el ejercicio de sinergismo PLANET SCOPE – SENTINEL

B	Variable	Arbustales	Pastos	Suelos desnudos	Vegetación Acuática	Vegetación arbórea	Vegetación arbórea 2	Vegetación arbórea 3	Retamo	Retamo 2	Retamo 3
1	Promedio	5310.98	6002.68	7918.75	5922.42	5411.25	5886.64	4455.37	5524.71	5627.50	5066.95
1	Mediana	5310.00	6166.50	7687.50	5933.50	5463.00	5875.00	4310.00	5496.50	5634.00	5068.50
1	Límite Inferior	5091.98	4514.30	5739.63	5512.92	5006.25	5781.64	3474.37	5049.59	5502.63	5029.07
1	Límite Superior	5529.98	7491.05	10097.88	6331.92	5816.25	5991.64	5436.37	5999.84	5752.38	5104.82
2	Promedio	4819.20	5842.01	7818.18	5617.10	4920.09	5265.84	3984.38	5060.93	5228.17	4594.51
2	Mediana	4812.00	5956.00	7491.00	5642.50	4978.00	5255.00	3878.00	5027.00	5225.00	4606.50
2	Límite Inferior	4598.70	4385.88	5090.06	5087.60	4467.09	5121.84	3129.38	4467.31	4992.30	4449.01
2	Límite Superior	5039.70	7298.13	10546.31	6146.60	5373.09	5409.84	4839.38	5654.56	5464.05	4740.01
3	Promedio	3851.10	4887.11	7576.17	4372.09	3925.67	4260.40	3036.32	4134.65	4284.66	3659.86
3	Mediana	3829.00	4780.50	7211.00	4384.00	3973.00	4247.00	2920.00	4105.50	4278.50	3654.50
3	Límite Inferior	3606.60	3093.86	4780.54	3988.84	3523.67	4072.90	2161.82	3507.27	4003.03	3453.98
3	Límite Superior	4095.60	6680.36	10371.79	4755.34	4327.67	4447.90	3910.82	4762.02	4566.28	3865.73
4	Promedio	6192.48	9543.03	7778.37	11824.10	5961.89	6077.39	5295.83	6240.10	6663.92	5295.83
4	Mediana	6179.00	9602.50	7452.50	12515.00	5784.00	5906.00	5224.00	6324.50	6767.00	5224.00
4	Límite Inferior	4971.48	5174.28	5245.24	8255.60	4139.39	5244.89	3594.83	5073.85	5155.67	3594.83
4	Límite Superior	7413.48	13911.78	10311.49	15392.60	7784.39	6909.89	6996.83	7406.35	8172.17	6996.83
5	Promedio	847.89	1391.74	1908.27	2248.31	806.13	867.24	668.44	851.53	912.37	649.64
5	Mediana	853.00	1327.00	1639.00	2382.50	767.00	863.00	641.00	825.00	913.00	701.00
5	Límite Inferior	606.39	681.11	527.52	480.18	408.63	619.74	353.44	562.03	604.50	200.39
5	Límite Superior	1089.39	2102.36	3289.02	4016.43	1203.63	1114.74	983.44	1141.03	1220.25	1098.89
6	Promedio	2002.36	3495.12	2597.38	4765.95	1869.15	1917.62	1522.42	1995.45	1691.77	1691.77
6	Mediana	2024.00	3459.50	2496.00	5110.00	1790.00	1839.00	1490.00	2026.00	1734.50	1734.50

B	Variable	Arbustales	Pastos	Suelos desnudos	Vegetación Acuática	Vegetación arbórea	Vegetación arbórea 2	Vegetación arbórea 3	Retamo	Retamo 2	Retamo 3
6	Límite Inferior	1429.36	1447.62	1401.51	3210.45	966.15	1424.12	701.92	1436.32	665.77	665.77
6	Límite Superior	2575.36	5542.62	3793.26	6321.45	2772.15	2411.12	2342.92	2554.57	2717.77	2717.77
7	Promedio	2384.97	4388.65	2901.73	5695.54	2248.02	2302.72	1841.97	2416.28	2653.48	2067.42
7	Mediana	2390.00	4348.50	2779.00	6070.00	2134.00	2179.00	1786.00	2437.50	2740.50	2155.00
7	Límite Inferior	1711.47	1569.78	1754.61	3711.79	1198.02	1788.22	853.47	1753.28	1528.48	814.55
7	Límite Superior	3058.47	7207.53	4048.86	7679.29	3298.02	2817.22	2830.47	3079.28	3778.48	3320.30
8	Promedio	2407.78	4548.70	3231.78	5768.13	2260.93	2339.72	1890.86	2368.09	2659.87	1989.49
8	Mediana	2387.00	4507.50	3079.00	5926.00	2137.00	2243.00	1855.00	2402.50	2667.50	1994.50
8	Límite Inferior	1380.28	1616.57	2008.53	4194.25	1224.43	1733.72	773.36	1388.97	1560.00	490.99
8	Límite Superior	3435.28	7480.82	4455.03	7342.00	3297.43	2945.72	3008.36	3347.22	3759.75	3487.99
9	Promedio	2595.50	4849.87	3078.22	6127.18	2461.40	2509.32	2016.99	2642.10	2915.07	2254.21
9	Mediana	2610.00	4883.00	3028.00	6466.50	2345.00	2372.00	1975.00	2672.00	3014.00	2332.50
9	Límite Inferior	1860.50	1830.37	2049.97	3983.30	1328.90	1978.32	971.49	1869.23	1712.82	863.71
9	Límite Superior	3330.50	7869.37	4106.47	8271.05	3593.90	3040.32	3062.49	3414.98	4117.32	3644.71
10	Promedio	1373.72	2501.32	2718.70	3295.41	1287.34	1338.89	1067.32	1445.83	1620.42	1128.99
10	Mediana	1365.00	2456.00	2327.00	3463.50	1225.00	1324.00	1032.00	1425.00	1609.50	1178.00
10	Límite Inferior	931.22	1134.07	874.83	986.54	535.84	944.39	468.82	994.70	1082.30	558.99
10	Límite Superior	1816.22	3868.57	4562.58	5604.29	2038.84	1733.39	1665.82	1896.95	2158.55	1698.99
11	Promedio	707.68	1292.67	1854.98	1972.86	687.38	741.18	567.52	798.88	877.93	557.58
11	Mediana	697.00	1214.50	1567.00	2042.50	638.00	732.00	541.00	754.50	869.00	603.00
11	Límite Inferior	418.18	478.54	642.61	151.86	273.38	474.18	228.52	442.26	516.43	166.83
11	Límite Superior	997.18	2106.79	3067.36	3793.86	1101.38	1008.18	906.52	1155.51	1239.43	948.33

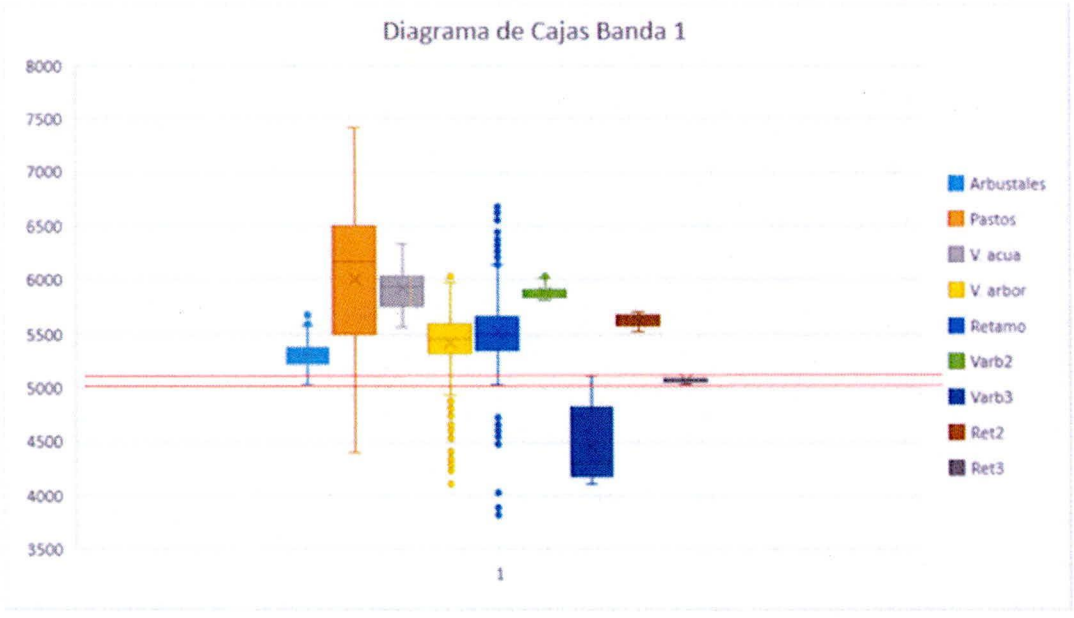
Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

- **Selección de rangos**

Con la información obtenida anteriormente, se realizó la selección de los rangos numéricos (ND), dentro de los cuales se pueden identificar las diferentes coberturas, puesto que se conocen los "*Outliers*" (valores excepcionalmente lejanos del centro), media y límites de confianza.

En la figura 22, se observa el diagrama de cajas para la Banda 1 del Sinergismo entre la PLANET SCOPE y SENTINEL, en el que se evidencia que el rango o firma de número digital (ND) se encuentra entre 5.056 y 5.082, los cuales son los valores de la cobertura de retamo que no presentan entrecruzamiento con las demás, como se aprecia en la figura 22 enmarcado entre líneas rojas.

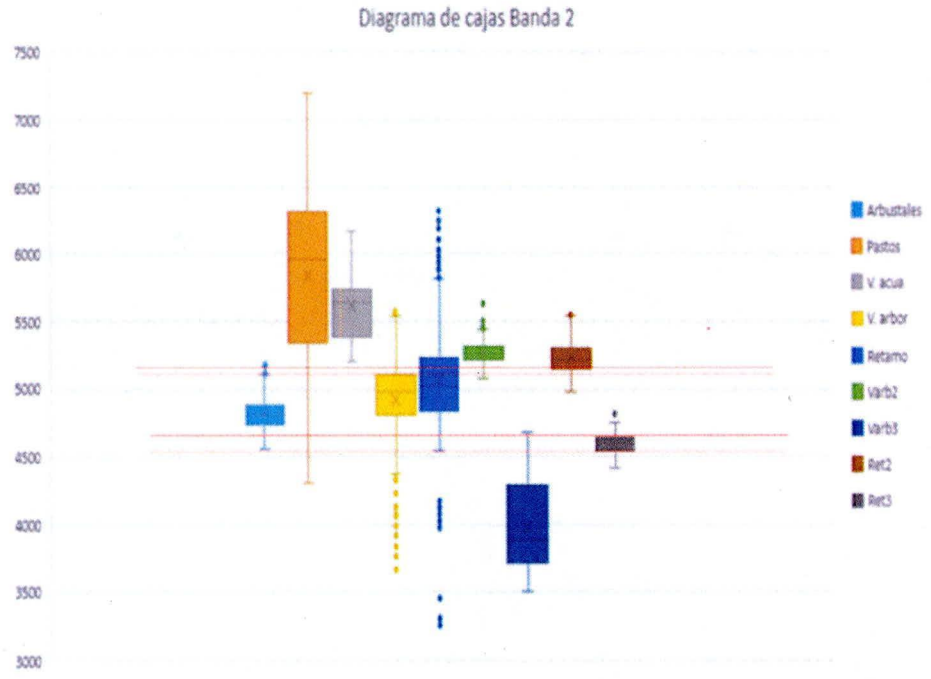
Figura 22. Identificación de rango de la cobertura de retamo sin entremezclamiento con otras coberturas para la banda 1 Sinergismo Planet Scope - Sentinel



Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

En la figura 23 se observa el diagrama de cajas para la Banda 2 del sinergismo entre la PLANET SCOPE y SENTINEL, en el que se observa que el rango o firma de número digital (ND) se encuentra entre los rangos 4.542 a 4.639 y 5.108 a 5.215, los cuales son los valores de la cobertura.

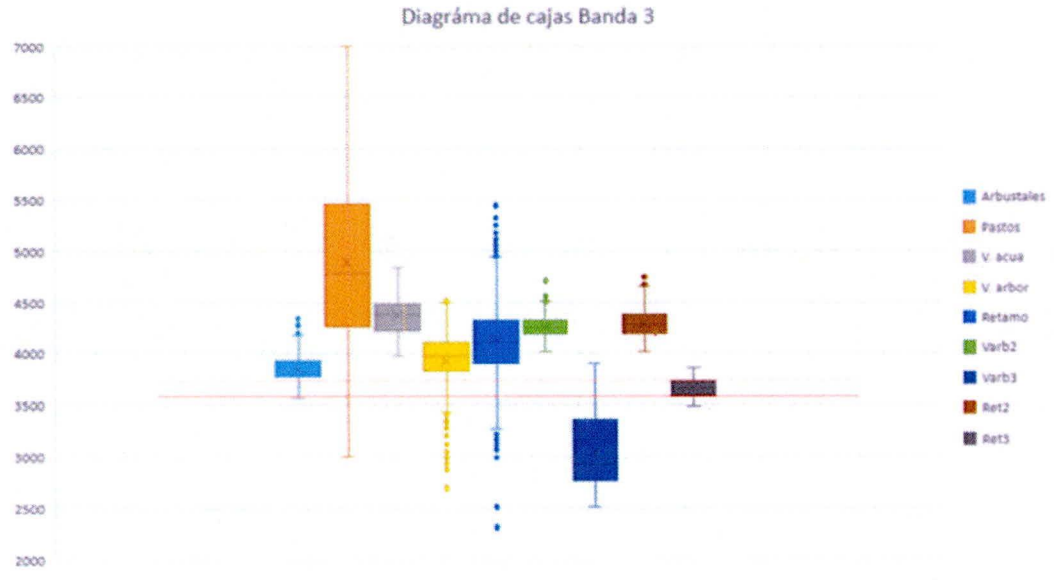
Figura 23. Identificación de rango de la cobertura de retamo sin entremezclamiento con otras coberturas para la banda 2 Sinergismo PLANET SCOPE - SENTINEL



Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

En la figura 24, se observa el diagrama de cajas para la Banda 3 del Sinergismo entre la PLANET SCOPE y SENTINEL, en el que se observa que el rango o firma de número digital (ND) se encuentra en el rango de 3.593,75 a 3.731, los cuales son los valores de la cobertura.

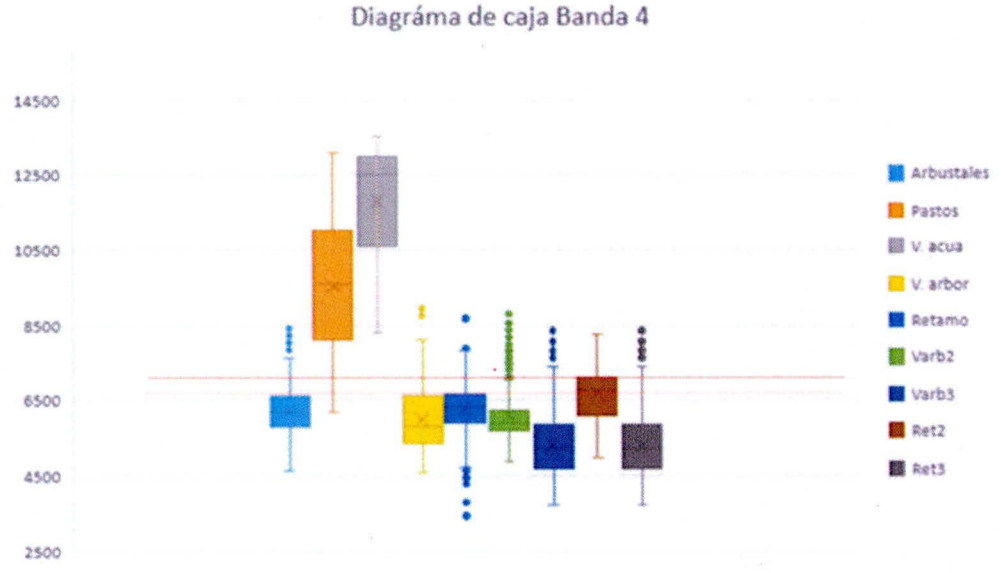
Figura 24. Identificación de rango de la cobertura de retamo sin entremezclamiento con otras coberturas para la banda 3 Sinergismo PLANET SCOPE - SENTINEL



Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

En la figura 25, se observa el diagrama de cajas para la Banda 4 del Sinergismo entre la PLANET SCOPE y SENTINEL, en el que se observa que el rango o firma de número digital (ND) se encuentra en el rango de 6.600 a 7.096,75, los cuales son los valores de la cobertura.

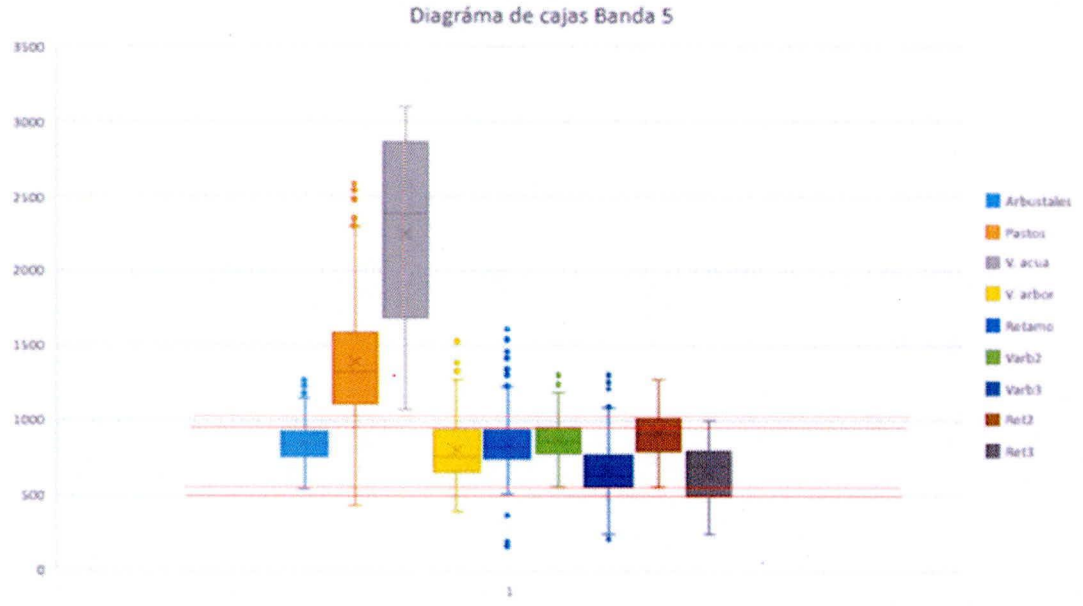
Figura 25. Identificación de rango de la cobertura de retamo sin entremezclamiento con otras coberturas para la banda 4 Sinergismo PLANET SCOPE – SENTINEL.



Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

En la figura 26, se observa el diagrama de cajas para la Banda 5 del Sinergismo entre la PLANET SCOPE y SENTINEL, en el que se observa que el rango o firma de número digital (ND) se encuentra entre los rangos de 496 a 559 y 949 a 1006, los cuales son los valores de la cobertura.

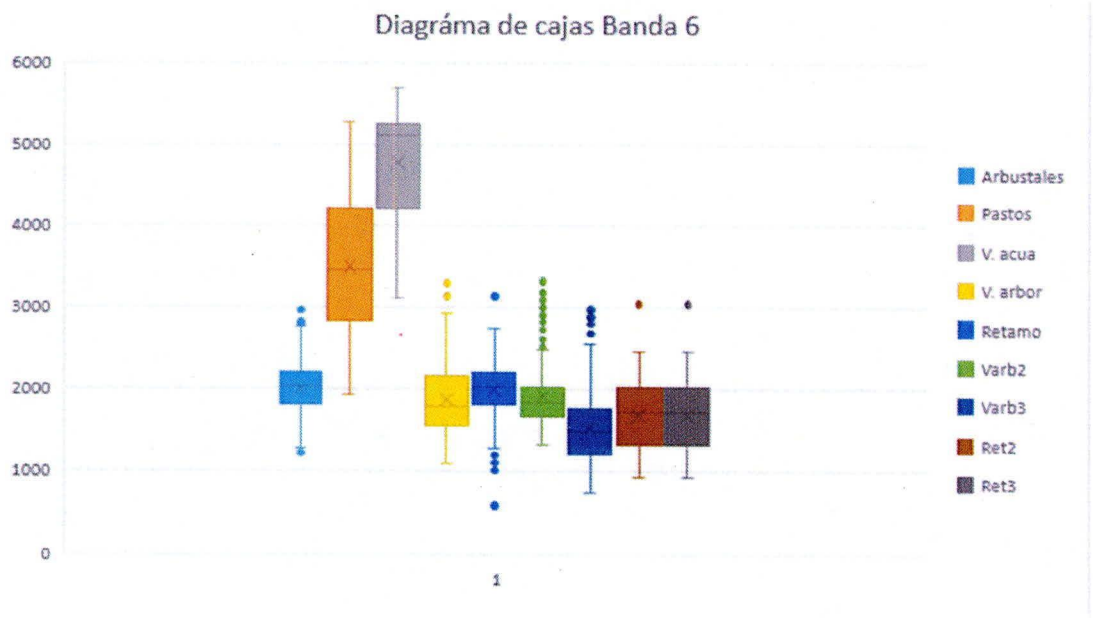
Figura 26. Identificación de rango de la cobertura de retamo sin entremezclamiento con otras coberturas para la banda 5 Sinergismo PLANET SCOPE – SENTINEL.



Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

En la figura 27, se observa el diagrama de cajas para la Banda 6 del Sinergismo entre la PLANET SCOPE y SENTINEL, en el que se observa la cobertura de retamo evaluada, traslapada o confundida con otras coberturas (Vegetación arbórea), sin encontrar rangos libres para su trabajo.

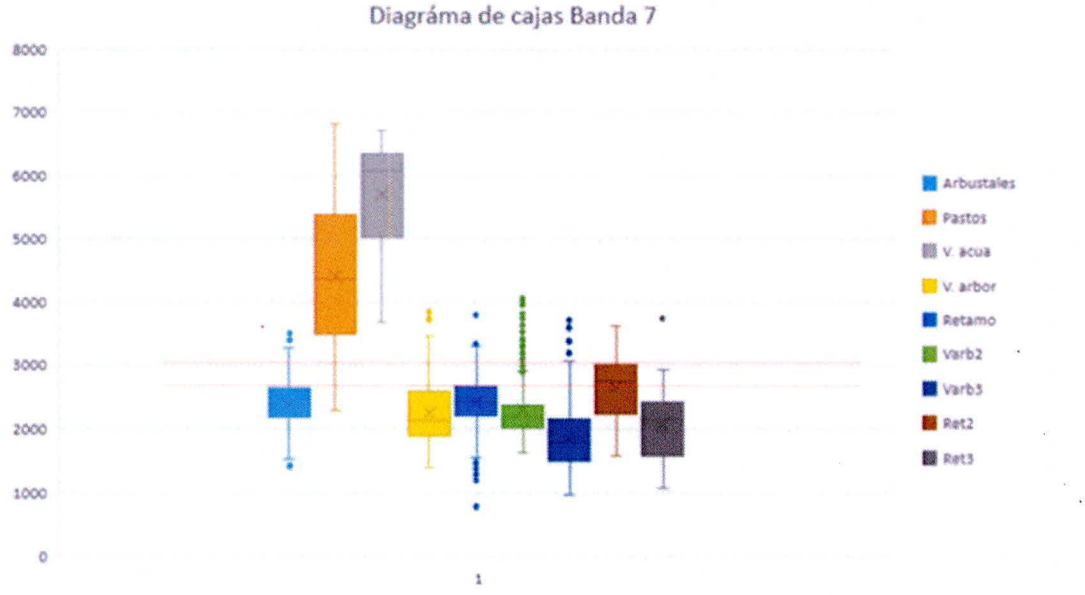
Figura 27. Identificación de rango de la cobertura de retamo sin entremezclamiento con otras coberturas para la banda 6 Sinergismo PLANET SCOPE - SENTINEL



Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

En la figura 28, se observa el diagrama de cajas para la Banda 7 del Sinergismo entre la PLANET SCOPE y SENTINEL, en el que se observa que el rango o firma de número digital (ND) se encuentra entre el rango de 2.627 a 2.998, los cuales son los valores de la cobertura.

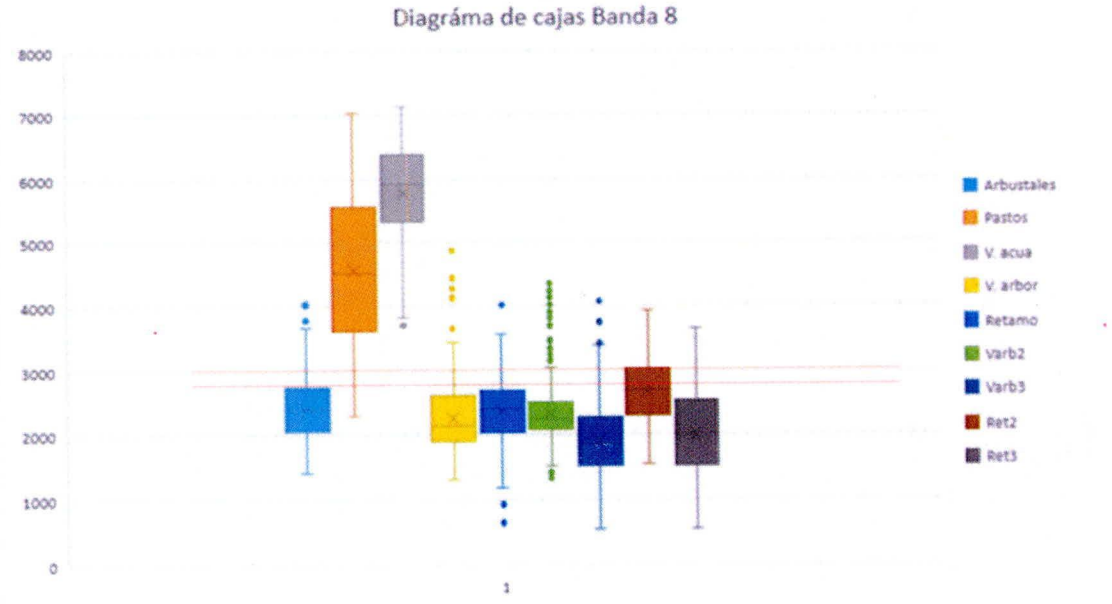
Figura 28. Identificación de rango de la cobertura de retamo sin entremezclamiento con otras coberturas para la banda 7 Sinergismo Planet Scope - Sentinel



Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

En la figura 29, se observa el diagrama de cajas para la Banda 8 del Sinergismo entre la PLANET SCOPE y SENTINEL, en el que se observa que el rango o firma de número digital (ND) se encuentra entre el rango de 2.734 a 3.013,75, los cuales son los valores de la cobertura.

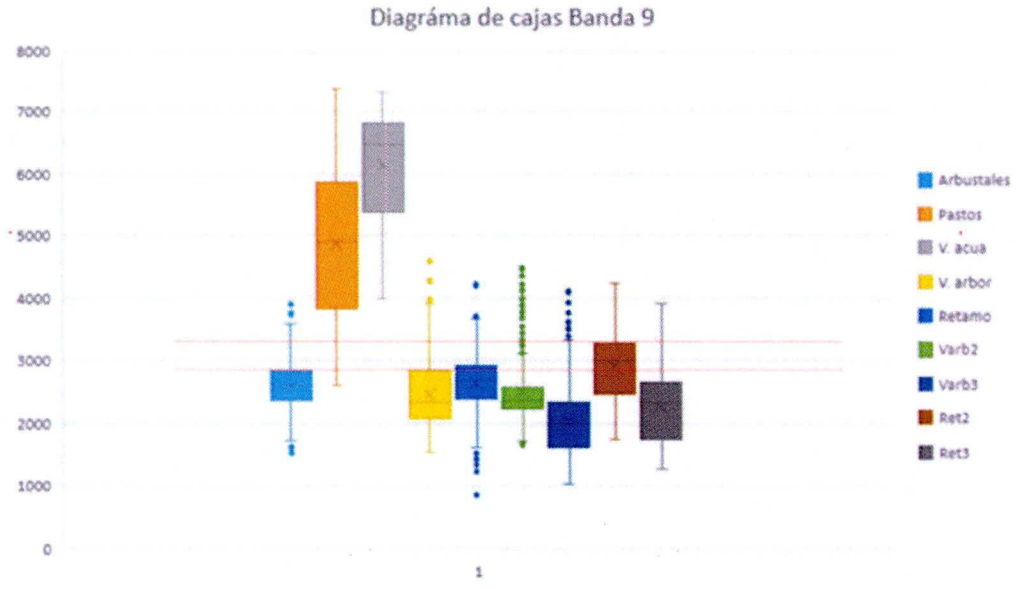
Figura 29. Identificación de rango de la cobertura de retamo sin entremezclamiento con otras coberturas para la banda 8 Sinergismo Planet Scope - Sentinel



Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

En la figura 30, se observa el diagrama de cajas para la Banda 9 del Sinergismo entre la PLANET SCOPE y SENTINEL, en el que se observa que el rango o firma de número digital (ND) se encuentra entre el rango de 2.831 a 3.265, los cuales son los valores de la cobertura.

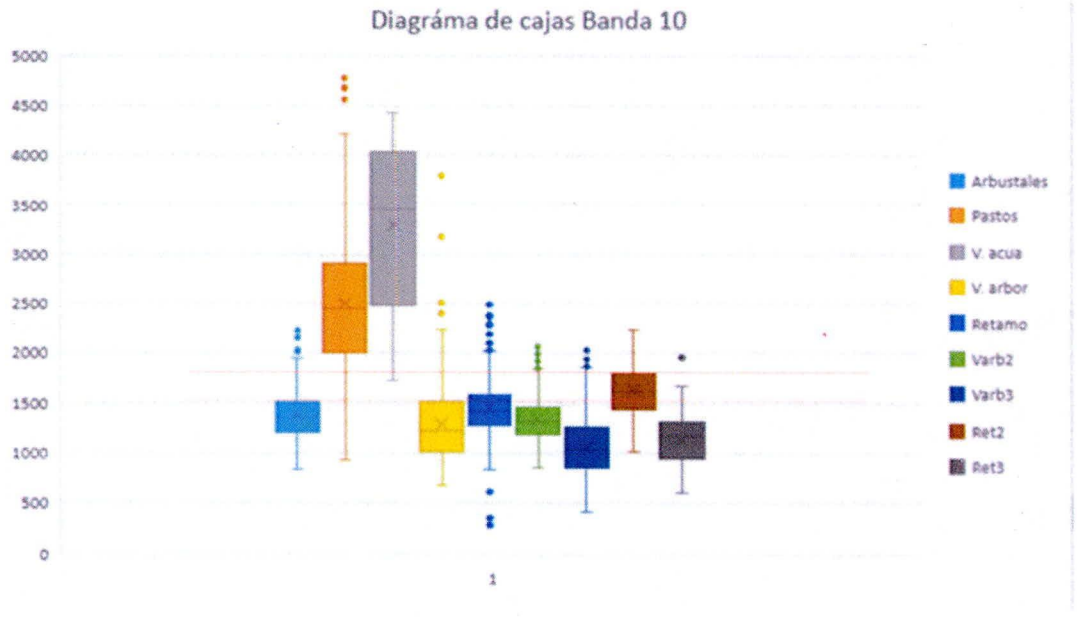
Figura 30. Identificación de rango de la cobertura de retamo sin entremezclamiento con otras coberturas para la banda 9 Sinergismo Planet Scope – Sentinel



Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

En la figura 31, se observa el diagrama de cajas para la Banda 10 del Sinergismo entre la PLANET SCOPE y SENTINEL, en el que se observa que el rango o firma de número digital (ND) se encuentra entre el rango de 1.514 a 1.778,25, los cuales son los valores de la cobertura.

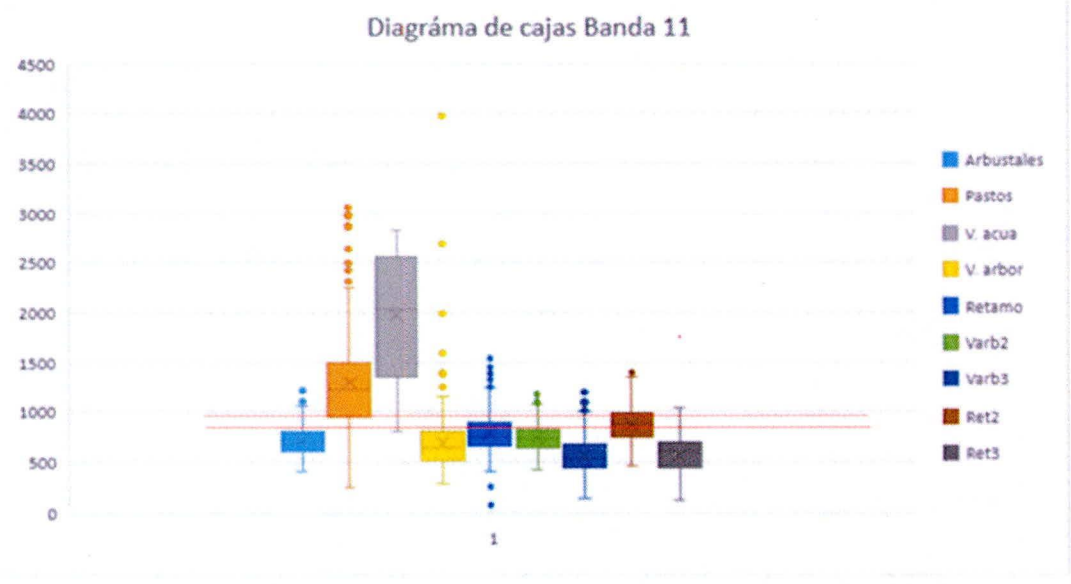
Figura 31. Identificación de rango de la cobertura de retamo sin entremezclamiento con otras coberturas para la banda 10 Sinergismo PLANET SCOPE - SENTINEL



Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

En la figura 32, se observa el diagrama de cajas para la Banda 11 del Sinergismo entre la PLANET SCOPE y SENTINEL, en el que se observa que el rango o firma de número digital (ND) se encuentra entre el rango de 823 a 954.75, los cuales son los valores de la cobertura.

Figura 32. Identificación de rango de la cobertura de retamo sin entremezclamiento con otras coberturas para la banda 11 Sinergismo PLANET SCOPE - SENTINEL



Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

Los valores medios de reflectancia identificados para la cobertura de retamo se encuentran descritos en la Tabla 20.

De acuerdo a los anteriores resultados se puede analizar que las bandas 1, 2 y 3 al estar muy correlacionadas presentan un comportamiento similar en la vegetación lo que dificulta diferenciar de manera clara el complejo invasor.

En relación con las bandas del espectro infrarrojo, se observa que la mayoría de las coberturas vegetales analizadas presentan valores de reflectancia equivalentes, saliéndose de este patrón la vegetación acuática y los pastos.

En síntesis, en términos de reflectancia no se identifica una firma espectral única para la especie invasora, por lo cual se recurre a otros métodos automáticos para reducir la incertidumbre

Tabla 20. Valores de reflectancia para la cobertura de retamo espinoso en el ejercicio de sinergismo PLANET SCOPE – SENTINEL

	BANDA	Wavelength (µm)
VALORES DE REFLECTANCIA PARA LA COBERTURA DE RETAMO	B1 - Blue (Planet Scope)	0.1158 - 0.1181
		0.1207 - 0.1238
	B2 - Green (Planet Scope)	0.1091 - 0.1119
		0.1145 - 0.1184
	B3 - Red (Planet Scope)	0.0969 - 0.1001
		0.1031 - 0.1096
	B4 - NIR (Planet Scope)	0.03069 - 0.0333
	B2 - Blue (Sentinel)	0.0342 - 0.0436
		0.0518 - 0.065
	B3 - Green (Sentinel)	0.0376 - 0.0434
	B4 - Red (Sentinel)	0.0467 - 0.0662
		0.0748 - 0.0801
	B5 - VRE1 (Sentinel)	0.0831 - 0.1023
		0.1959 - 0.2366
	B6 - VRE2 (Sentinel)	0.2463 - 0.3076
	B7 - VRE3 (Sentinel)	0.3035 - 0.3569
	B8 - NIR (Sentinel	0.2419 - 0.3041
	B8A - NARROW NIR (Sentinel)	0.2698 - 0.3436
	SWIR-1 (Sentinel)	0.1535 - 0.1928
	SWIR-2 (Sentinel)	0.0771 - 0.0864
		0.0916 - 0.1195

Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

➢ Fase de asignación o categorización de los píxeles de la imagen

- **Selección del método de asignación de píxeles**

En los diferentes *softwares* de procesamiento de imágenes satelitales, tanto libres como licenciados, se pueden encontrar diversas herramientas de clasificación, tanto supervisada como no supervisada. No obstante, algunos investigadores como Del Toro *et al.* (2015) se han centrado en comparar los resultados obtenidos mediante distintos métodos de clasificación, tales como Máxima Verosimilitud (clasificador convencional), SMAP (clasificador contextual) y *Random Forest* (clasificador perteneciente al conjunto de técnicas de aprendizaje automático).

Por otra parte, hay una tendencia creciente en el uso de estos últimos, teniendo en cuenta que anteriormente a las máquinas de cómputo se les dificultaba correr los algoritmos necesarios para su ejecución, mientras que, para este tiempo, dichas máquinas presentan mejores características, lo cual permite ejecutar los algoritmos sin problema, aunque uno de los mayores inconvenientes es que el tiempo de ejecución es proporcional a la cantidad de iteraciones a las que se somete el algoritmo.

Para citar algunos ejemplos, Del Toro *et al.* (2015), encontraron que uno de los mejores métodos de clasificación de imágenes satelitales es el *Random Forest*; Borràs *et al.* (2017) utilizaron los métodos de clasificación LDA (Linear *Discriminant Analysis*), TREE (Árbol de decisión), K-NN, y RF (*Random Forest*), encontrando que los mejores clasificadores fueron K-NN y *Random Forest*; Argañaraz & Entraigas (2011) realizaron un análisis comparativo entre las máquinas de soporte vectorial y el clasificador de máxima probabilidad, encontrando que las máquinas de soporte vectorial tuvieron mejores desempeños con tamaños de áreas de entrenamiento mayores para todas las combinaciones de bandas.

A pesar de que las técnicas de clasificación parámetricas han sido utilizadas por un largo tiempo, debido a la alta disponibilidad de datos, consecuencia del elevado desarrollo tecnológico acaecido en los últimos años, los algoritmos de aprendizaje de máquinas han surgido como alternativas exactas y eficientes en la cartografía de cubiertas del suelo Rodríguez & Chica (2012).

La proliferación en el campo de la teledetección de este tipo de métodos, en los últimos años, se debe a diferentes factores (Mas & Flores, 2008; Mountrakis *et al.*, 2011): a) la habilidad de estas técnicas para aprender patrones complejos, considerando relaciones no lineales entre las variables explicativas y las variables dependientes (bandas de la imagen y clases temáticas); b) la capacidad de generalización de estos algoritmos hace posible su aplicación en bases de datos incompletas o ruidosas; c) permiten la incorporación en el análisis de información

a priori; y d) debido a la ausencia de asunciones sobre los datos usados (ej. normalidad) permiten la integración de diferentes tipos de datos en el análisis.

- **Método de aprendizaje automático *Random Forest* (RF)**

El método utilizado por la consultoría para este proyecto fue el clasificador *Random Forest*, el cual es un clasificador de conjunto que utiliza árboles de decisión como clasificadores base, en el que cada clasificador contribuye con un voto para la asignación de la clase más frecuente al vector de entrada. RF incrementa la diversidad de los árboles de decisión, haciéndolos crecer a partir de diferentes subconjuntos de datos creados mediante un procedimiento denominado bagging (Breiman, 1996).

- **Preparación de algoritmos**

El método, al ser clasificador basado en el autoaprendizaje, requiere la preparación de su respectivo algoritmo, el cual indica las diferentes pautas bajo las cuales se deben ejecutar.

Random Forest

El clasificador de árboles aleatorios es una potente técnica para la clasificación de imágenes que resiste al exceso de ajuste y que puede funcionar con imágenes segmentadas y con otros data sets ráster antiguos. Para las entradas de imagen estándar, la herramienta acepta imágenes de varias bandas con cualquier profundidad de bit y realiza la clasificación de árboles aleatorios por píxel, según el archivo de entidades de la formación de entrada (ESRI, 2019).

Para preparar el archivo de formación se requiere el archivo de clasificación de imagen (muestra de entrenamiento), así como también el archivo que contiene la información de atributos, estadísticas u otra información necesaria para el clasificador. Además, se puede seleccionar una imagen auxiliar que ayude a clasificar mejor los pixeles, tales como índices de vegetación, modelos de elevación digital u otros raster.

En cuanto a lo que concierne a las pautas del algoritmo, se debe tener en cuenta:

1) El número máximo de árboles en el bosque, puesto que al aumentar el número de árboles se obtendrán tasas de precisión más elevadas, aunque esta mejora se estabiliza finalmente. Por otra parte, el número de árboles aumenta el tiempo de procesamiento de forma lineal.

2) La profundidad máxima de cada árbol del bosque, la cual es otra forma de indicar la cantidad de reglas que puede crear cada árbol, para llegar a una decisión. Los árboles no profundizarán más allá de este valor.

3) El número máximo de muestras que se van a utilizar para definir cada clase. Se recomienda un valor predeterminado de 1000, cuando las entradas son archivos ráster no segmentados. Un valor igual o menor que 0 significa que el sistema utilizará todas las muestras de los sitios de formación para preparar el clasificador.

➢ Fase de verificación de resultados

- **Salida de campo**

A partir de la cartografía resultante de la clasificación supervisada, se realizó el respectivo control de campo, tomando muestras sobre las áreas identificadas como retamo. Para ello, se hizo un muestreo aleatorio simple (muestreo completamente al azar), debido a que de esta forma todos los pixeles tienen idéntica probabilidad de ser seleccionados para la muestra. Lo anterior, se realizó con el fin de verificar la calidad *in situ* de la clasificación supervisada.

En cada uno de los puntos de muestreo se describieron las características de la cobertura observada (que no siempre fue retamo), sobre las planillas de campo diseñadas para dicha tarea; luego, se digitalizó la información y convirtió en archivo SIG.

6.2 IDENTIFICACIÓN DE LA ESPECIE INVASORA POR INTERPRETACIÓN VISUAL

➢ **Mapa de distribución de retamo – Puntos.**

Se elaboró un mapa donde se pudieran localizar los individuos o matorrales de retamo que no podían ser espacializados, ya sea porque correspondían a individuos aislados o grupos dispersos no cartografiables o a individuos conformando cercas vivas o patrones lineales que tampoco alcanzan a adquirir dimensiones de la mínima área a visualizar en una escala de salida gráfica 1:5.000.

Se elaboró, con datos obtenidos mediante la revisión del ortofotomosaico IDECA 2014-2015, con recorridos virtuales con Google Earth-pro y la herramienta Street-view que ofrece productos entre 2012 y 2018, especialmente en el borde de carreteras. Las verificaciones de campo permitieron corroborar la presencia de retamo y definir nuevos sectores con presencia puntual de la planta.

Como se observa en la tabla 21, en total se georeferenciaron 472 puntos de retamo aislados, en 18 localidades de la zona urbana de Bogotá D.C., de los cuales, el 80,7 % presenta *Ulex europaeus*, el 18,2% *Genista monspessulana* y en el 1% se presentan ambas especies.

Del total general, la Localidad de San Cristóbal es la que tiene mayor número de registros en retamo espinoso, seguida por Suba, Usme, Chapinero y Santa Fe. En cuanto a retamo liso, la localidad que presentó mayor cantidad de registros fue San Cristóbal, seguida de Ciudad Bolívar, Usme y Suba.

Tabla 21. Localidades representadas con presencia de registros aislados del complejo de retamo.

Localidad (código)	*Genista monspessulana*	%	Proporciones similares de los dos	%	*Ulex europaeus*	%	Total general	%
USAQUÉN (1)	4	4,65			10	2,62	14	2,97
CHAPINERO (2)	6	6,98			33	8,66	39	8,26
SANTA FE (3)	4	4,65			25	6,56	29	6,14
SAN CRISTÓBAL (4)	18	20,93	5	100	152	39,90	175	37,08
USME (5)	13	15,12			41	10,76	54	11,44
TUNJUELITO (6)					2	0,52	2	0,42
BOSA (7)	1	1,16			1	0,26	2	0,42
KENNEDY (8)	5	5,81			5	1,31	10	2,12
FONTIBÓN (9)	3	3,49			6	1,57	9	1,91
ENGATIVÁ (10)	2	2,33			11	2,89	13	2,75
SUBA (11)	12	13,95			47	12,34	59	12,50
BARRIOS UNIDOS (12)					3	0,79	3	0,64
TEUSAQUILLO (13)					11	2,89	11	2,33
ANTONIO NARIÑO (15)					5	1,31	5	1,06
PUENTE ARANDA (16)					1	0,26	1	0,21
LA CANDELARIA (17)					7	1,84	7	1,48
RAFAEL URIBE URIBE (18)					11	2,89	11	2,33
CIUDAD BOLÍVAR (19)	18	20,93			10	2,62	28	5,93
Total general	**86**	100,00	**5**	100	**381**	100,00	**472**	100

Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

El **Mapa 5** muestra la ubicación de los registros de puntos aislados con presencia del complejo de retamo; esta información también se puede consultar en formato PDF (Mapas Documento), al igual que en la base de datos espacial del proyecto, en el Anexo cartográfico (**Anexo 1**).

- **Mapa de distribución de retamo – Polígonos.**

De acuerdo con lo analizado en la sección 5.5.3, y como se indicó anteriormente, se tomó la decisión de realizar una interpretación visual con los productos gratuitos como son: Ortofotomosaicos 2018 (resultado de vuelos con dron de la SDA), Ortofotomosaico 2014 y 2015, imagen LANDSAT-8 (2018), SENTINEL-2 (2018).

Se procedió a realizar la interpretación visual de la presencia de retamo en la zona urbana de Bogotá D.C., tomando como base la información secundaria, los puntos de control y los puntos verificados en campo en las salidas iniciales. Posteriormente, se procedió a sectorizar la imagen, para realizar un barrido sistematizado por regiones, de tal manera que se pudieran trazar polígonos que serían descritos en atributos, de acuerdo con las posibilidades que brindaban las imágenes, y teniendo en cuenta su temporalidad.

En total, se trazaron 483 polígonos, que equivalen a un área interpretada con presencia de retamo en el área urbana de Bogotá D.C. de 1,31 km^2 (131 ha).

La totalidad de los productos de la interpretación visual contiene atributos de localización, características inherentes a rasgos de crecimiento y estado de desarrollo y coberturas relacionadas; igualmente, se puede identificar si fue un polígono o punto verificado en campo, con lo cual se puede calificar su confiabilidad.

Una vez sistematizada la información de campo, se procedió a realizar control sobre los polígonos ya interpretados con los orotofotomosaicos, para: confirmar la presencia de la especie y sus dimensiones o para redefinir los polígonos interpretados con los vistos en campo, por cambios en su tamaño y por estar presentes o por ya estar ausentes, de tal manera que se surtió una actualización del mapa, quedando además registrada esta actualización en la base de datos espacial del proyecto, en el Anexo cartográfico (**Anexo 1**), donde se puede consultar cuáles polígonos fueron verificados y cuáles no. Esto es muy útil para el análisis digital de la imagen PLANET SCOPE 2019, pues aumenta la gama de puntos de control y de puntos de validación de los resultados.

De acuerdo con el ajuste expuesto, se presenta el mapa resultante de la presencia y distribución de la invasora retamo espinoso *Ulex europaeus*, el cual corresponde al **Mapa 6**, y puede verse en PDF (Mapas Documento), al igual que en la base de datos espacial del proyecto, en el Anexo cartográfico (**Anexo 1**).

Durante el trabajo de campo se recopiló un registro fotográfico importante, en la mayoría de las partes donde se encontró presencia de retamo. Este registro fotográfico se procesó en trabajo de oficina, con el fin de geoespacilizar la ubicación de estas fotografías y posteriormente crear un ID de identificación, para correlacionar el archivo fotográfico en formato .JPG y SHAPE.file; este ID lleva el

nombre de "COD GPS 1" en los atributos de los SHAPE.file "Fotografías Campo" y "Puntosverificación" (**Anexo 4**).

Una vez finalizó la etapa de interpretación visual y se surtió la etapa de verificación, se pudo analizar que en los polígonos interpretados el mayor porcentaje es para aquellos de área inferior a 1000 m^2, siendo el 54,8%; seguidos por los de áreas entre 1.001 y 3.000 m^2, que son el 26,7%; mientras que los polígonos superiores a 10.000 m^2 (1 ha) representan el 6,8% (ver tabla 22).

Tabla 22. Distribución de clases de área en los polígonos de interpretación visual.

Categorías de área (m2)	No. Polígonos	%
<100	32	6,63
101-1.000	233	48,24
1.001-3.000	129	26,71
3.001-6.000	44	9,11
6.001-10.000	12	2,48
10.001-12.000	4	0,83
>12.000	29	6,00
Total general	**483**	**100**

Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

Respecto al tipo de crecimiento identificado, se aprecia que el 48,2% de los polígonos presenta crecimiento consolidado, el 31% tiene crecimiento mixto, el 18,8% crecimiento disperso y un porcentaje de 1,8% crecimiento aislado (ver tabla 23). Cabe aclarar que la poligonización de los aislados se dificultó, debido a la escala de interpretación, por eso, muchos de estos casos se dejaron como puntos, para facilitar la espacialización.

Tabla 23. Categorización de polígonos según interpretación visual por tipo de crecimiento de la especie invasora.

Tipo de Crecimiento	No. Polígonos	%	Área (m^2)	%
Aislado	9	1,86	18744,02	1,43
Consolidado	233	48,24	662847,54	50,55
Disperso	91	18,84	209902,83	16,01
Mixto	150	31,06	419737,82	32,01
Total general	**483**	**100**	**1311232,21**	**100**

Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

En cuanto al estado de desarrollo, el 57,1% de los polígonos correspondió a matorrales con una altura de hasta 2 m, seguidos por los de altura mayor a 2 m con el 20,9% y, seguido muy de cerca al anterior, está el estado herbáceo de aquellos que no superan un metro de altura, con el 19,2% (ver tabla 24).

Tabla 24. Categorización de polígonos de interpretación visual por tipo de Estado de desarrollo de la especie invasora.

SÍMBOLO	TIPO DE ESTADO DE DESARROLLO	No. polígonos	%	Área (m^2)	%
R	Rasante	13	2,69	14771,0687	1,13
H	Hasta 1 m de altura	93	19,25	193295,81	14,74
A1	Hasta 2 m de altura	276	57,14	722905,991	55,13
A2	Mayor de 2 m de altura	101	20,91	380259,34	29,00
Total general		**483**	**100**	**1311232,21**	**100**

Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

Las coberturas que más se asociaron con las invasiones de retamo son principalmente los pastos en un 57,9%, seguidos de los matorrales nativos que corresponden al 20,5% y por arbustos dispersos que son el 7%. Como segunda cobertura asociada se presentan los arbustos dispersos en un 28,7%, seguidos por la cobertura de suelo desnudo que es del 14% (ver tabla 25).

Tabla 25. Coberturas asociadas en los polígonos interpretados.

Cobertura	Asociación 1 No. Polígonos	%	Asociación 1 Área (m2)	%	Asociación 2 No. Polígonos	%	Asociación 2 Área (m2)	%
Arboles dispersos	8	1,66	31233,91	2,38	56	11,59	261971,22	19,98
Arbustos dispersos	34	7,04	75401,42	5,75	139	28,78	337131,26	25,71
Bosque nativo	5	1,04	21977,02	1,68	1	0,21	16271,03	1,24
Chusque	13	2,69	66359,76	5,06	8	1,66	104901,63	8,00
Matorral nativo	99	20,50	259580,81	19,80	51	10,56	157999,11	12,05
No aplica	8	1,66	5766,74	0,44	104	21,53	140459,37	10,71
Pastos	280	57,97	720371,58	54,94	45	9,32	71763,04	5,47
Plantación de exóticas	13	2,69	26762,42	2,04	11	2,28	33237,92	2,53
Suelo desnudo	23	4,76	103778,55	7,91	68	14,08	187497,62	14,30
Total general	**483**	**100**	**1311232,21**	**100,00**	**483**	**100**	**1311232,21**	**100**

Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

En el 1,6% de los casos, no se presenta ninguna cobertura asociada y en el 21,5 % solo se presenta una cobertura asociada; estos casos se calificaron como "no aplica", por no poseer cobertura asociada, e indica que se trata de polígonos de crecimiento consolidado de retamo (ver tabla 25).

Para cada polígono, se calificó la confiabilidad en media o baja, de acuerdo con la consideración del intérprete, y como alta, en los polígonos que fueron verificados en campo.

Se realizaron 19 salidas a campo, sumando un promedio de 133 horas por cada persona verificadora en terreno, lo que dio un total ajustado de 400 horas de campo (para comisiones conformadas por tres verificadores).

Se logró verificar los polígonos definidos por el intérprete y adicionar nueva información, tanto puntual como en superficie; los polígonos verificados subían, en cuanto a su confiabilidad, de baja o media a alta. Como se aprecia en la tabla 26, el 74,7% de los polígonos tiene confianza alta, el 19,8% confianza media y el 5,3% confianza baja.

Tabla 26. Porcentaje de confianza según número de polígonos interpretados.

CONFIANZA	No. Polígonos	%
Alta	361	74,74
Media	96	19,88
Baja	26	5,38
Total general	**483**	**100**

Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

Cuando la confianza se analiza por área cubierta se observa que en confianza alta se cubre un 79,3%, del área total interpretada; en confianza media el 18,7%, mientras que los de baja confianza y, por tanto, los no verificados, son el 1,9% del área total interpretada (ver tabla 27). Los polígonos verificados son el 74,7% del total de polígonos, que corresponde aproximadamente a un (1) km^2.

Tabla 27. Porcentaje de confianza según área interpretada.

CONFIANZA	Área (m^2)	Área (km^2)	Área (ha)	%
Alta	1040136,44	1,04	104,013644	79,33
Media	245945,1	0,25	24,59451	18,76
Baja	25150,66	0,03	2,515066	1,92
Total general	**1311232,21**	**1,31**	**131,12**	**100**

Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

Es de aclarar que incluso los polígonos que fueron calificados como de confianza media y baja contienen retamo, la incertidumbre que disminuye su confianza es la proporción de la invasora que fue asignada por el intérprete la cual en estos casos no fue verificada.

De los 483 polígonos interpretados, el 89,2% corresponde a *Ulex europaeus* (retamo espinoso), el 10,5% corresponde a *Genista monspessulana* (retamo liso), y en proporciones similares de ambas especies, el 0,2%. En cuanto a área, *Ulex europaeus* (retamo espinoso) conforma el 91,9% del área interpretada, mientras que *Genista monspessulana* (retamo liso) el 6,8% y el 1,1% representa áreas donde hay proporciones similares de las dos invasoras.

Si se consideran las clases de proporción de la invasora, se encuentra que la proporción que predomina está entre el 50 y el 70% (37,9%), seguida por la clase con retamo en proporción mayor al 70% (23%); luego está la clase entre el 50 y el 70% del polígono interpretado (20,23%) (ver tabla 28).

Tabla 28. Representación de polígonos según especie del complejo de especies invasoras.

Proporción de retamo	*Genista monspessulana*	Proporciones similares de los dos	*Ulex europaeus*	Total			
	Área (m^2)	Área (m^2)	Área (m^2)	No. Polígonos	%	Área (m^2)	%
Menor del 15 %	10205,83		129372,14	40	8,28	139577,96	10,64
Entre el 15 al 30 %	22950,45		84352,08	46	9,52	107302,52	8,18
Entre el 30 al 50 %	28349,30	15465,92	221466,83	119	24,64	265282,05	20,23
Entre el 50 al 70 %	27616,22		469467,55	156	32,30	497083,77	37,91
Mayor al 70 %	1195,00		300790,90	122	25,26	301985,90	23,03
Total general	**90316,79**	**15465,92**	**1205449,50**	**483**	**100**	**1311232,21**	**100**
%	**6,89**	**1,18**	**91,93**				

Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

Como se aprecia en la tabla 29, se logró representación de 15 localidades de la zona urbana de Bogotá, donde la localidad con mayor área registrada con el complejo invasor es San Cristóbal, con un 47,6% del total del área interpretada, seguida por Fontibón con 22,6% y Usme con 10,1%. El mayor número de polígonos está representado en San Cristóbal, seguido por Usme, Suba y Santa Fe.

Tabla 29. Localidades representadas en el registro de polígonos de interpretación visual con presencia del complejo de retamo.

Localidades	No. Polígonos	%	Área (m2)	%
USAQUÉN (1)	11	2,28	9900,40	0,76
CHAPINERO (2)	14	2,90	5514,32	0,42
SANTA FE (3)	43	8,90	39650,65	3,02
SAN CRISTÓBAL (4)	188	38,92	625311,32	47,69
USME (5)	97	20,08	133457,48	10,18
TUNJUELITO (6)	3	0,62	4837,67	0,37
BOSA (7)	1	0,21	3321,25	0,25
KENNEDY (8)	8	1,66	53695,59	4,10
FONTIBÓN (9)	28	5,80	297184,07	22,66
ENGATIVÁ (10)	3	0,62	2334,68	0,18
SUBA (11)	60	12,42	96143,42	7,33
TEUSAQUILLO (13)	2	0,41	1734,24	0,13
PUENTE ARANDA (16)	1	0,21	3808,50	0,29
RAFAEL URIBE URIBE (18)	10	2,07	19370,83	1,48
CIUDAD BOLÍVAR (19)	14	2,90	14967,76	1,14
Total general	**483**	100,00	**1311232,21**	100,00

Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

El producto de lo anteriormente descrito es un **Modelo cartográfico resultado de la interpretación visual** y que se identificará como **Mapa 6** en este documento, que es resultado de realizar la identificación de la especie con el uso de los recursos de imágenes digitales gratuitas y/o de uso público tal como son los ortofotomosaicos IDECA 2014-2015, Google Earth-pro (2016-2019) y Street-view (2016-2019), y ortofotomosaicos suministrados por la supervisión de este contrato, tomadas con drones de algunos sectores relacionados con el Humedal de Juan Amarillo, Parque Entrenubes y Humedal de Techo, así como por información primaria producto de las verificaciones de campo. También se puede consultar en formato PDF (Mapas Documento), al igual que en la base de datos espacial del proyecto, en el Anexo cartográfico (**Anexo 1**).

6.3 IDENTIFICACIÓN DE LA ESPECIE INVASORA POR CLASIFICACIÓN SUPERVISADA CON IMAGEN PLANET SCOPE, 2019.

Dentro de los métodos de clasificación de usos de la tierra, una de las técnicas corresponde a la clasificación supervisada de imágenes digitales multiespectrales; la ventaja de esta técnica radica en que se optimiza la resolución espectral de las imágenes (cantidad de bandas) para diferenciar coberturas vegetales. En síntesis, se trata de una técnica en la cual se hace un muestreo de semillas por tipo de cobertura (pastos, cuerpos de agua, áreas boscosas, etc.) y con la posterior aplicación de algoritmos de análisis, se hace un barrido automático de toda la imagen, estableciendo cuál unidad de cobertura corresponde a cada pixel, de acuerdo con los valores digitales de todas sus bandas.

Este tipo de procesamiento es posible adelantarlo con programas de computación especializados para tratamiento digital de imágenes, como, por ejemplo: ERDAS, PCI, ENVI, ILWIS, Arc,GIS o Q-GIS, entre otros; todos estos programas se basan en el mismo principio de muestreo y barrido de imagen; cada resultado obtenido puede ser depurado con control de campo y reclasificación de semillas, hasta lograr un resultado que, al controlarlo en campo, corresponda con las muestras tomadas en escritorio.

El desarrollo del proceso metodológico realizado se resume en las siguientes etapas:

1. Selección de imagen
2. Definición de área de muestreo.
3. Registro de semillas de muestreo.
4. Verificación de dispersión de las muestras tomadas y ajuste de las mismas.
5. Aplicación de algoritmos de clasificación de la imagen.
6. Verificación contra muestreo de campo.
7. Ajuste de procesamiento.
8. Producto Raster final y Conversión a formato vector.

A continuación, se detalla cada una de las etapas enunciadas:

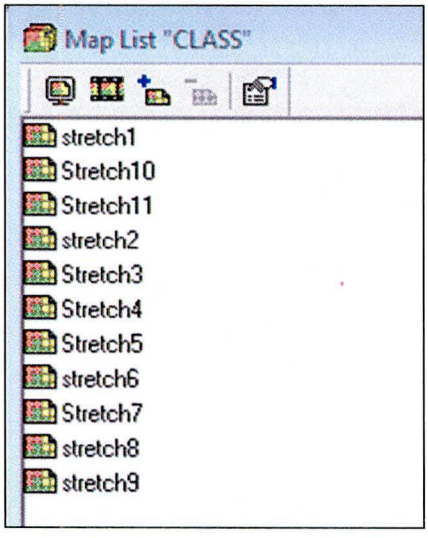
- Selección de imagen:

Corresponde a la fase en la cual se establece con qué imagen se va a desarrollar el procesamiento; también se determina la escala óptima de salida (en función de la resolución espacial) y las bandas ideales de combinación para selección de muestras.

Para el presente proyecto se contó con la imagen PLANET SCOPE de febrero de 2019, de 3 m de resolución espacial y 4 bandas (incluyendo un infrarrojo); a esta imagen se le realizó previamente un sinergismo con imagen Sentinel 2 (de 10 m

de resolución espacial, como se detalló en la sección 5.5.2), que adicionó 7 bandas del espectro infrarrojo, ver figura 33.

Figura 33. Imagen de trabajo conformada por 11 bandas

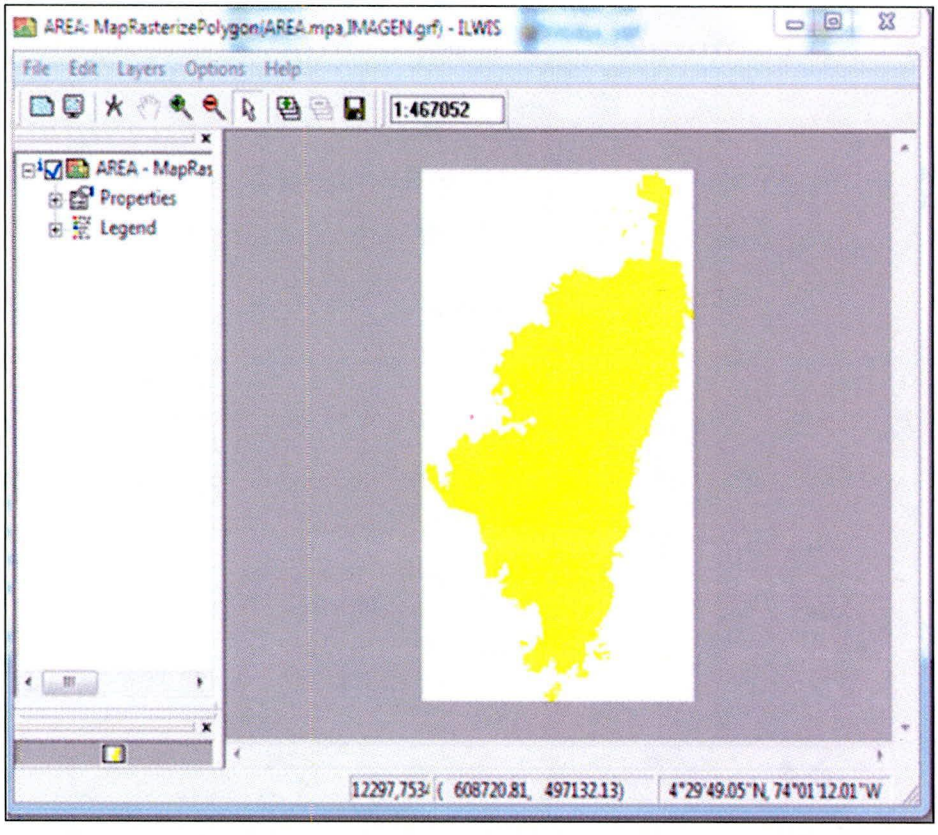


Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

- Definición de área de muestreo.

Como parte de la preparación de la imagen, se delimitó el área de muestreo al perímetro urbano de Bogotá D.C., aplicando un recorte de la imagen seleccionada, según el archivo definido como área urbana de Bogotá (fuente IDECA y confirmado por la supervisión de este contrato), así, el área de trabajo se convirtió a formato ráster, como se observa en la figura 34. La imagen previamente seleccionada se recortó a este límite, para concentrar el muestreo en las zonas de interés.

Figura 34. Área de trabajo en formato raster.



Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

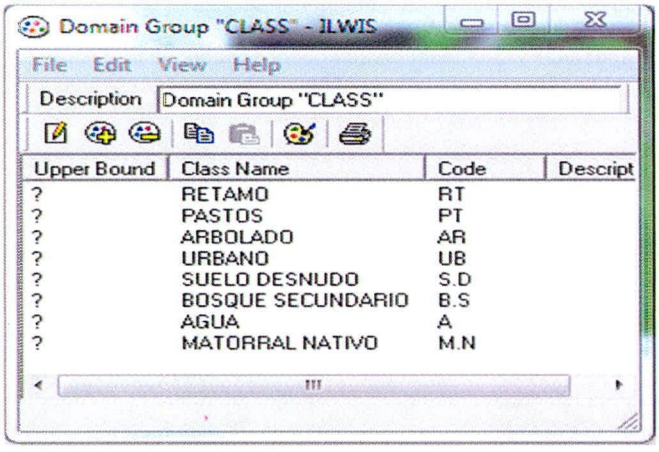
- Registro de semillas de muestreo.

Posteriormente, la fase de selección de semillas de muestreo se hizo a partir de un comando denominado SAMPLE SET (para software Ilwis 3.3, de distribución gratuita), en el cual se estructuró el archivo de la imagen, para activar el muestreo.

Como elemento de esta tarea se estableció:

a. Definición de dominios: Es decir, la selección previa de unidades de muestreo a realizar. Estos dominios posteriormente podían ser complementados con nuevas unidades. La figura 35 ilustra el dominio definido para el presente estudio.

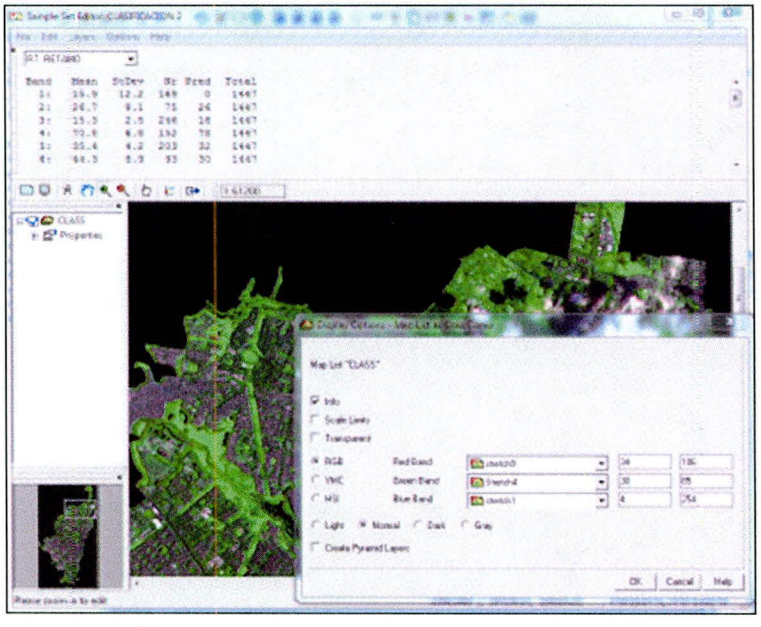
Figura 35. Dominios de muestreo para el proyecto del retamo espinoso.



Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

b. Clasificación con las 11 bandas: Posteriormente, inició la fase de selección de bandas, para determinar la toma de semillas, aunque en muestreo dinámico se pueden variar las bandas (ver figura 36).

Figura 36. Selección de bandas para fase de muestreo.

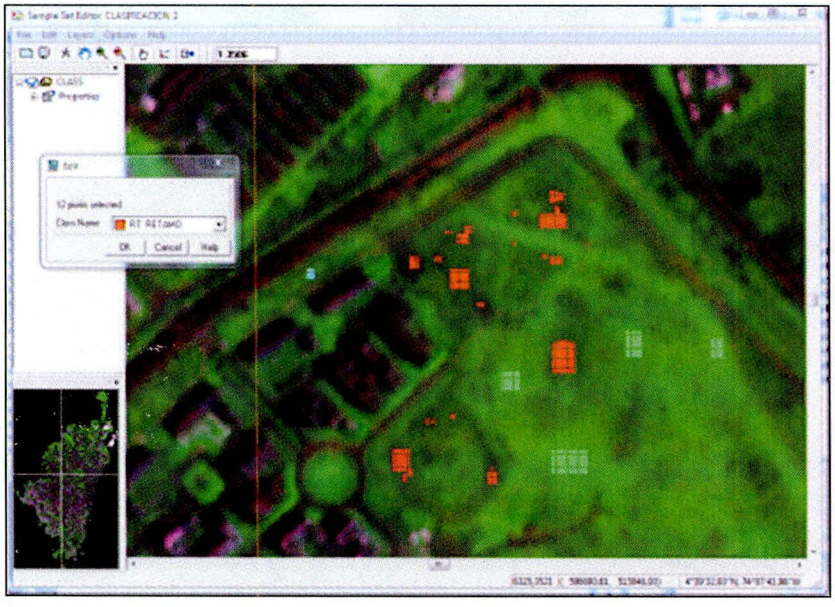


Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

- Registro de semillas de muestreo.

Una vez adelantados los pasos anteriores, se procedió a la toma de muestras; esta labor consistió en la demarcación en la imagen de pixeles homogéneos (en tono y textura) y la asignación de uno de los valores de los dominios previamente definidos. La figura 37 muestra una secuencia de toma de muestras para retamo y para pastos.

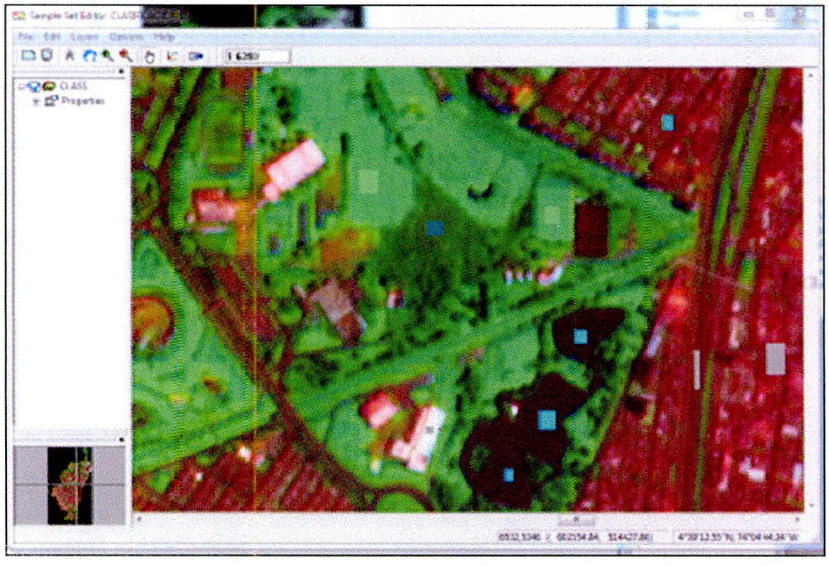
Figura 37. Proceso de toma de muestras y asignación de dominios.



Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

Las muestras se tomaron teniendo como referencia los 60 polígonos de control iniciales, así como posteriores polígonos interpretados y verificados en campo, en los cuales se estimó que tenían buenas características para calibrar el entrenamiento del software. Para áreas reconocidas, también se muestrearon cuerpos de agua y tejidos urbanos (ver figura 38).

Figura 38. Toma de muestras de agua y tejido urbano.



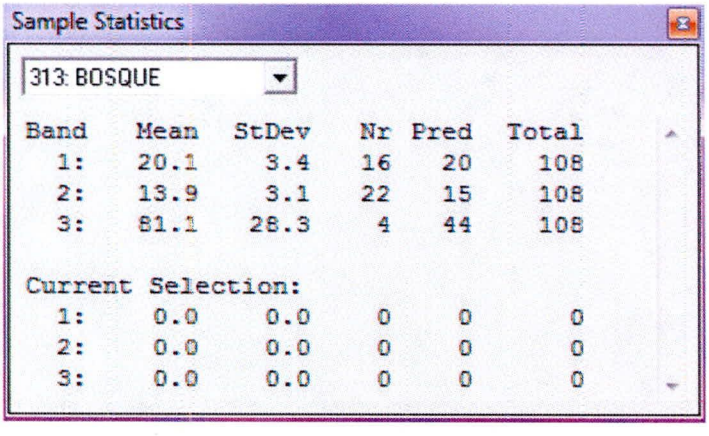
Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

- Verificación de dispersión de las muestras tomadas y ajuste de las mismas.

Cada uno de las categorías de cobertura muestreadas se alimentó con al menos 30 semillas (muestras dispersas en toda la imagen); la consistencia de la muestra se evaluó de dos formas:

- Mediante la estadística de la muestra, que considera, tanto el acumulado de muestras analizadas, como la muestra actual, ver figura 39.

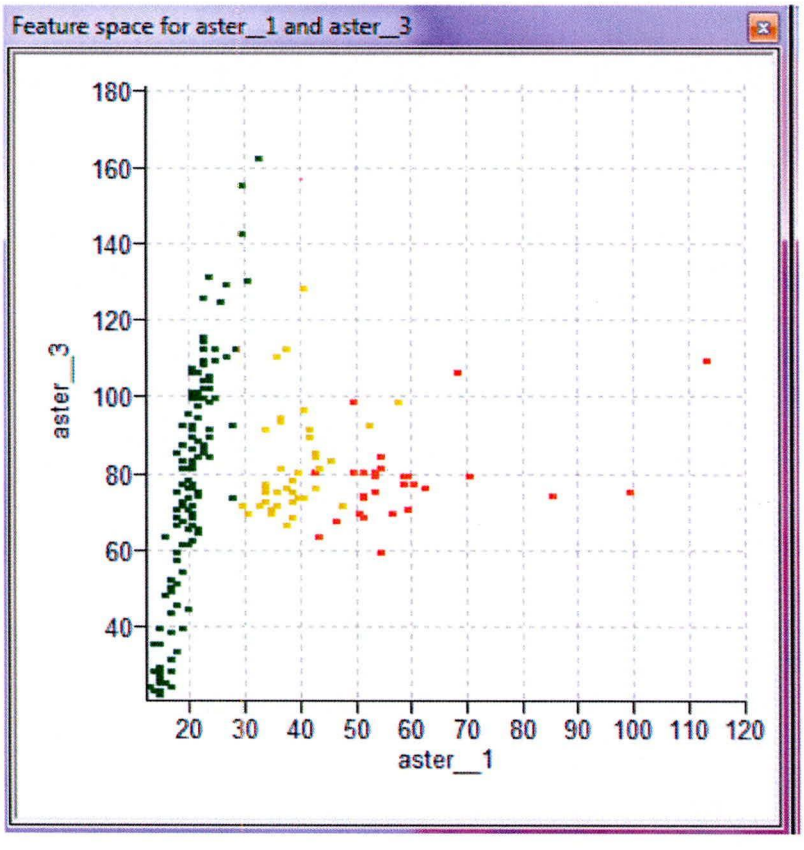
Figura 39. Estadísticas de muestreo por unidad de cobertura.



Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

- Mediante gráficas de correlación de bandas, que permiten observar cómo se comportan las diversas muestras para cada par de bandas seleccionadas, las muestras de igual cobertura (en condición y estado) tienden a agruparse en zonas específicas (ver figura 40).

Figura 40. Ejemplo de un Diagrama de correlación de bandas para el muestreo.



Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

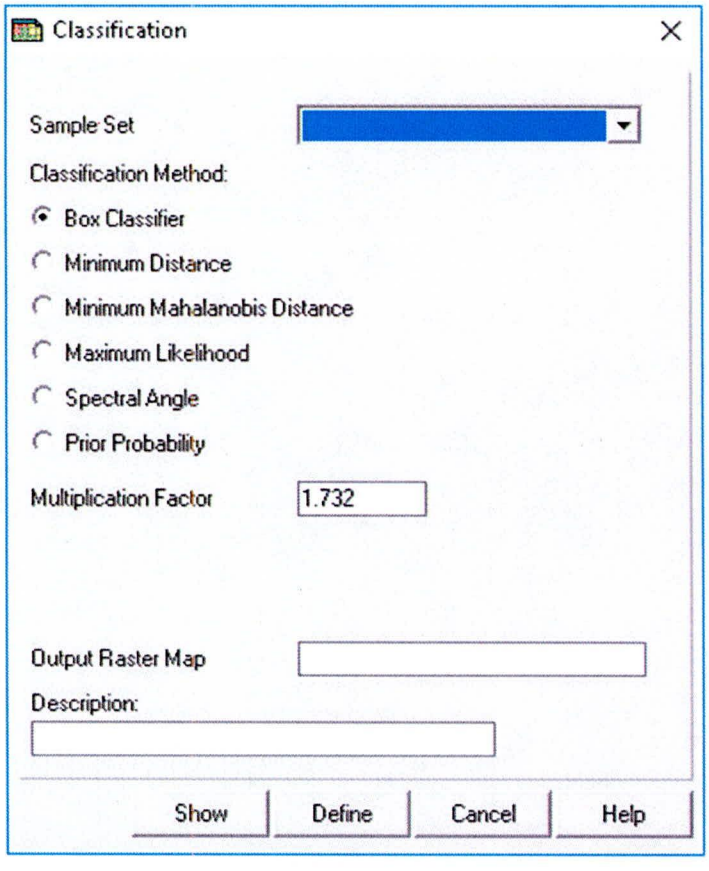
➢ Aplicación de algoritmos de clasificación de la imagen.

Una vez realizada la toma de muestras, y verificada su consistencia, se procedió a realizar la clasificación de coberturas de la imagen; para este propósito, el comando CLASSIFY evaluó la imagen en su totalidad. La figura 41 muestra la estructura del proceso de clasificación de la imagen; sobre el correspondiente mapa de muestreo (SAMPLE SET), se aplicó cada uno de los métodos de clasificación con que cuenta el Software, como son:

- Clasificador por caja (Box Classifier),
- Mínima distancia (Minimum Distance),
- Máxima similitud (Maximum Likelihood)
- Probabilidad previa (Prior Probability).

Como resultado de este proceso se optó por el método de mínima distancia, que arrojó el mejor resultado correspondiente con la verificación de campo.

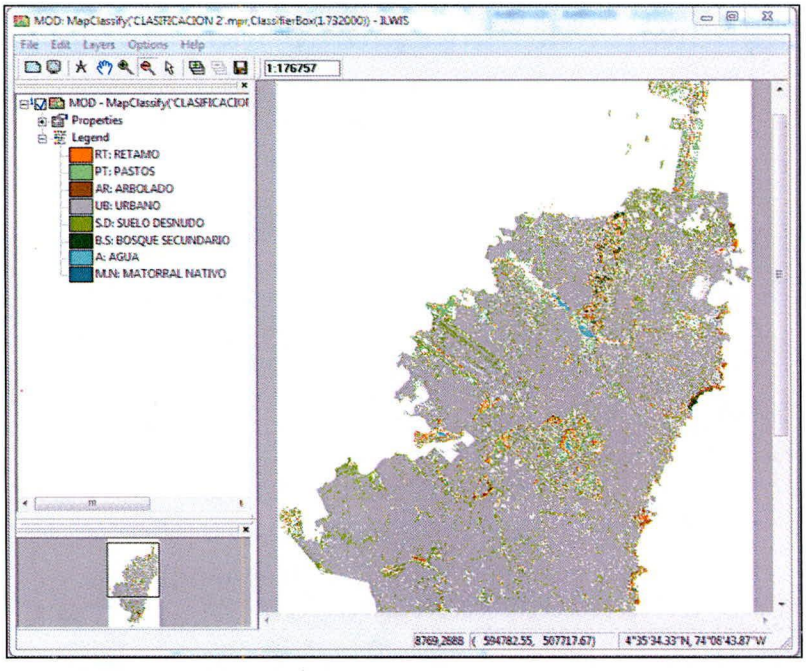
Figura 41. Menú de comando Classify.



Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

Una vez ejecutado el comando, se obtuvo un resultado, de acuerdo a las coberturas identificadas y muestreadas como el que se despliega en la figura 42.

Figura 42. Resultado de interpretación supervisada para el área urbana de Bogotá D.C.



Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

- Verificación contra muestreo de campo.

Posteriormente, se evaluó el resultado obtenido con control de campo, se identificaron áreas con discrepancia de unidades y se determinaron las coberturas que presentaban igual respuesta en procesamiento.

- Ajuste de procesamiento.

Una vez procesada la imagen, se realizó una revisión del resultado con los puntos de control de campo, y para los casos en que se identificaban discrepancias, se adelantaron los ajustes necesarios, con lo cual se hace remuestreo sobre la imagen tomando nuevas semillas que incluyan la corrección de estos errores y así se aplica nuevamente el algoritmo de clasificación para que se optimice el resultado.

- Producto Raster final y Conversión a formato vector.

Una vez se tuvo una interpretación con la mejor correspondencia con lo observado en campo, el mapa ráster se procesó para convertirlo a formato vector (shapefile) y de esta forma utilizarlo en procesos posteriores del análisis.

El resultado obtenido al realizar la clasificación supervisada, identificó un área probable con presencia de retamo de 396,36 ha, donde la localidad que mayor porcentaje presentó, según este método de análisis, fue la localidad de Suba con 18,95%, seguida por las localidades de San Cristóbal (16,32%), Usaquén (10,62%), Fontibón (8,51%) y Engativá (6,96%).

Se obtuvo como resultado del análisis el **Mapa 7 o** Modelo **cartográfico resultado de la Clasificación Supervisada**; la información también se puede consultar en formato PDF (Mapas Documento), al igual que en la base de datos espacial del proyecto, en el Anexo cartográfico (**Anexo 1**).

Tabla 30. Representación del complejo de retamo en la zona urbana de Bogotá D.C. de acuerdo al Modelo cartográfico con la Clasificación Supervisada.

LOCALIDAD	Área (m^2)	Área (ha)	%
USAQUÉN (1)	420897,65	42,09	10,62
CHAPINERO (2)	198825,81	19,88	5,02
SANTA FE (3)	252127,93	25,21	6,36
SAN CRISTÓBAL (4)	646760,26	64,68	16,32
USME (5)	223245,04	22,32	5,63
TUNJUELITO (6)	72005,62	7,20	1,82
BOSA (7)	114096,91	11,41	2,88
KENNEDY (8)	97303,51	9,73	2,45
FONTIBÓN (9)	337130,19	33,71	8,51
ENGATIVÁ (10)	277081,61	27,71	6,99
SUBA (11)	750931,93	75,09	18,95
BARRIOS UNIDOS (12)	69988,93	7,00	1,77
TEUSAQUILLO (13)	164743,19	16,47	4,16
LOS MARTIRES (14)	1199,26	0,12	0,03
ANTONIO NARIÑO (15)	1215,39	0,12	0,03
PUENTE ARANDA (16)	15445,08	1,54	0,39
LA CANDELARIA (17)	62111,95	6,21	1,57
RAFAEL URIBE URIBE (18)	46418,47	4,64	1,17
CIUDAD BOLÍVAR (19)	212108,10	21,21	5,35
Total general	**3963636,83**	**396,36**	**100**

Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

6.4 IDENTIFICACIÓN DE LA ESPECIE INVASORA POR OTROS PROCESOS DIGITALES

Con el fin de utilizar al máximo otras propiedades de la imagen de satélite, para la identificación de la cobertura específica del retamo se realizó exploración de dos procesos digitales adicionales, como son: 1- el uso de los valores para las distintas bandas de sus números digitales, con lo que se obtiene un mapa de probabilidades con relación exclusiva a la cobertura de la especie invasora. 2- el uso de los valores de reflectancia, identificando aquellos específicos para retamo en cada banda.

A continuación, se desarrolla la metodología y se presentan los resultados obtenidos para cada modelo.

- **Interpretación de los valores para las distintas bandas, con números digitales y Modelo de probabilidades.**

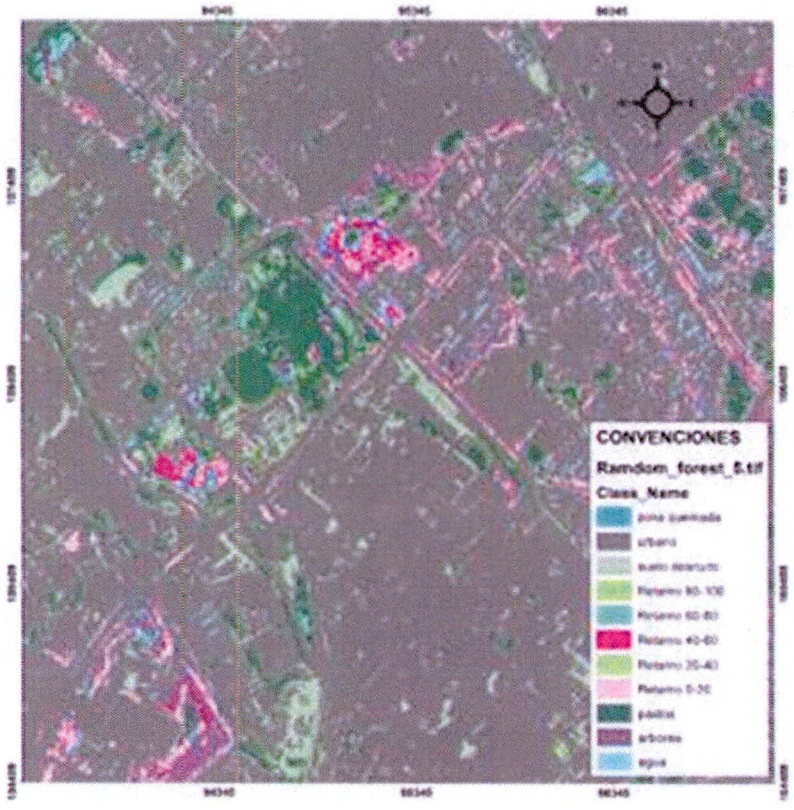
Para el proceso de identificación de retamo mediante la interpretación de los valores para las distintas bandas con números digitales, se realizó un muestreo sobre las áreas verificadas con retamo, en ellas, se extrajeron los valores ND de cada banda y se identificaron los rangos de retamo para cada una de ellas, utilizando 10 de las 11 bandas del sinergismo PLANET SCOPE – SENTINEL (la banda 6 se obvió, por presentar valores iguales a otras coberturas).

De lo anterior, se obtuvo un valor de probabilidad en rangos cada 20 % (0 – 20 %, 20 – 40 %, 40 – 60 %, 60 – 80 %, 80 -100%), para determinar así la existencia o no de retamo, con cierta probabilidad (ver figura 43).

Evaluado este resultado en campo, se determinó que los rangos entre 0 – 20% y 20 – 40% correspondían a áreas de pastos y herbáceas naturales, por lo cual estas áreas se dejaron en pastos.

El producto cartográfico de este análisis se identifica como **Mapa 8** en este documento, bajo el título de **Modelo cartográfico de probabilidades de presencia de retamo** y también se puede consultar en formato PDF (Mapas Documento), al igual que en la base de datos espacial del proyecto, en el Anexo cartográfico (**Anexo 1**).

Figura 43 Clasificación de retamo a partir de probabilidades con ND para el ejercicio Sinergismo PLANET SCOPE – SENTINEL.



Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

En el mapa de probabilidades se descartaron los polígonos de probabilidad de 0-20% y 20 -40%, teniendo en cuenta que la evaluación obtenida a partir de los recorridos en campo, arrojó que estaban asociados a pastos. Se procedió entonces a categorizar en una sola cobertura los de probabilidad entre 40 a 100%, los cuales mostraron en campo una mejor coincidencia con el retamo. Al finalizar el proceso, el resultado obtenido en las categorías 40-60%, 60-80% y 80-100% se reunió en una sola, la cual se determina como el área con mayor probabilidad de presentar retamo en relación a los ND, la cual correspondió a 408,58 ha.

Como se aprecia en la tabla 31, la totalidad de las localidades urbanas tendrían presencia de retamo. La localidad de Usme es la que tiene mayor presencia de retamo, con el 19,28% en relación al área total y según el modelo de probabilidad, seguida por las localidades de Suba (16,98%), Ciudad Bolívar (8,93%), San Cristóbal (7,66%) y Usaquén (7,59%).

Tabla 31. Representación del complejo de retamo en las localidades de la zona urbana de Bogotá D.C., de acuerdo con el Modelo cartográfico de probabilidades.

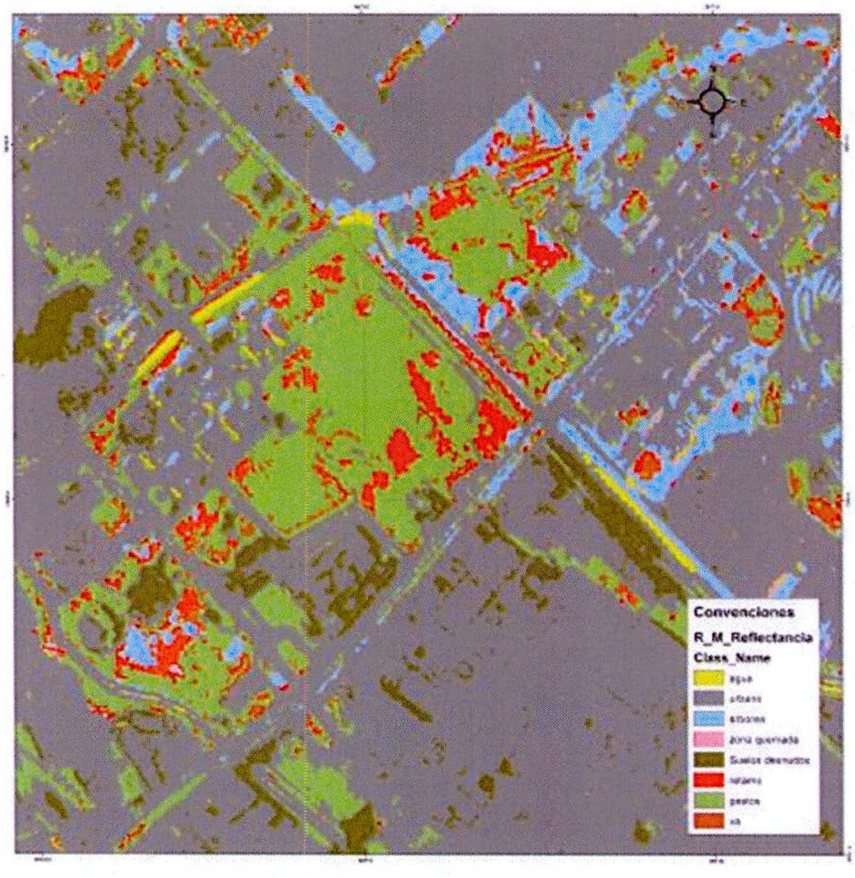
LOCALIDAD	Área (m^2)	Área (ha)	%
USAQUÉN (1)	309953,16	31,00	7,59
CHAPINERO (2)	209570,52	20,96	5,13
SANTA FE (3)	133443,72	13,34	3,27
SAN CRISTÓBAL (4)	313076,55	31,31	7,66
USME (5)	787735,83	78,77	19,28
TUNJUELITO (6)	75860,21	7,59	1,86
BOSA (7)	65749,49	6,57	1,61
KENNEDY (8)	164748,31	16,47	4,03
FONTIBÓN (9)	239608,18	23,96	5,86
ENGATIVÁ (10)	231442,57	23,14	5,66
SUBA (11)	693935,62	69,39	16,98
BARRIOS UNIDOS (12)	81676,64	8,17	2,00
TEUSAQUILLO (13)	190671,74	19,07	4,67
LOS MARTIRES (14)	4026,70	0,40	0,10
ANTONIO NARIÑO (15)	7925,52	0,79	0,19
PUENTE ARANDA (16)	51281,88	5,13	1,26
LA CANDELARIA (17)	47490,14	4,75	1,16
RAFAEL URIBE URIBE (18)	112626,85	11,26	2,76
CIUDAD BOLÍVAR (19)	364988,22	36,50	8,93
Total general	**4085811,85**	**408,58**	**100**

Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

- **Modelo estadístico de análisis de reflectancia**

El segundo modelo se trabajó con los valores de reflectancia para el sinergismo PLANET SCOPE – SENTINEL, del cual se extrajeron los valores de los pixeles para las distintas bandas de reflectancia, para los cuales se realizó un muestreo sobre las áreas verificadas con retamo; en ellos se extrajeron los valores ND de cada banda y se identificaron los rangos de retamo para cada banda (ver figura 44).

Figura 44. Vista de un sector de Bogotá D.C de la imagen Raster en la clasificación por análisis de reflectancia.



Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

El resultado obtenido para el área de retamo correspondió a 411,75 ha.

Tabla 32. Representación del complejo de retamo en las localidades de la zona urbana de Bogotá D.C. de acuerdo con el Modelo cartográfico de Reflectancia.

LOCALIDAD (Código)	AREA (m2)	AREA (ha)	%
USAQUÉN (1)	176782,20	17,68	4,29
CHAPINERO (2)	35776,39	3,58	0,87
SANTA FE (3)	75245,73	7,52	1,83
SAN CRISTÓBAL (4)	182611,27	18,26	4,44
USME (5)	193168,09	19,32	4,69
TUNJUELITO (6)	74206,64	7,42	1,80
BOSA (7)	192281,99	19,23	4,67
KENNEDY (8)	236473,83	23,65	5,74
FONTIBÓN (9)	458412,53	45,84	11,13
ENGATIVÁ (10)	552486,23	55,25	13,42
SUBA (11)	1176125,31	117,61	28,56
BARRIOS UNIDOS (12)	116179,19	11,62	2,82
TEUSAQUILLO (13)	214956,20	21,50	5,22
LOS MARTIRES (14)	14508,36	1,45	0,35
ANTONIO NARIÑO (15)	22229,82	2,22	0,54
PUENTE ARANDA (16)	183332,62	18,33	4,45
LA CANDELARIA (17)	14696,92	1,47	0,36
RAFAEL URIBE URIBE (18)	76175,82	7,62	1,85
CIUDAD BOLÍVAR (19)	121846,62	12,18	2,96
Total general	**4117495,76**	**411,75**	**100**

Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

Como se aprecia en la tabla 32, la totalidad de las localidades urbanas tendrían presencia de retamo. La localidad de Suba es la que mayor porcentaje presenta con 28,56%, seguida por las localidades de Engativá (13,42%), Fontibón (11,13%), Kennedy (5,74%), Teusaquillo (5,22%), Usme (4,69), Bosa (4,67 % y Puente Aranda (4,45 %).

El producto cartográfico de este análisis se identifica como **Mapa 9** en este documento, bajo el título de **Modelo de reflectancia** y también se puede consultar en formato PDF (Mapas Documento), al igual que en la base de datos espacial del proyecto, en el Anexo cartográfico (**Anexo 1**).

6.5 VERIFICACIÓN EN CAMPO DE LOS RESULTADOS

En el proceso de verificación en campo se tomó el mismo formulario descrito anteriormente (para los puntos de control), de tal manera que permitiera una completa descripción de los hallazgos de retamo en campo. En los formularios se consignaron tanto las coordenadas geográficas y datos de barrio y localidad, así como aquellas características de la especie relacionadas con las variaciones de estado de crecimiento y asociación con otras coberturas y coberturas colindantes, entre otras, que se pueden apreciar mejor en el **Anexo 2.**

Por otra parte, ya que la interpretación visual se realizó inicialmente con base en imágenes 2014 y 2015 que requieren su actualización, se realizaron luego visitas de campo que permitieran realizar dichos análisis y, dado que unas de las localidades con mayor registro de retamo son las de San Cristóbal y Usme, se inició por estas zonas, para la actualización del mapa; para ello, se recurrió también a algunas personas de la comunidad que podían tener mayor conocimiento y facilidad de acceso a sectores de los límites urbano rurales.

Los puntos tomados en campo con GPS, son descritos mediante el uso del formulario y toma de fotografías que facilitaron posteriormente la sistematización de los datos en el escritorio.

Los modelos digitales resultantes fueron llevados a campo y se calificaron, mediante formulario, los aciertos y desaciertos, los cuales sirvieron para volver a correr en escritorio los modelos y seleccionar más semillas de acuerdo con los hallazgos de campo.

En ese sentido, las salidas a campo realizadas para la validación de los modelos permitieron depurar cada una de las propuestas, especialmente en las zonas que arrojaban presencia de retamo y que, en las visitas a cada sector, no evidenciaban dicha presencia, con lo cual se eliminaban sectores que presentaban confusión.

Una vez depurado el mapa, y escogidas los mejores resultados de cada procesamiento digital, se procedió a realizar el análisis de cada modelo, como se desarrolla en la sección 6.6, y su evaluación, como se desarrolla en la sección 6.7.

En el **Mapa 10** se observan los puntos de verificación y los recorridos que se realizaron para realizar verificaciones de campo; también se puede consultar en formato PDF y en el SHAPE.file del Anexo cartográfico del proyecto (**Anexo 1**).

6.6 COMPARACIÓN DE RESULTADOS Y AJUSTES A LOS MODELOS CARTOGRÁFICOS.

Como se aprecia en la tabla 33, se generaron diferencias entre los cuatro modelos presentados, empezando por el área total, donde el método visual muestra un área bastante inferior a los demás modelos; allí se estiman 131,1 ha y se identifica la presencia de retamo en 15 localidades urbanas, mientras que los demás modelos muestran presencia de retamo en las 19 localidades del Distrito Capital que tienen área urbana.

Por otra parte, de los modelos con procesamiento digital se observa que, en cuanto a área, el que más superficie registra con retamo es el de reflectancia (411,75 ha), seguido el de probabilidades (408,58 ha) y, por último, el de la clasificación supervisada (396,36 ha).

En cuanto a las localidades con más presencia de retamo, también se presentan diferencias, ya que el modelo visual muestra a San Cristóbal como la localidad con mayor cantidad de retamo (62,5 ha), seguido por las localidades de Fontibón (29,7 ha), Usme (13,3 ha), Suba (9,6 ha), Kennedy (5,3 ha) y Santa Fe (3,97 ha); mientras que el modelo supervisado muestra a Suba como la localidad con mayor presencia del complejo invasor (75,09ha), seguido por San Cristóbal (64,68ha), Usaquén (42,09 ha), Fontibón (33,71ha) y Engativá (27,71), las localidades de Santa Fe y Usme figuran en puntos intermedios de área (25,21 ha y 22,32 ha, respectivamente).

Por otra parte, el modelo de probabilidades muestra a Usme como la localidad con mayor presencia de retamo (78,77ha), seguida por las localidades de Suba (69,39ha), Ciudad Bolívar (36,50ha) y San Cristóbal (31,31ha), lo que no ocurría en los anteriores modelos. Siguen en orden de mayor presencia Usaquén (31,00 ha), Fontibón (23,96ha) y Engativá (23,14ha).

En cuanto al modelo de reflectancia, se observa que la localidad de Suba nuevamente es la que presenta mayor presencia de retamo, con 117,61ha, seguida por las localidades de Engativá (55,25 ha), Fontibón (45,84 ha), Kennedy (23,65 ha), Teusaquillo (21,50 ha) y Usme (19,32 ha).

Tabla 33. Representación del complejo de retamo en las localidades de la zona urbana de Bogotá D.C., comparación de resultados de los diferentes Modelos Cartográficos resultantes.

Modelos Cartográficos	Clasificación visual		Clasificación supervisada		Probabilidades		Reflectancia	
Localidades (código)	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%
USAQUÉN (1)	0,99	0,76	**42,09**	10,62	31,00	7,59	17,68	4,29
CHAPINERO (2)	0,55	0,42	19,88	5,02	20,96	5,13	3,58	0,87
SANTA FE (3)	3,97	3,02	25,21	6,36	13,34	3,27	7,52	1,83
SAN CRISTÓBAL (4)	**62,53**	47,69	**64,68**	16,32	31,31	7,66	18,26	4,44
USME (5)	**13,35**	10,18	22,32	5,63	**78,77**	19,28	19,32	4,69
TUNJUELITO (6)	0,48	0,37	7,20	1,82	7,59	1,86	7,42	1,80
BOSA (7)	0,33	0,25	11,41	2,88	6,57	1,61	19,23	4,67
KENNEDY (8)	5,37	4,1	9,73	2,45	16,47	4,03	23,65	5,74
FONTIBÓN (9)	**29,72**	22,66	33,71	8,51	23,96	5,86	**45,84**	11,13
ENGATIVÁ (10)	0,23	0,18	27,71	6,99	23,14	5,66	**55,25**	13,42
SUBA (11)	**9,61**	7,33	**75,09**	18,95	**69,39**	16,98	**117,61**	28,56
BARRIOS UNIDOS (12)			7,00	1,77	8,17	2,00	11,62	2,82
TEUSAQUILLO (13)	0,17	0,13	16,47	4,16	19,07	4,67	21,50	5,22
LOS MÁRTIRES (14)			0,12	0,03	0,40	0,10	1,45	0,35
ANTONIO NARIÑO (15)			0,12	0,03	0,79	0,19	2,22	0,54
PUENTE ARANDA (16)	0,38	0,29	1,54	0,39	5,13	1,26	18,33	4,45
LA CANDELARIA (17)			6,21	1,57	4,75	1,16	1,47	0,36
RAFAEL URIBE URIBE (18)	1,94	1,48	4,64	1,17	11,26	2,76	7,62	1,85
CIUDAD BOLÍVAR (19)	1,50	1,14	21,21	5,35	**36,50**	8,93	12,18	2,96
Total general	**131,12**	**100**	**396,36**	**100**	**408,58**	**100**	**411,75**	**100**

Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

6.7 EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS MODELOS CARTOGRÁFICOS RESULTANTES.

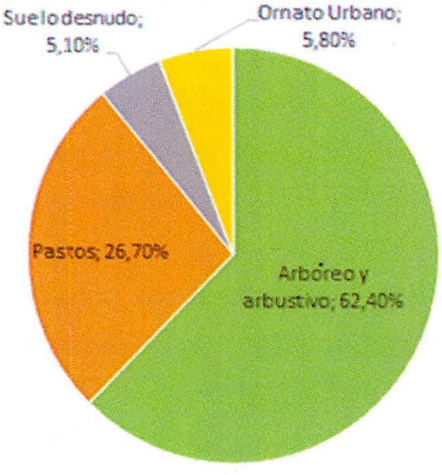
Para esta evaluación, se tomaron los resultados que se obtuvieron en la interpretación visual preliminar y en los recorridos de campo, dentro del perímetro urbano de Bogotá D.C., en los cuales se tomaron 483 polígonos de control identificados con retamo, que mantenían una calificación de confianza de alta, media y baja.

- **Evaluación del modelo cartográfico resultante de la Clasificación supervisada.**

Como resultado, se obtuvo un acierto en 299 polígonos y no se acertó en 184, arrojando un porcentaje de acierto de 62 %.

A los 184 polígonos no acertados se les revisó el enmascaramiento y se obtuvo como resultado que el 55,8% de retamo se enmascara con matorrales nativos, seguido de la cobertura de pastos, con un 26,7%, ornato urbano (separadores y zonas verdes) 5,8%, suelos desnudos 5,1%, bosque secundario 4,5% y arbolados con un 2,1%, ver figura 45.

Figura 45. Enmascaramientos de la cobertura de retamo espinoso con las demás coberturas analizadas.



Fuente: Geotem S.A.S., 2019.

El resultado del análisis en el software ILWIS 4 muestra los comportamientos para cada cobertura en las 11 bandas. En la figura 46 se observa la respuesta espectral de una muestra tomada sobre agua, en cada una de las 11 bandas, con sus respectivos valores, tal como lo muestra de manera interactiva el programa Ilwis.