



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

---

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

COLEGIO DE GEOGRAFÍA

**DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA Y ESTIMACIÓN DE LA  
ABUNDANCIA RELATIVA DE UNA ESPECIE EXÓTICA E  
INVASORA EN EL PEDREGAL DE SAN ÁNGEL, DISTRITO  
FEDERAL, MÉXICO**

## Tesis

Para obtener el título de:

Licenciado en Geografía

Presenta:

Pedro Miguel Alcántara Pineda

Directora de tesis:

Dra. María del Pilar Ortega Larrocea

**Número de cuenta:**

41002269-0



Ciudad Universitaria, CDMX, México, enero 2017.



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Índice

	Páginas
<b>I. Resumen</b> .....	1
<b>II. Introducción</b> .....	3
<b>III. Marco Teórico</b> .....	4
3.1 Especies invasoras.....	4
3.2 Pasto kikuyo como especie invasora.....	6
3.3 Control y prevención de especies exóticas invasoras.....	8
3.4 Percepción remota.....	10
3.5 Espectro electromagnético.....	14
3.6 Firmas espectrales.....	16
3.7 Respuesta espectral de la vegetación.....	17
3.8 Imágenes multi-espectrales.....	20
3.9 Interpretación digital de las imágenes.....	24
3.10 Clasificación supervisada.....	25
3.11 Clasificación no supervisada.....	26
3.12 Evaluación de los mapas elaborados a partir de la percepción remota.....	27
3.13 Sistema de información Geográfica.....	28
3.14 Estudios realizados en el diagnóstico de vegetación con éstas herramientas.....	30
<b>IV. Antecedentes</b> .....	<b>30</b>
<b>V. Justificación</b> .....	<b>36</b>
<b>VI. Hipótesis</b> .....	<b>36</b>
<b>VII. Objetivos</b> .....	<b>37</b>
<b>VIII. Metodología</b> .....	<b>38</b>
8.1 Descripción del área de estudio.....	38
8.1.1 Repsa.....	38
8.1.2 Geopedregal.....	39
8.2 Adquisición y procesamiento de imágenes digital.....	41
8.2.1 Clasificación no supervisada.....	41
8.2.2 Clasificación visual de las clases.....	42
8.2.3 Imágenes spot.....	42
8.2.4 Delimitación de las zonas de estudio para evaluación del área de cobertura del pasto.....	43
8.2.5 Evaluación mediante método supervisado máxima verosimilitud.....	46
8.2.6 Evaluación en la exactitud de las clasificaciones.....	47
8.2.7 Modificaciones de los polígonos y generación de un nuevo shape de distribución.....	47
<b>IX. Resultados</b> .....	<b>48</b>

9.1	Clasificación no supervisada.....	48
9.1.1	Clasificación visual de las imágenes. Verificación de las firmas espectrales.....	48
9.2	Imágenes spot.....	49
9.3	Evaluación de la cobertura en los polígonos seleccionados en la REPSA.....	49
9.4	Evaluación mediante clasificación supervisada y matriz de confusión.....	50
9.5	Mapas finales y leyenda.....	50
<b>X.</b>	<b>Discusión.....</b>	<b>64</b>
10.1	Selección de materiales y clasificación digital.....	64
10.2	Trabajo de campo.....	65
10.3	Fiabilidad del trabajo de campo y mapeo.....	69
<b>XI.</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>70</b>
<b>XII.</b>	<b>Recomendaciones.....</b>	<b>71</b>
<b>XIII.</b>	<b>Literatura citada.....</b>	<b>74</b>
<b>XIV.</b>	<b>Anexos.....</b>	<b>83</b>
	Anexo 1. Ficha pasto kikuyo.....	83
	Anexo 2. Cuadro de imágenes de la Zona A5.....	84
	Anexo 3 Cuadro de imágenes de la Zona A13.....	85
	Anexo 4 Cuadro de imágenes de la Zona A4.....	86
	Anexo 5 Cuadro de imágenes de la zona A11.....	87

## Índice de Figuras

Figura 1.....	7
Figura 2.....	10
Figura 3.....	13
Figura 4.....	13
Figura 5.....	14
Figura 6.....	15
Figura 7.....	17
Figura 8.....	18
Figura 9.....	19
Figura 10.....	20
Figura 11.....	21
Figura 12.....	24
Figura 13.....	26
Figura 14.....	27

Figura 15.....	34
Figura 16.....	35
Figura 17.....	39
Figura 18.....	44
Figura 19.....	45
Figura 20.....	51
Figura 21.....	52
Figura 22.....	53
Figura 23.....	54
Figura 24.....	54
Figura 25.....	55
Figura 26.....	58
Figura 27.....	59
Figura 28.....	60
Figura 29.....	62
Figura 30.....	63
<b>Índice de Cuadros</b>	
Cuadro 1.....	15
Cuadro 2.....	23
Cuadro 3.....	40
Cuadro 4.....	61
Cuadro 5.....	61

## **Agradecimientos**

Esta tesis fue financiada con el proyecto DGAPA- PAPIIT IT101812 y PAPIIME PE108915 que me otorgó además una beca para realizar mi tesis en el Geopedregal de los Institutos de Geología y Geografía de la UNAM.

A las personas que proporcionaron las imágenes y material cartográfico, Arq. Psj. Saúl Rodríguez Palacios Responsable de Cartografía y Sistemas de Información Geográfica; a la M. en C. Hilda Marcela Pérez Escobedo, Responsable de Comunicación Ambiental y al Arq. Psj. Pedro Camarena Berruecos, Responsable de Proyectos Especiales y diseño de paisaje, todos ellos de la Secretaría Ejecutiva de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel de la UNAM.

A la Dra. Lilia de Lourdes Manzo Delgado, al M. en C. Armando Peralta Higuera y a la M. en C. Gabriela Gómez Rodríguez, Técnicos Académicos del Laboratorio de Análisis Geoespacial (LAGE) del Instituto de Geografía de la UNAM por proporcionar las imágenes multiespectrales, así como valiosas sugerencias en el abordaje de esta investigación.

Al Mtro. en Geomática José Mauricio Pizaña Galeana por su asesoría en el procesamiento de resultados y al Dr. Rigel Alfonso Zaragoza Álvarez del Colegio de Geografía de la Facultad de Filosofía y Letras de la UNAM por su orientación sobre los procedimientos metodológicos.

A la M. en C. Iris Suárez Quijada del Departamento de Edafología del Instituto de Geología de la UNAM, por su asesoría técnica durante la realización de este trabajo.

Al Mtro. en Geografía Eduardo Antonio Pérez Torres y al Mtro. en Geografía José Manuel Espinoza Rodríguez, Profesores del Colegio de Geografía de la Facultad de Filosofía y Letras de la UNAM por su apoyo durante la elaboración de este trabajo.

A todos mis compañeros del Geopedregal que me apoyaron en las actividades en éste, en especial a la P. en C. de la T. de la Facultad de Ciencias de la UNAM, Carmen Arenas Castellanos por su asistencia en campo y la ayuda en la adquisición de imágenes fotográficas; a la P. de Geog. de la Facultad de Filosofía y Letras Karen Zoravir Miranda Huerta por su apoyo en el proceso cartográfico, así como al Lic. en Geografía David Orazio López Majarrez, por acompañarme a mi primer acercamiento a campo.

Al Arq. Psj. Saúl Rodríguez Palacios Responsable de Cartografía y Sistemas de Información Geográfica por su orientación a la creación del nuevo material cartográfico.

A la REPSA y su personal que me permitió realizar mi tesis y a sus voluntarios por apoyarnos en las actividades en el Geopedregal.

Al Dr Edward Peter Recagno por su apoyo como adjunto en sus clases y por la idea que impulso esta tesis.

Agradezco a los miembros del jurado, la Dra. María del Pilar Ortega Larrocea Investigadora del Departamento de Edafología del Instituto de Geología de la UNAM; a la Dra. Silke Cram Heydrich Investigadora del Departamento de Geografía Física del Instituto de Geografía de la UNAM, al Mtro. en Geografía José Manuel Espinoza Rodríguez Profesor de Carrera de la Facultad de Filosofía y Letras de la UNAM; al Mtro. en Geomática José Mauricio Pizaña Galeana, Investigador del Centro de Investigación en Geografía y Geomática del CentroGeo, Conacyt y al M. en C. José Santos Morales Hernández, Profesor de Carrera de la Facultad de Filosofía y Letras de la UNAM por su disposición en la revisión de este trabajo y por sus valiosos comentarios.

*Dedicatorias.*

*A mi madre María del Carmen Pineda Sánchez por todo su amor y cariño incondicional, apoyo durante toda mi vida siempre brindarme apoyo y estar toda mi vida conmigo, y darme ánimos para seguir la batalla.*

*A la Dra. María del Pilar Ortega Larrocea por apoyarme en mi trabajo de investigación siempre confiar en mí, su apoyo incondicional, estar siempre al pendiente de mi trabajo y brindarme los medios para que esta investigación saliera adelante, le estoy muy agradecido por esto.*

*A mi abuela María Elena Sánchez Sánchez por estar siempre en sus mejores años cuidándome.*

*A mis hermanos Samia Alcántara Pineda, Fanny Elena Alcántara Pineda, Sergio Iván Alcántara Pineda, José Alberto Alcántara Pineda, Daniel Alcántara Pineda, por acompañarme en este camino, siempre estar ahí al pendiente y apoyarme en todo aspecto.*

*A mi tía Esther Pineda Sánchez y primos Gregorio Ramírez Pineda, Alejandro Ramírez Pineda, Eduardo Ramírez Pineda, Lucía Fernanda Ramírez Pineda así como a Ángel García Camacho, porque gracias a ustedes siempre tuve un sustento durante mi carrera.*

*A la Mtra. Iris Suarez Quijada por siempre estar al pendiente y apoyarme para salir adelante.*

*A mis compañeros y amigos del Geopedregal Felipe de Jesús López Domínguez, Stephanie Chantal Segura Espinosa, Carmen Arenas Castellanos, Emmanuel Zeno Lara, Juan Antonio Mendoza Montiel, Ilse Alejandra Carmona Reyes, María Fernanda Martínez-Báez Téllez, Nestor Tunal Sánchez, Mariel Ester Wall Guzmán, Alba Karen Alva Salazar, Carmen Arenas Castellanos, Zeida Yini Hernández Roa, por apoyarme día a día con las actividades de este proyecto y haber tenido muchos logros este 2016.*

*A mis amigos Hussein Jesús Mercado Meza ,Rodrigo Gibrán Alarcón Sotres, Elida Claudio Güemez, José adrián Pérez Martínez, Juan Carlos Balbuena Mejía, Dalila López Ávila, Karen Zoravir Miranda Huerta, José Alberto Garibay Gómez, Erick Vivaldo García Palacios, David Orazio López López Manjarrez, Adriana Gabriela Martínez Martínez, Cuauhtémoc Edgar Rendón Lara, Tania Belén Méndez Valdez, Emilse Vuelvas Flores, María del Carmen Vela López, Cynthia Taty Pérez Barceló, Yoshinori Miguel Martínez Ymay, Ana Alcántara Barrera, Julia María Gutiérrez Peneaux, Joziel Baez Arjón, Daniella Araceli ,por siempre acompañarme en todo momento, por siempre estar ahí cuando me hicieron falta..*



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
 FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS  
 DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES

FORMA 3  
 APROBACIÓN DEL TRABAJO ESCRITO POR EL SÍNODO

UNIVERSIDAD NACIONAL  
 AVENIDA DE  
 MÉXICO

EGRESADO: **ALCÁNTARA PINEDA PEDRO MIGUEL**  
 N° de cuenta: **410022690**  
 Generación: **2010-2014**  
**PRESENTE**

Por este conducto tenemos a bien comunicar a Usted que, después de revisar el trabajo escrito de **TESIS** titulado **DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA Y ESTIMACIÓN DE LA ABUNDANCIA RELATIVA DE UNA ESPECIE EXÓTICA E INVASORA EN EL PEDREGAL DE SAN ÁNGEL, DISTRITO FEDERAL, MÉXICO**, para optar por el grado de **LICENCIADO** en **GEOGRAFÍA**, cada uno de los miembros del jurado emitió su dictamen aprobatorio considerando que dicho trabajo reúne los requisitos académicos necesarios para presentar el examen oral correspondiente.

**ATENTAMENTE**  
**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**  
 Cd. Universitaria, Cd. Mx. a 24 de noviembre de 2016.

NOMBRE DE SINODALES	ANTIGÜEDAD EN LA UNAM	FIRMA DE APROBACIÓN DEL TRABAJO ESCRITO
Presidente: <b>MTRO. JOSÉ MANUEL ESPINOZA RODRÍGUEZ</b>	<b>27-X-1986</b>	
Vocal: A.T. <b>DRA. MARÍA DEL PILAR ORTEGA LARROCEA</b>	<b>16-IX-1993</b>	
Secretario: <b>DRA. SILKE CRAM HEYDRICH</b>	<b>01-VIII-1995</b>	
Suplente: <b>MTRO. JOSÉ SANTOS MORALES HERNÁNDEZ</b>	<b>01-X-1980</b>	
Suplente: <b>MTRO. JOSÉ MAURICIO GALEANA PIZAÑA</b>	<b>08-VIII-2011</b>	

Vo. Bo.

COORDINADORA DE LA CARRERA

DRA. PATRICIA GÓMEZ REY

## I. Resumen

La Reserva Urbana del Pedregal de San Ángel, está sometida a una enorme presión antropogénica debido a la demanda que la comunidad universitaria exige. La fragmentación y disminución de su territorio debido a la urbanización que conlleva a la invasión de especies exóticas, se encuentra como una de las principales amenazas. Como consecuencia, los pedregales remanentes sufren de pérdida de especies nativas que están bien adaptadas a las condiciones que este ecosistema presenta debido a que las especies exóticas invasoras compiten con ellas. Entre las especies exóticas más agresivas, se encuentra el pasto kikuyo, *Pennisetum clandestinum* que, además de competir con las especies nativas, causa cambios en los regímenes del medio y puede llegar a causar incendios en época de sequías, debido a su bajo punto de combustión. El kikuyo ha invadido gran parte de la Reserva ocupando en años anteriores hasta un 17 % de su superficie de acuerdo con su Atlas de Riesgos

En las últimas décadas, la herramienta de percepción remota para la identificación de especies vegetales es algo que ha tenido una gran aplicación y que ahora se utiliza para el monitoreo de especies exóticas. La percepción remota permite conocer la distribución geográfica en extensas zonas de territorio, sin embargo, para superficies pequeñas como lo es la Reserva Ecológica, la factibilidad de que esta herramienta sea usada en diagnóstico requiere ser evaluada previamente. La problemática en el monitoreo se puede centrar en el encontrar las imágenes aéreas multi-espectrales que permitan una buena resolución espacial para su clasificación visual o digital.

La presente tesis consistió en analizar bajo los métodos de clasificación no supervisada, distintas imágenes de la Reserva adquiridas en la época de secas del año 2015 para conocer las clases espectrales que pudieran adjudicarse con el crecimiento en grandes superficies del pasto kikuyo. A través de corroboración en campo de cuatro zonas de amortiguamiento de la Reserva (Zonas 5, 7, 11 y 13), se discriminó la firma espectral de las especies y superficies que no correspondieran al crecimiento del pasto.

Se comprobó una fiabilidad superior al 90.4 % de la matriz de confusión en caso de la clase del pasto kikuyo, con valores de 19 % de errores de comisión y 32 % de omisión. A partir de esta clasificación, se pudo corroborar que de acuerdo a lo diagnosticado en el Atlas de Riesgos, 17 % que correspondía a una superficie de 402 900 m<sup>2</sup> de la reserva en el año 2012, para el año 2015, aumentó un 0.12 % con una superficie a 405 900 m<sup>2</sup>. La abundancia del pasto no pudo ser corroborada en zonas de crecimiento irregular debido a que crece por estolones y la firma espectral es susceptible de que sea confundida en época de secas con otras especies, derivado que su crecimiento se presenta en manchones pequeños.

**Palabras clave:** pasto kikuyo, *Pennisetum clandestinum*, percepción remota, imagen multi-espectral, resolución espacial, clasificación visual, clase espectral.

## II. Introducción

La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA) es una Reserva Urbana que cuenta con una superficie de 2 370 000 m<sup>2</sup> decretada como tal al resguardo de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y localizada dentro del *campus* universitario. En esta reserva, se protege al matorral xerófilo de palo loco (*Pittocaulon praecox*) último relicto que queda y que forma parte de la biodiversidad de la zona conurbada de la actual Ciudad de México (Castillo-Argüero *et al.*, 2009). Este matorral tiene varias amenazas de su biodiversidad y dentro de las principales están las especies exóticas y/o invasoras que debido a sus mecanismos de dispersión, ocupan el nicho ecológico de las especies nativas de este ecosistema desplazándolas.

Una de las invasoras más peligrosas es la especie *Pennisetum clandestinum* conocida como pasto kikuyo, que por su valor ornamental ha sido introducido en diversos espacios de esta universidad. Su superficie de crecimiento se ha extendido debido a factores antrópicos y propios de su biología, que han permitido su establecimiento y entrada a la reserva. Los principales factores que se han reconocido son los rellenos de cascajo y el establecimiento del vivero alto, zona donde se cultiva esta especie para suministrar las áreas verdes del campus universitario y se introduce en áreas de recreación de donde, también se dispersa. Este pasto no ha sido considerado dentro de listados de malezas exóticas invasivas en México a pesar de ser una especie considerada como maleza exótica de gran importancia en muchos países; de ahí que su monitoreo constante no haya sido realizado periódicamente para su manejo. La estimación de su abundancia en campo resulta difícil debido a los recursos humanos que se

necesitarían para tal tarea; por lo que se deben buscar nuevos métodos aéreos y digitales para poder diagnosticar su crecimiento en la reserva.

La percepción remota, técnica que consiste en captar y analizar la energía reflejada de los diversos elementos que conforman la superficie terrestre mediante el uso de sensores montados en diferentes plataformas, resulta en una técnica útil para realizar diversos estudios de vegetación. Sin embargo, se debe tener en cuenta qué tipo de imágenes multi-espectrales se utilizarán para el análisis de la comunidad vegetal que se estudie. De ahí que para la REPSA, se cuenta con un banco de imágenes adquiridas por distintos sensores (dron, LANDSAT, SPOT, entre otros) y se deberá partir de análisis previos que permitan seleccionar el tipo de imagen y las herramientas metodológicas más adecuadas calibradas con trabajo de campo para poder elaborar los mapas temáticos fiables.

### **III. Marco teórico**

#### **3.1 Especies invasoras**

Las especies nativas se encuentran de manera natural en una región como resultado de un largo proceso de adaptación a las condiciones ambientales existentes y del desarrollo de complejas interacciones con otras especies. Las especies exóticas invasoras, son organismos transportados por medios naturales o por actividades humanas que llegan a establecerse fuera de su área

de distribución natural (Comité Asesor Nacional sobre Especies Invasoras, 2010). Una especie invasora es una especie introducida que prospera sin ayuda directa del ser humano y amenaza a hábitats naturales o semi naturales fuera de su área natural de distribución (Comité Asesor de Especies Invasoras, 2010). La extinción de las especies nativas puede ser consecuencia de las repercusiones que causan una o varias de las especies invasoras, entre otras, la competencia por alimento, espacio o sitios de reproducción; una mayor depredación, o la propagación de parásitos y enfermedades frente a los que las especies nativas carecen de defensas (McNeely *et al.*, 2001).

Una de las principales causas de pérdida de biodiversidad se debe a que las especies invasoras causan la extinción de las especies al desplazar su nicho, ejercen competencia con especies nativas y cambian el régimen de herbivoría de la fauna local, entre otros (Comité Asesor Nacional sobre Especies Invasoras, 2010). Las especies invasoras pueden causar grandes impactos al ambiente donde se incorporan y de igual forma causan grandes impactos económicos (Keane y Crawley, 2002). Si bien se tienen catalogadas y reconocidas a nivel mundial las principales especies vegetales consideradas como especies invasoras, algunas, además, se consideran como exóticas y malezas. La diferencia entre éstas es que las especies exóticas son especies que no se originaron en este sitio, las invasoras son un sinónimo de malezas y corresponden a plantas que aparecieron abundantemente debido a alguna perturbación en el ambiente. Ente ellas se encuentran las ruderales, que son especies de malezas exóticas o locales que se benefician por el disturbio humano y se establecen cerca de las poblaciones humanas, éstas aparecen en

caminos, alrededor de carreteras, campos de cultivos, entre otras (Valladares, 2009; Martínez-De la Cruz *et al.*, 2015).

### **3.2 Pasto Kikuyo como especie exótica invasora**

El pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum* Hochst. ex Chiov.) como se le conoce comúnmente, es originario del este de África y es una planta perenne que se le encuentra presente durante todo el año (Vibrans *et al.*, 2009; Fig. 1, Anexo 1). Este pasto es considerado como exótico, introducido en América como especie forrajera (NSW Scientific Committee, 2003) y que se ha extendido explosivamente en los últimos 30 años en las regiones templadas y subtropicales húmedas y subhúmedas de México. Además de ser una especie forrajera, el kikuyo se propaga como especie de ornato, dominando prácticamente todos los céspedes e incluso colonizando los pastizales perturbados en los alrededores de las poblaciones humanas grandes y pequeñas. A pesar de que no está registrado en el catálogo de gramíneas malezas en México (Sánchez-Ken *et al.*, 2012), se le considera la invasiva más seria de climas templados y subtropicales, ya que también invade la vegetación natural y se propaga activa y fácilmente, estableciendo cubiertas vegetales con él (Mears, 1970). El kikuyo está considerado una maleza nociva en muchos países, ya que se introduce rápidamente en áreas naturales y excluye a la vegetación autóctona, considerado incluso como una amenaza en Sudamérica en el Programa Mundial sobre especies invasoras (McNeely *et al.*, 2001; GIPS, 2005). El pasto kikuyo es una maleza debido a sus mecanismos de dispersión que le permiten cubrir una gran extensión en poco tiempo (Mears, 1970; Cano-Santana *et al.*, 2009). Este

puede llegar a causar cambio en las condiciones naturales del lugar donde se establece así como invadir de forma muy rápida grandes hectáreas (Aguirre-Muñoz *et al.*, 2009).



Figura 1. Pasto Kikuyo: *Pennisetum clandestinum*. a) Fotografía que muestra su crecimiento fuera del suelo sobre la roca. Foto: Alcántara, 2016. b) Mecanismo subterráneo de dispersión por estolones en el suelo. Imagen modificada de Ever Graze (<http://www.evergraze.com.au/>). c) Imagen que muestra el avance del frente de crecimiento de la zona de propagación en la zona de Vivero hacia la reserva en la Ciudad Universitaria de la UNAM. Foto tomada por Arenas, 2016.

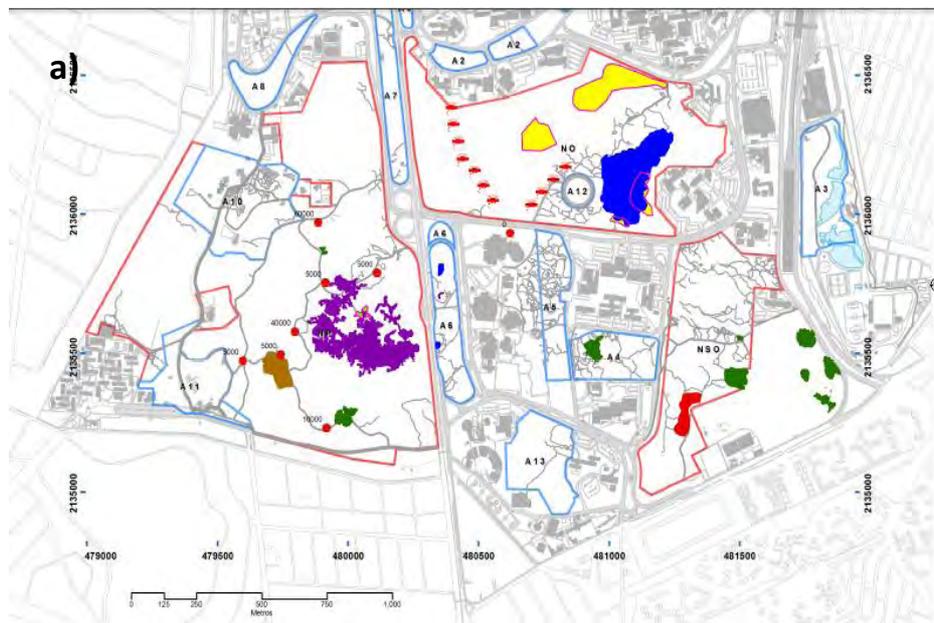
### 3.3 Control y prevención de especies exóticas invasoras

Existen diversas propuestas para controlar el crecimiento de especies invasoras. Las acciones de monitoreo son primordiales para el control y manejo de éstas y las acciones siempre deben responder a tres preguntas básicas: ¿qué especie (s)?, ¿dónde esta (n)? y ¿cuánto hay? (Ericson, 2006). Una vez que se tiene esta información, se puede proceder a tener opciones de su manejo, erradicación o control.

De acuerdo con Aguirre-Muñoz y Mendoza-Alfaro (2009), las opciones para el control y la erradicación de plantas exóticas son variadas e incluyen las siguientes: a] remoción manual o mecánica, b] facilitación de especies nativas competidoras, c] control biológico, d] aplicación de herbicidas, e] quemas prescritas y controladas y f] solarización (técnica de desinfección del suelo que aprovecha la radiación solar). Cada método tiene ventajas y desventajas y las formas más exitosas incluyen combinaciones de uno o varios de ellos. La mayor parte de la literatura en malezas sobre la problemática de la erradicación de especies exóticas e invasoras tanto en México como en el mundo, sugiere el control químico. Desde el punto de vista del comercio agrícola esto puede ser lo más práctico; sin embargo, en ambientes naturales, es improcedente debido a que se puede afectar a la flora autóctona (McNeely *et al.*, 2001).

Los planes de manejo internacional consideran estrategias de evaluación y predicción (McNeely *et al.*, 2001). Como parte de estas estrategias, en la última década se han generado las técnicas de percepción remota, también llamada teledetección y sistemas de información geográfica.

En estos últimos años se han empezado a comprender las ventajas que ofrecen el uso de tecnologías geoespaciales tales como la percepción remota para predecir, detectar, mapear y monitorear plantas invasoras. Las tecnologías geoespaciales han permitido generar información a distintos usuarios como instituciones dedicadas al manejo ambiental pudiendo con ello reducir los costos y aumentar la eficiencia y efectividad de los programas de manejo de malezas (Ericson, 2006). En las bases de datos generadas con los sistemas geoespaciales, se establecen vías de dispersión de las especies, hábitats favorables para las mismas y para especies invasoras como en el caso del pasto kikuyo, se pueden elaborar mapas de susceptibilidad. Estos mapas pueden pronosticar las condiciones propicias de establecimiento con base en la ocurrencia de eventos ambientales como incendios forestales (March, 2008; Figura 2).



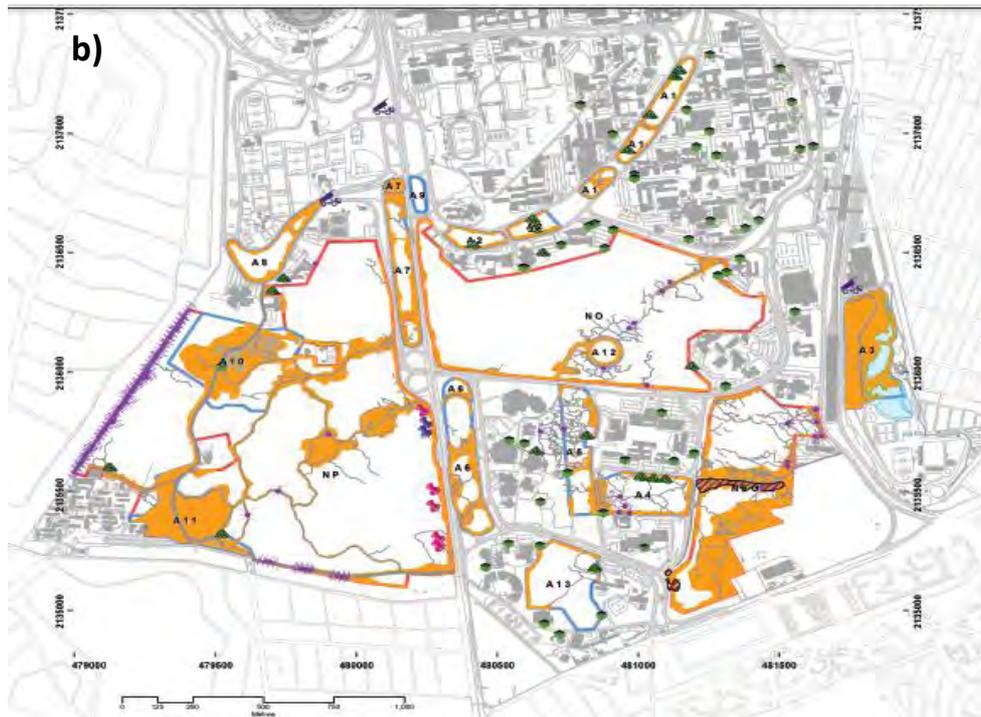


Figura 2. Mapas de riesgo de la Reserva Ecológica de Pedregal de San Ángel (REPSA). a) Mapa de incendios coincidente en algunas zonas con la distribución del pasto kikuyo (figura 16). b) Mapa de relleno de cascajo que también coincide con la distribución del pasto kikuyo. Imágenes tomadas de Lot y colaboradores (2012).

### 3.4 Percepción remota

La corteza terrestre así como los elementos superficiales y fenómenos que ésta contiene se encuentran en un cambio constante, esto a causa de fenómenos naturales, o bien, a últimas fechas por actividades humanas. Para el análisis de estos fenómenos se utiliza la percepción remota, la cual se puede definir como la adquisición de información sobre un objeto a distancia; esto es, sin que exista contacto material entre el objeto que se está observando o bien el sistema de fenómenos y el observador (Pérez, 2007). La percepción remota se realiza mediante sensores instalados en diversas plataformas donde destacan las espaciales que toman imágenes de la superficie terrestre, suponiendo que entre

el sensor y la corteza existe un flujo de energía de la reflexión de la energía solar o bien por un haz disparado por el sensor. La energía que será desprendida entre el objeto y el sensor se le conoce como energía electromagnética (Chuvienco, 1996).

La percepción remota es una técnica que se comenzó a utilizar en 1930 en el monitoreo de especies vegetales debido a sus bajos costos y rapidez, su auge es reciente debido a la resolución actual de los sensores que permite mayor definición de la cobertura vegetal (Lizarazo, 2013). Los elementos básicos que deben ser conocidos y que se deben tomar en cuenta cuando se realiza un análisis de vegetación, como en cualquier otro análisis en el campo de la percepción remota se describen a continuación y constituyen los elementos de la percepción remota (Chuvienco, 1996; Pérez, 2007; Lizarazo, 2013; Figura 3).

**Fuente de energía:** es de donde proviene la radiación electromagnética que es captada por el sensor que puede ser emitida del Sol o por el sensor, para detectar el objeto a estudiar.

**Sensor:** es el elemento que tiene como función la recepción en forma de energía electromagnética, de la información transmitida por las cubiertas; las codifica, las almacena y posteriormente las envía al sistema de recepción. De acuerdo a si los sensores captan (pasivos) o generan energía (activos) el tipo de imagen será distinto. Por ejemplo, los sensores pasivos pueden ser tipo Landsat, SPOT y las cámaras montadas en los vuelos no tripulados (Figuras 4 y 5). Los sensores activos son los radares, radiómetros de microondas y cámaras fotográficas cuando utilizan como fuente de radiación el flash (Chuvienco, 1996; Pérez, 2007). La mayoría de los sensores remotos ubicados tanto en satélites como en aviones no tripulados, son los electro-ópticos. Éstos detectan la energía electromagnética

debido a que son detectores electrónicos fotosensibles creando una señal eléctrica proporcional a la cantidad de energía electromagnética que reciben para grabar la imagen. Las señales eléctricas son grabadas electrónicamente usando un sistema de computación o electrónico adicional. La ventaja de estos datos electrónicos es que pueden ser fácilmente transmitidos desde los satélites hasta la tierra usando equipo de radio comunicaciones (antena).

**Superficie Terrestre:** corresponde a todas las coberturas que se encuentran en ella; vegetación, agua, construcciones humanas, entre otras, que absorben o reflejan la señal energética según sus propias características físicas.

**Interacción atmósfera-objeto:** la atmósfera es un factor que modifica la intensidad y la distribución espectral de la energía que recibe un sensor. El flujo de energía recibido por el sensor depende de las condiciones atmosféricas, la localización ambiental de la zona a estudiar (como pueden ser zonas donde se encuentren condiciones atmosféricas adversas) y la inclinación de observación del sensor (ángulo con el que la superficie refleje la energía y que se encuentra ligado con la rugosidad presentada por la superficie). Así, se distinguen dos tipos de superficies: aquéllas que reflejan con el mismo ángulo y aquéllas que reflejan en todas las direcciones.

**Recepción y procesamiento:** la recepción de la energía electromagnética captada por el sensor se transforma en una imagen. Ésta graba la información recibida realizando correcciones y las distribuye nuevamente en una imagen. La resolución de la imagen depende de los sensores como se explica adelante.

**Interpretación y aplicación:** convierte la información de las imágenes según las necesidades propias, es decir, interpretando las imágenes de forma visual y/o digital para el estudio que esté realizando.



Figura 3. Elementos del sistema de percepción remota. Imagen elaborada por Alcántara (2016).



Figura 4. Tipos de sensores en la percepción remota. Imagen tomada de Pérez (2007).



Figura 5. Ejemplo de un sensor pasivo en sistemas de percepción remota: fotografía de un vehículo aéreo no tripulado (DRON). Fotografía tomada y proporcionada por Peralta (2015).

### 3.5 Espectro electromagnético

Se le conoce como espectro electromagnético a la distribución de radiación electromagnética emitida por alguna fuente de energía. Las regiones del espectro electromagnético se distinguen según su longitud de onda, frecuencia y energía. Cada material en la superficie de la Tierra va a transmitir de forma diferente la energía recibida por el Sol a través de longitudes de ondas diversas; de esta forma, se distingue un objeto de otro. La energía electromagnética al ser reflejada por la superficie terrestre o materiales va a atravesar el espacio a la velocidad de la luz en la forma de ondas. El arreglo de radiación de todas las longitudes de onda, desde los rayos gamma hasta las ondas de radio, se conoce como espectro electromagnético (Chuvieco, 1996; Pérez, 2007; Von-Martini *et*

al., 2011; Figura 6). De acuerdo con Chuvieco (1996), la observación de la Tierra desde el espacio va a destacar las regiones espectrales que son captadas por los sensores y que tienen distintas características (Cuadro 1).

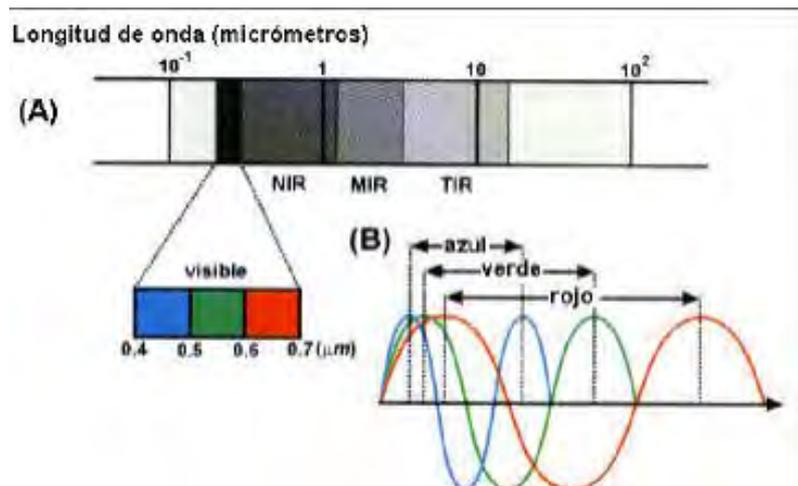


Figura 6. Diagrama del espectro electromagnético. Tomado de Von-Martini y col. (2011).

Cuadro 1. Características de la regiones espectrales que forman el espectro electromagnético. Tomado de Chuvieco (1996).

Región Espectral (bandas)	Longitud de onda (λ)	Características
Rayos Gamma	< 0,03 nm	Radiación completamente absorbida por las capas superiores de la atmósfera. No se usa en teledetección
Rayos X	0,03 - 30 nm	Radiación completamente absorbida por la atmósfera. No se usa en teledetección
Ultravioleta	0,03 - 04 μm	La radiación con λ<0,3μm es completamente absorbida por la capa de ozono
Visible (azul, verde y rojo)	0,4 - 0,7 μm	Se puede detectar a través de fotodetectores y películas fotosensibles normales (color y B/N).
Infrarrojo Próximo	0,7 - 1,3 μm	Discrimina masas vegetales y concentraciones de humedad.
Infrarrojo Medio	1,3 - 8 μm	Estima contenido de humedad en la vegetación y detección de focos de alta temperatura.
Infrarrojo Térmico	8 - 14 μm	detecta el calor proveniente de la mayor parte de la cubierta terrestre
Micro-Ondas	0,1 - 100 cm	Radiación de grandes longitudes de onda, capaces de penetrar nubes, nieblas y lluvia
Ondas de Radio	> 100 cm	Radiación con las mayores longitudes de onda del espectro. Usadas en telecomunicaciones

Todos estos factores definen lo que se le conoce como comportamiento espectral teórico de las superficies. De esta forma, por ejemplo, con un aparato de uso diario que usa sensores electro-ópticos como las cámaras, se graban datos sobre cintas magnéticas que pueden ser usadas para recrear las imágenes de forma electrónica en una memoria. El resultado de la lectura de las cintas a través de un dispositivo de cómputo permite apreciar la *firma espectral* (Billingsley, 1984; Pérez, 2007; Von-Martini *et al.*, 2011).

### **3.6 Firmas espectrales**

La superficie de la Tierra está cubierta en su mayor parte por suelos, rocas, agua y vegetación. El conocimiento de sus propiedades espectrales es muy importante para la elección de las bandas en el espectro electromagnético para su estudio mediante sensores remotos (Pérez, 2007). La firma espectral se podría definir como un flujo radiante que emana de la Tierra y que nos brinda la información de cada elemento de la misma. Cada materia que contiene la corteza terrestre tiene una forma específica de reflejar el espectro electromagnético (Figura 7). Conociendo cada una de estas formas de reflejar de cada objeto, entonces se puede inferir qué tipo de material es el que se está observando en una imagen multi-espectral adquirida (Von-Martini *et al.*, 2011).

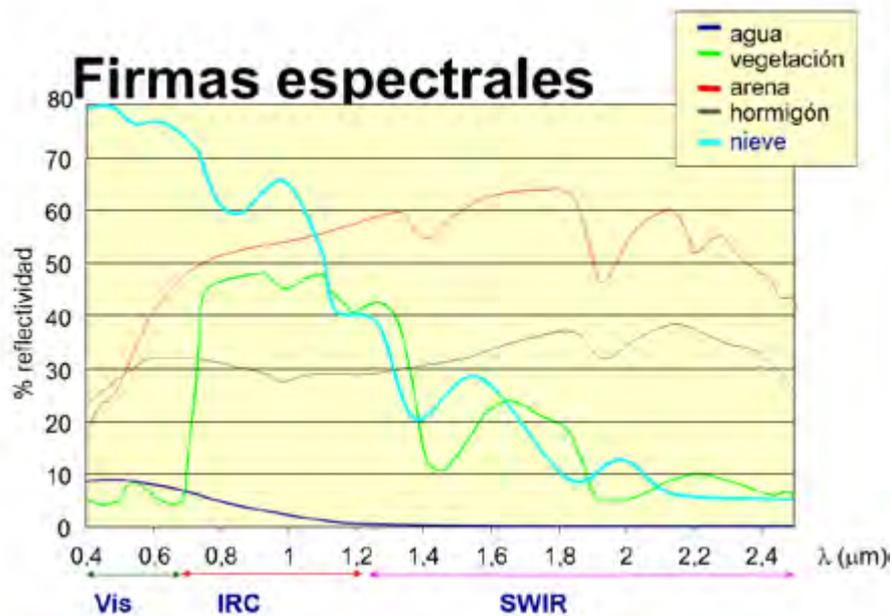


Figura 7. Gráfico que muestra las distintas firmas espectrales de diversos materiales. Imagen tomada de Chuvieco (1996).

### 3.7 Respuesta espectral de la vegetación

El comportamiento espectral de la vegetación no es constante debido a que es el resultado de múltiples factores biológicos y geográficos. Para poder hacer evaluaciones de vegetación como su reconocimiento, distribución y/o cobertura, entre otros, se tendrán que considerar algunos factores de acuerdo con Billingsley (1984) y Von-Martini y col. (2011):

**Factores de reflectividad de la hoja:** pigmentos, estructura de la hoja y contenido de agua de la misma.

**Características geométricas de la planta:** área foliar, forma de la hoja, distribución en la planta, etc.

**Situación geográfica de la vegetación:** pendiente, orientación, asociación con otras especies (Figura 8), reflectividad del sustrato, geometría de plantación, condiciones atmosféricas, entre otros

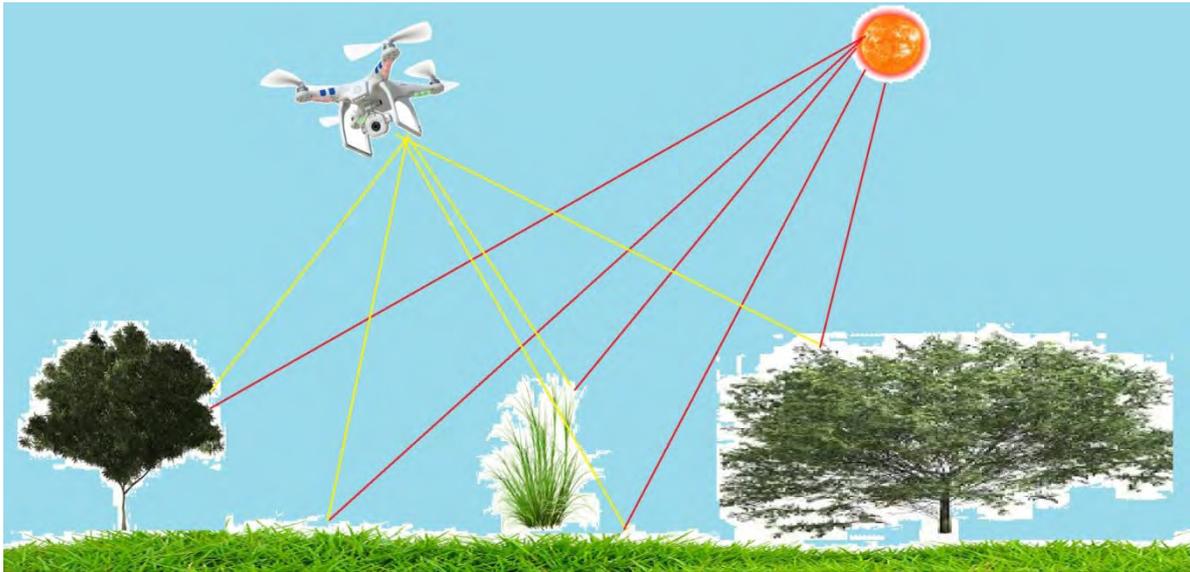


Figura 8. Ejemplo de asociación del césped con otras especies vegetales donde se aprecia que queda cubierto por los estratos superiores de la vegetación (líneas amarillas) al ser incididas por la energía solar (líneas rojas). Imagen elaborada por Alcántara (2016).

Las variaciones en la estructura interna de las hojas son la causa principal de que la respuesta espectral sea diferente de una especie a otra (Chuvienco, 1996). La vegetación tiene una reflectividad baja en el espectro visible al ser absorbida en la banda de color verde debido principalmente a la clorofila, la xantofila y los carotenos (Billingsley, 1984). Sin embargo, la reflectividad es muy alta en el infrarrojo cercano debido al calentamiento de la planta por la energía solar y la humedad presente en el mesófilo esponjoso (entre 0.7 y 1.3  $\mu\text{m}$ ) (Von Martini *et al.*, 2011), en contraste con la baja reflectividad que ofrece en el espectro visible especialmente en la banda azul y la roja. Durante el otoño, las hojas pierden los cloroplastos (órganos que contienen la clorofila) ya que dejan de ser necesarios al cesar la actividad fotosintética, esto también depende si la planta es perennifolia o caducifolia; por tanto, la clorofila ya no constituye el pigmento principal y las plantas adquieren un color amarillento. En este momento, que en

algunos lugares corresponde a las sequías, es cuando se puede ver reflejado el espectro visible. La sequedad de las hojas conlleva también una reducción en la reflectividad en el infrarrojo por la pérdida de humedad (Von Martini *et al.*, 2011). Cabe resaltar que la banda roja del espectro visible (0.6  $\mu\text{m}$  y 0.69  $\mu\text{m}$ ) es utilizada para la distinción de comunidades vegetales. Esto se debe a las diferencias de reflectividad entre las especies vegetales para captar las distintas absorciones debidas a la clorofila y con ello se pueden discriminar suelos y otros materiales de la vegetación (Lizarazo, 2013; Figura 9).

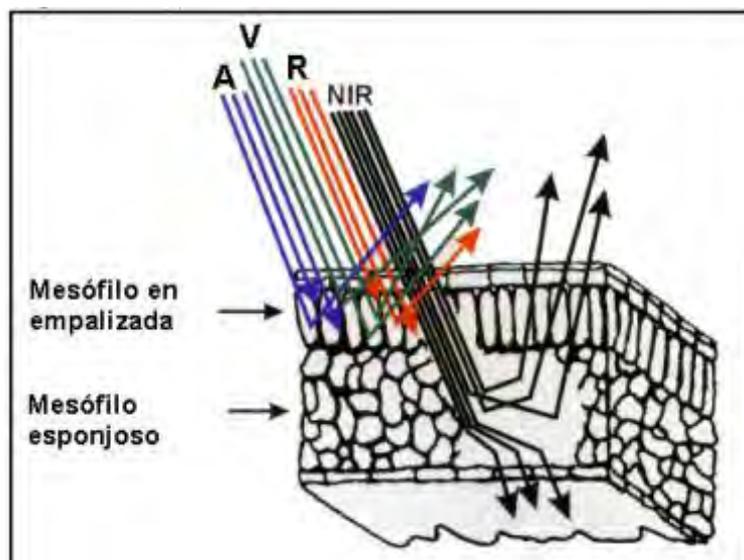


Figura 9. Esquema de la composición interna de las hojas donde se aprecia la absorción del espectro visible (flechas de colores) por parte de los cloroplastos en la parte más externa de éstas (mesófilo en empalizada), mientras que parte del infrarrojo cercano (NIR) se refleja en la parte interna (mesófilo esponjoso). Imagen adquirida de Von-Martini y col. (2011).

Es evidente que para centrar un estudio científico de discriminación de vegetación a partir de sensores espaciales, se debe utilizar el espectro rojo (0.645  $\mu\text{m}$ ) y el infrarrojo cercano (0.7 a 1.3  $\mu\text{m}$ ) (Figura 10). La banda correspondiente al rojo representa una de las bandas más importantes para la discriminación de vegetación (Vincent, 1997).

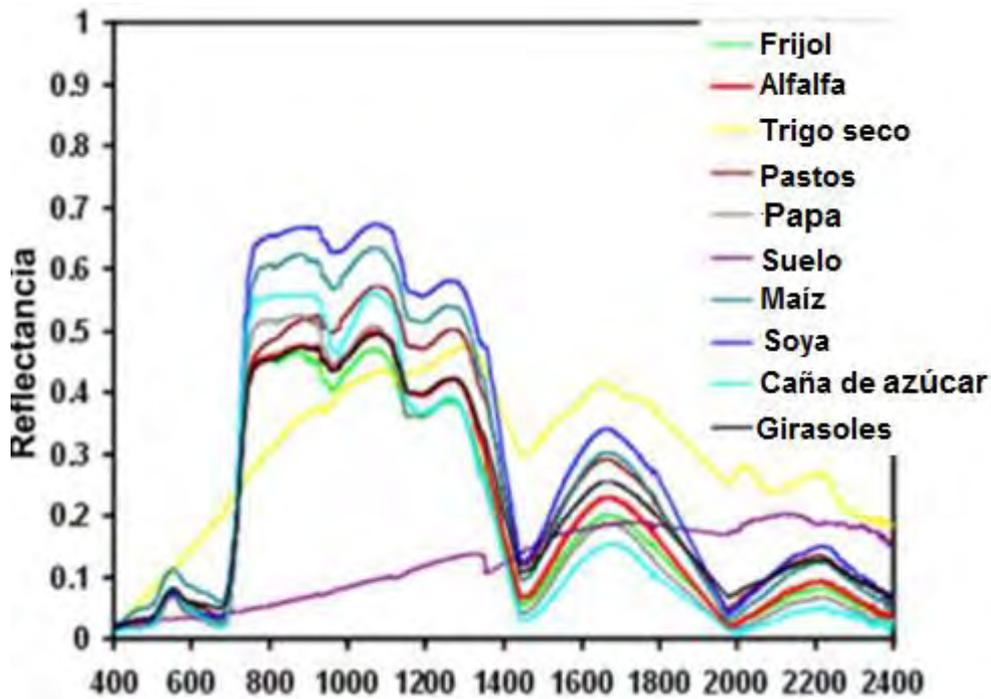


Figura 10. Firmas espectrales de algunas especies vegetales. Imagen tomada y modificada de Lizarazo (2013).

### 3.8 Imágenes multi-espectrales

Una imagen es una representación gráfica de la medición de energía electromagnética registrada por un sensor; la resolución de ésta estará determinada por las características del sensor por el que sean obtenidos los datos. Este parámetro normalmente describe el número de píxeles que el usuario puede desplegar en un dispositivo (monitor), o el área de la superficie terrestre que el píxel representa en la imagen. Consideraremos las resoluciones, espacial, espectral, radiométrica y temporal (Chuvieco, 1996; Pérez, 2007).

**Resolución Espacial**, es la capacidad que tiene el sensor de distinguir el objeto más pequeño sobre la imagen. Este objeto se visualiza en la unidad mínima de información representada en la misma conocida como píxel. Cuanto menor es el objeto que se puede registrar, mayor tendrá que ser la resolución del sensor (Pérez, 2007; Figura 11).

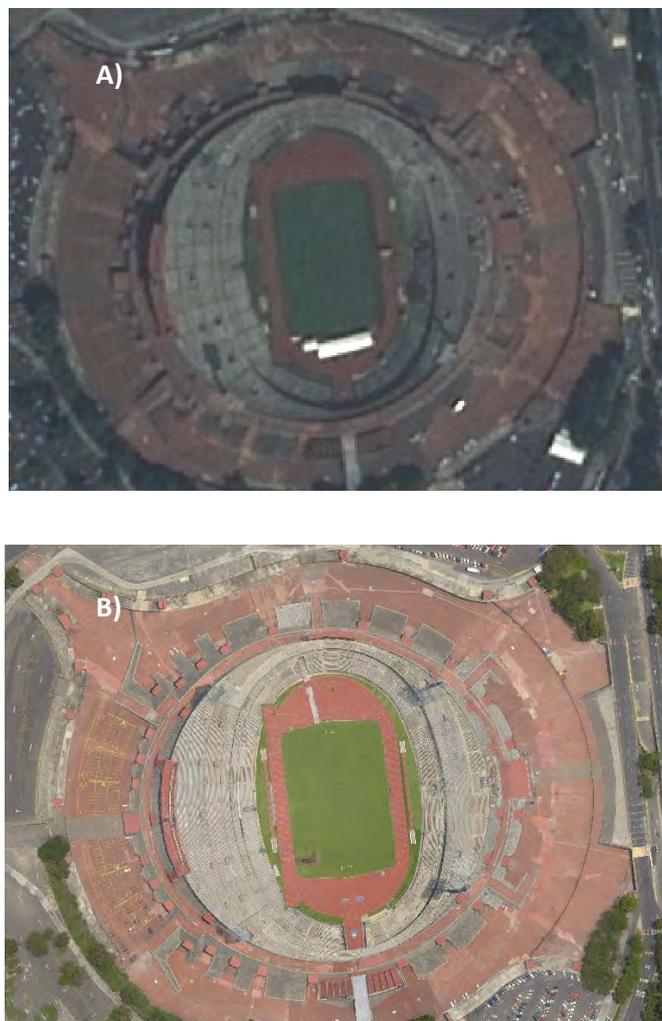


Figura 11. Diferentes resoluciones según el tamaño del píxel adquirido por distintos sensores en la imagen del estadio olímpico universitario. a) Spot 7: 6m por píxel. b) fotografía aérea generada por un dron:15 cm por píxel, Peralta (2015).

**Resolución Espectral**, indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor, indica cuántas bandas es capaz de captar el sensor (multi- espectral, pancromática, infrarrojos, entre otros) (Pérez, 2007).

**Resolución Radiométrica**: es la sensibilidad del sensor para captar variaciones espectrales que le son reflejadas, se determina por la escala de grises en la fotografía, a cada celda se le da un nivel digital (ND). Se expresa en el número de bits principalmente, que son  $2^8 = 256$  niveles por píxel (Mhel y Peinado 1997).

**Resolución Temporal**: es la frecuencia o periodicidad con que el sensor adquiere imágenes de la misma zona de la superficie terrestre (Chuvienco, 1996).

El estudio de la vegetación cuenta con una gran cantidad de imágenes multiespectrales disponibles (Cuadro 2), por lo que es recomendable utilizar aquellas en las que podamos diferenciar la firma espectral de la especie seleccionada y el tamaño de la comunidad vegetal a manejar (Mas *et al.*, 2003).

Las imágenes están confeccionadas por matrices, se debe pensar en una imagen multiespectral como una cuadrícula, en las que cada celda representa un píxel.

Cuadro 2. Imágenes obtenidas a través de sensores remotos donde se puede ver la mejor resolución para elaborar un estudio de vegetación. Tomado de Lizarazo (2013).

Sensor	Plataforma	Fuente	Tipo de datos	Resolución			No.
				Espectral	Espacial	Tempora	Bandas
IKONOS	Satélite	Pasiva	Multi-espectral	400-1100 nm	4m	2-3 días	4 + PAN
QuickBird	Satélite	Pasiva	Multi-espectral	450-900 nm	2.5m	2-5 días	4 + PAN
Landsat	Satélite	Pasiva	Multi-espectral	450-12500 nm	30m	16 días	7 + PAN
Spot	Satélite	Pasiva	Multi-espectral	500-890 nm	10m	26 días	4 + PAN
RapidEye	Satélite	Pasiva	Multi-espectral	440-850 nm	6.5m	1 día	5
Duncan Tech Camera	Avión	Pasiva	Multi-espectral	400-1100nm	s/n altura de vuelo	N.A.	3-5
E01- Hyperion	Satélite	Pasiva	Hiper-espectral	400-2400 nm	30m	16 días	220
GreenSeeker	Vehículo en tierra	Activa	Multi-espectral	656 y 774 nm	0.6m	N.A.	2
Crop Circle	Vehículo en tierra	Activa		Visible e IR ajustable	0.6m	N.A.	3

Como se mencionó anteriormente, esta energía electromagnética es recibida por el sensor que capta la radiación que proviene de cada uno de los elementos en la superficie terrestre y la almacena de cada uno de los píxeles, de acuerdo con las diferentes firmas espectrales, se le agrega un color o tonalidad del espectro visible; este valor es llamado Nivel Digital (ND). La cantidad de niveles digitales que se podrá representar dependerá de la Resolución Radiométrica del sensor. La posición de cada píxel en la imagen satelital estará determinada por un eje de coordenadas X (columnas de la matriz), Y (filas de la matriz) y Z (Nivel digital que es el valor de intensidad de la escala de grises (Mehl y Peinado, 1997; Figura 12).

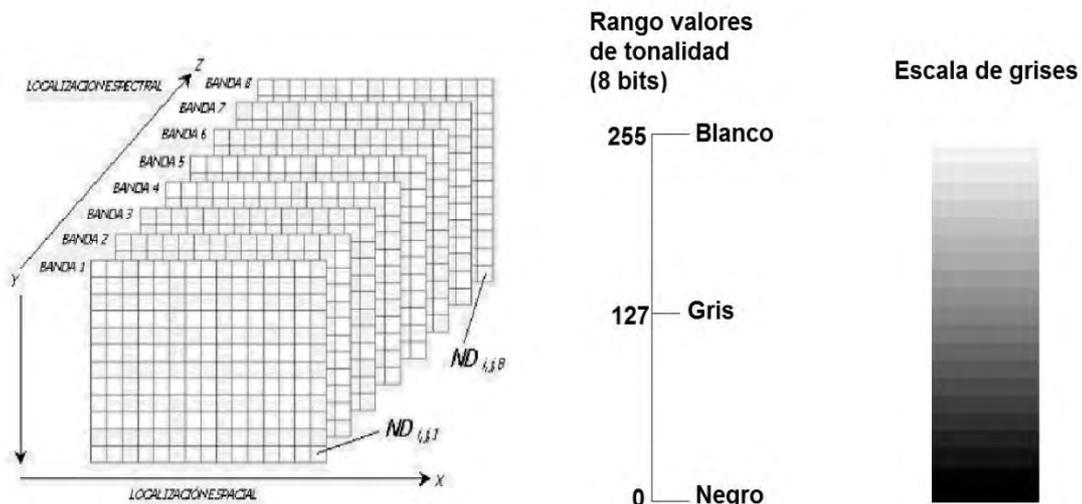


Figura 12. La estructura de una imagen multispectral. Tomado y modificado de Arango-Gutiérrez y col. (2005).

### 3.9 Interpretación digital de las imágenes

Los procesos mediante los cuales se pueden interpretar las imágenes, llevados a cabo por los diferentes softwares, mejoran el estudio de las interpretaciones de las imágenes, a diferencia de la sola interpretación visual. A través de los procesos realizados por los softwares, se identifica y extrae la información sobre las firmas espectrales, aunque requiere de la verificación del usuario para diagnosticar la fidelidad de la información extraída.

Las imágenes multispectrales, dicho ya, representan la firma espectral de cada uno de los diferentes elementos de la superficie en cada uno de los píxeles. Esa respuesta espectral varía de una a otra banda, causando que un objeto que es identificado en una banda, en otra no se vea (Pérez, 2007). La clasificación multispectral es un proceso de identificación y extracción de información de esas firmas espectrales asignando los píxeles a diferentes categorías o clases

de acuerdo con firmas espectrales similares (Vincent, 1997). Las diferentes clases pueden ser, agua, vegetación, construcciones, suelo, formaciones geomorfológicas, entre otros. La clasificación es fundamental en el análisis de imágenes y su objetivo es categorizar los píxeles de la imagen en varias clases para obtener mapas temáticos de las distintas coberturas existentes en la imagen (Mehl y Peinado 1997).

### **3.10 Clasificación supervisada**

La clasificación supervisada se basa en la disponibilidad de áreas de entrenamiento (Chuvieco, 1996). Se trata de áreas de las que se tiene información verificada en campo y que previamente se encontró que la firma espectral que se ha decidido clasificar está presente y que servirán para generar una clase espectral o clases espectrales. Las áreas de entrenamiento deben ser lo más homogéneas posibles, es decir, no deben contener una combinación de varios elementos y preferentemente se deben conocer los elementos existentes el día que el sensor captó la imagen (Jensen, 1986).

Existen una serie de técnicas con las que se puede clasificar de modo supervisado una imagen; éstas se basan desde una serie de análisis no estadísticos, estadísticos, no paramétricos y métodos subpixel, pero se hará hincapié en la técnica de máxima verosimilitud, la cual consiste en asumir que los datos siguen una función de distribución normal para asignar la probabilidad de que un píxel cualquiera pertenezca a cada una de las clases (Alonso-Sarría, 2006b). El píxel se asigna de este modo a la clase a la que es más probable que pertenezca (Figura 13).

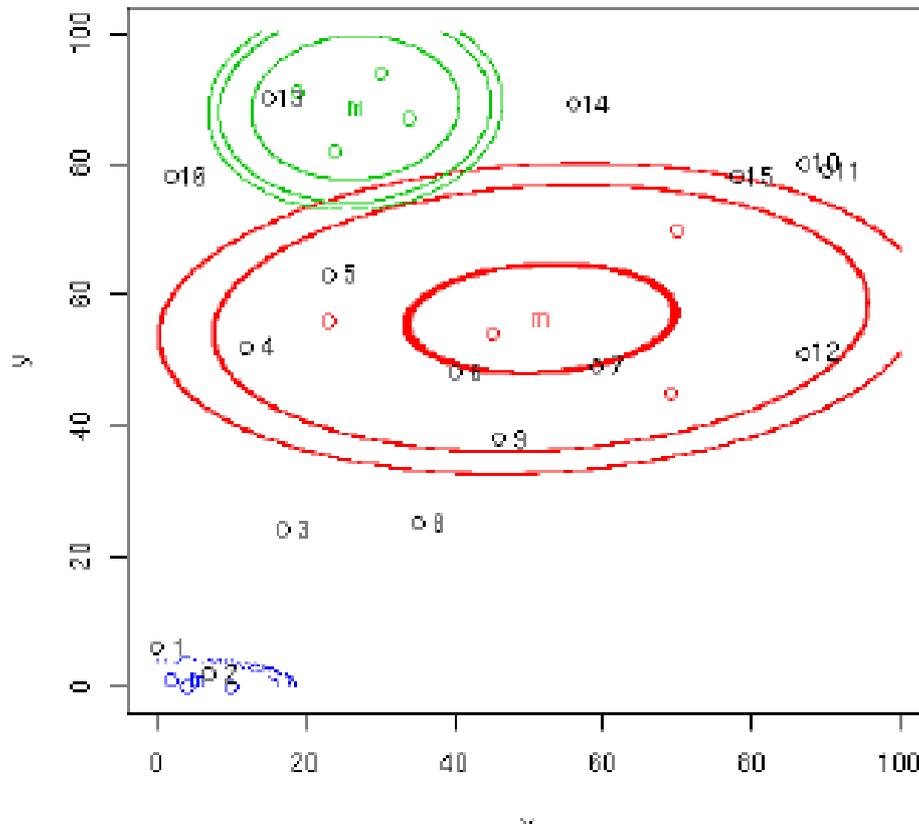


Figura 13. Imagen que muestra un ejemplo de la clasificación por máxima probabilidad. Se ve el centroide y los elementos más próximos que coinciden con éste, tendrán, por lo tanto, mayor probabilidad de que los cercanos pertenezcan a la misma clase. Imagen tomada de Alonso-Sarría (2006a).

### 3.11 Clasificación no supervisada

Se utilizan algoritmos de clasificación automática en los que los individuos más próximos se van agrupando formando clases (Chuvieco 1996). Uno de los más habituales es el clustering jerárquico. Éste consta de N pasos siendo N el número total de individuos a clasificar. En cada paso se identifican los dos individuos más similares (próximos), se hace una clase con ellos, éstos se sustituyen por el centroide de la clase resultante. De este modo, cada paso analiza un individuo menos que el anterior ya que los individuos van siendo sustituidos por clases. El

proceso se detiene cuando se ha alcanzado un número de clases igual al número de clases que había sido establecido *a priori*. Al final, el usuario debe etiquetar las clases resultantes por este proceso (Pérez, 2007; Figura 14).

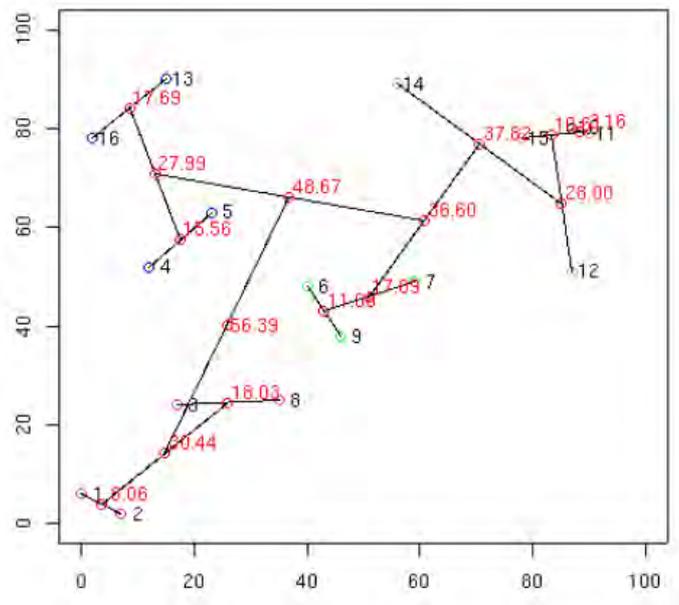


Figura 14. Imagen de clasificación no supervisada. Se puede observar cómo los individuos se agrupan por distancia, y a partir de ahí, se comienzan a hacer las clases. Tomado de Alonso-Sarría (2006a).

### 3.12 Evaluación de los mapas elaborados a partir de la percepción remota

La generación de mapas temáticos a partir de la percepción remota es muy común; en el pasado no existía una forma confiable para la evaluación de la veracidad del mapa generado por esta técnica. En tiempos recientes, se han establecido una serie de estándares para que los mapas puedan ser considerados como confiables (Foody, 2001).

Mas y colaboradores (2003) indicaron que la evaluación de la confiabilidad de los mapas se podrá establecer a partir de sitios de muestreo; en estos sitios de muestreo se podrán reconocer las firmas espectrales que se están evaluando.

Después de esto, se procederá a elaborar una matriz de confusión, la cual evalúa entre los sitios de muestreo y la imagen que se está clasificando. La diagonal principal de esta matriz de confusión, va a indicar la concordancia que existe entre la realidad y la imagen clasificada. Los elementos que queden fuera de la diagonal representan las clases que no fueron asignadas dentro de una categoría correcta; esto se puede ver representado en los valores de omisión y comisión. Los valores de omisión muestran los porcentajes de píxeles que quedaron dentro de una clase que no le corresponde, mientras que los errores de comisión representan los píxeles que fueron asignados dentro de una clase siendo que su firma espectral pertenecía a otra (Chuvieco, 1996).

A partir de los resultados obtenidos mediante a los análisis de las diversas técnicas de percepción remota se pueden elaborar mapas temáticos, los cuales son la representación de objetos sobre la corteza terrestre. Estos dan información descriptiva de manera gráfica del agrupamiento de píxeles, que representan textura, color, tonos entre otros. Para la elaboración de éstos utilizaremos softwares de sistemas de información geográficos (Mumby y Harborne, 1999).

### **3.13 Sistema de Información Geográfica**

Un Sistema de Información Geográfico (SIG) es un sistema que integra el hardware y el software para capturar, almacenar, manipular, analizar y mostrar datos referenciados espacialmente por los usuarios (Monroy y Travieso-Bello, 2006). El SIG va a presentar de manera descriptiva objetos del mundo real, los

cuales tienen una representación gráfica y que permite realizar cualquier tipo de medición respecto a su tamaño y dimensión relativa a la superficie terrestre. El SIG se caracteriza por presentar en capas o particularizar un conjunto de procedimientos sobre una base descriptiva (Olaya, 2011). Cuenta también con una base de datos gráfica con información georreferenciada o de tipo espacial. La mayor utilidad de un SIG está relacionada con la capacidad que posee de construir modelos o representaciones del mundo real a partir de las bases de datos digitales, lo que se logra aplicando una serie de procedimientos específicos para el análisis de éste. El SIG es una herramienta de gran utilidad para analizar fenómenos sobre la superficie terrestre que tengan tendencias y así poder lograr establecer los diferentes factores influyentes en o lograr predicciones de éstos (Alonso-Sarría, 2006a). Los SIGs representan principalmente dos formas de datos (Huisman y De By, 2009):

**Modelo ráster.** En este modelo, cada superficie a representar se divide en filas y columnas, formando una cuadrícula; cada cuadro guarda tanto las coordenadas de la localización como el valor asociado. La localización de cada celda es implícita, dependiendo directamente del orden que ocupa en la rejilla, a diferencia de la estructura vectorial en la que se almacena de forma explícita la topología. Aquí entran las imágenes multi espectrales (Alonso-Sarría, 2006a).

**Modelo vectorial.** Es una estructura utilizada para almacenar datos geográficos representados por puntos, líneas y polígonos. Las entidades quedan definidas solamente por sus límites y los segmentos curvos se representan como una serie de arcos conectados (Alonso-Sarría, 2006a).

### **3.14 Estudios realizados en el diagnóstico de vegetación con estas herramientas**

Los aviones no tripulados para el monitoreo de especies invasoras, ha sido una técnica impulsada en estos últimos años debido a que las imágenes generadas por satélites pueden tener una resolución no adecuada para poder identificar estas especies. Al respecto, Sathishkumar y colaboradores (2016) monitorearon *Phragmites australis*, un pasto que puede alcanzar los 5 metros de altura y que afecta de manera importante los humedales de Estados Unidos, modificando estos ecosistemas. El área de estudio fue parte del río Misisipi, identificando en campo la firma espectral de esta especie, así como los otros materiales y texturas para poder realizar una clasificación supervisada de acuerdo a los procedimientos explicados anteriormente. Otro trabajo reciente es el de Mbulisi y colaboradores (2016) quienes analizaron pastizales en Pietermaritzburg, Sudáfrica, mediante el uso de sensores remotos y las imágenes multiespectrales generadas. Con el fin de evaluar la salud de pastizales, sus zonas de influencia, así como calcular su biomasa, generaron diversos mapas basados en la firma espectral de los pastos autóctonos proponiendo las zonas prioritarias donde se requiere su manejo.

#### **IV. ANTECEDENTES**

Los antecedentes sobre la documentación del pasto kikuyo en la Reserva son recientes debido posiblemente a que no fue reconocido en los listados florísticos dado que no es una especie nativa y/o posiblemente fue discriminado de los

registros en las zonas de muestreo de estudios previos (Maravilla-Romero, 2011).

Cano-Santana y colaboradores (2008) fueron los primeros que lo asumen como una especie naturalizada en las zonas perturbadas. En su estudio, realizaron en el periodo de sequía y lluvias de abril del 2005 a agosto del 2006, recorridos intensivos en tres zonas incorporadas a la REPSA, con el fin de evaluar el nivel de disturbio en que se encontraban. A través de un listado florístico reconocieron el establecimiento de varias especies exóticas invasoras, siendo la más predominante el pasto kikuyo en la zona de amortiguamiento A 13.

El monitoreo de especies exóticas de manera formal en la REPSA inició en el año 2005 (Antonio-Garcés, 2008; Antonio-Garcés *et al.*, 2009) en donde se realizó un levantamiento cualitativo de algunas zonas de crecimiento del pasto kikuyo y otras especies en una sección sujeta a restauración de la zona de amortiguamiento A8. En este estudio, se indicaron algunas de las condiciones provocadas por disturbios antropogénicos que benefician la expansión del pasto kikuyo y que fueron observadas en el trabajo de campo como los incendios, la acumulación de desechos de jardinería y el cascajo que han estimulado su crecimiento masivo (Figura 25). Se encontró que en el mes de diciembre, en la época de secas, éste incrementaba su cobertura hasta en un 10 % después de la restauración de la zona. Como resultado, se realizó un plan de manejo para ésta y algunas especies exóticas que estaban presentes en las zonas de amortiguamiento para el rescate del sustrato basáltico.

En el mismo año 2005, Peralta y Molina realizaron la última cartografía con delimitaciones precisas para la REPSA a partir de sensores pasivos (cámara

fotográfica), donde elaboraron el primer ortomosaico a una escala de 1:20, 000 (Peralta y Molina, 2009). Como resultado, generaron una fotografía aérea multiespectral con el espectro visible (Figura 15) y una fotografía con el infrarrojo cercano con la imagen con el espectro visible. Con ello se logró una clasificación visual de los materiales en el *campus* y con la imagen en infrarrojo se corroboró la presencia de matorral en el mismo y las áreas susceptibles a la incorporación a la REPSA, estas imágenes fueron validadas mediante una corroboración en campo. También, a partir de este proceso y el posterior levantamiento topográfico, lograron el mapa definitivo de la REPSA.

A partir de estas imágenes, Rodríguez y Camarena en el año 2008, realizaron la primera identificación del pasto kikuyo en la reserva y áreas de amortiguamiento, basándose en los polígonos de la REPSA, elaborados por Peralta y Molina en el 2005. Como resultado, elaboraron el primer mapa de distribución del pasto kikuyo publicado en el Atlas de Riesgos (Lot *et al.*, 2012; Fig. 16).

Maravilla-Romero (2011) estudió el efecto de la fragmentación en nueve zonas de amortiguamiento dentro de la Ciudad Universitaria encontrando que la disminución del área, así como su cercanía a la zona núcleo, podía influenciar el estado de conservación de la vegetación nativa. A pesar de que generó un listado de especies introducidas y malezas, no destacó al pasto kikuyo como un problema preponderante en los efectos de disturbio que inciden en la conservación. En este trabajo, se dio un bajo valor de importancia al pasto, siendo sólo en tres zonas de las estudiadas (A7, A9 y Facultad de Ciencias) donde se le reconoce como abundante discutiendo que incrementa la línea de borde de crecimiento de las malezas. Una de las razones por las que no se reconoce en este estudio al pasto kikuyo como una amenaza, es porque se le

incluyó como una especie dentro del conjunto de malezas, disminuyendo con esto su valor de importancia. Muñoz-Saavedra (2013) cuantificó la abundancia del pasto kikuyo en la zona de amortiguamiento A 11 encontrando que después de la restauración de la zona, no pudo disminuir su dominancia estimada en un 32% para el año 2010. En el año 2011, Estañol-Tecuatl (2014) realizó un estudio del disturbio antropogénico en la REPSA que ha causado la pérdida del matorral y beneficiado a las diversas especies exóticas e invasoras principalmente el pasto kikuyo. En las zonas de amortiguamiento A8, A11 y la zona Sur Oriente, se atribuyó la baja dominancia de especies nativas debido a la alta dominancia del pasto kikuyo.



Figura 15. Fotografía aérea donde se identificaron los límites de la REPSA. Tomado de Peralta y Molina (2009).

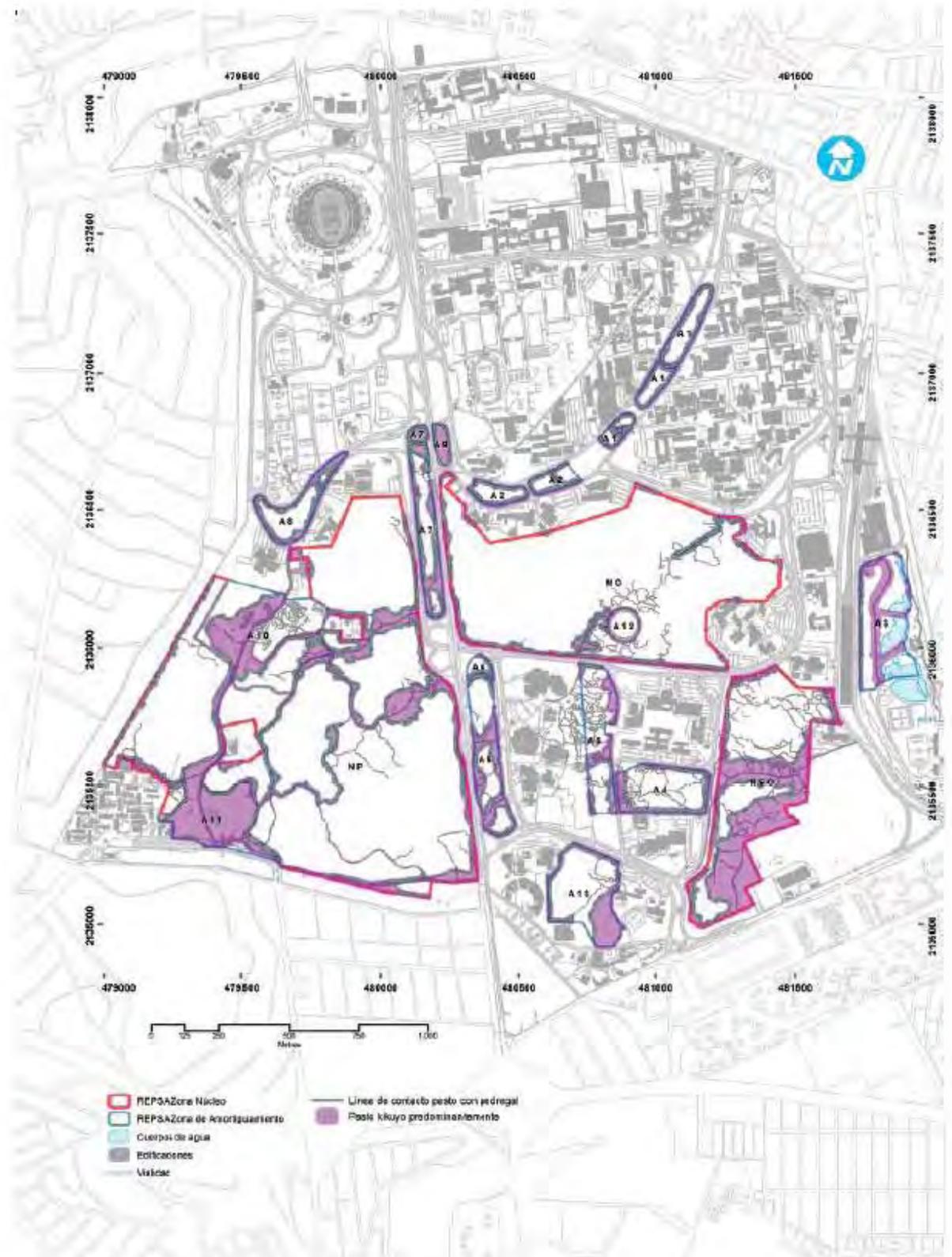


Figura 16. Mapa de distribución del pasto kikuyo. Tomado del Atlas de Riesgos 2012 y elaborado por Rodríguez y Camarena.

## **V. Justificación**

La REPSA es un ecosistema único dentro del valle de México y un relicto de vegetación en el que se encuentran muchas plantas adaptadas a este entorno. El problema del desplazamiento de especies nativas es grave y la mayor parte de los trabajos que se han realizado en estos ecosistemas, han abordado principalmente las descripciones taxonómicas. Sin embargo, es preocupante que para una especie de la alta peligrosidad que representa el kikuyo con su agresividad para crecer, perdurar y desplazar especies, no existan más trabajos en esta Reserva sobre su abundancia y distribución. Es urgente que se realicen evaluaciones encaminadas a generar información primero, sobre su extensión actual en las zonas más vulnerables con herramientas prácticas que permitan diagnosticar de manera fiable, práctica y rápida su presencia. Con ello, se pueden generar a futuro mapas de riesgo para una planeación adecuada en el manejo de esta especie, al menos, en las zonas núcleo de la REPSA y se puedan buscar alternativas para llevar a cabo la erradicación tanto de las zonas núcleo como en las de amortiguamiento.

## **VI. Hipótesis**

*Pennisetum clandestinum* es una especie altamente invasora de las zonas de amortiguamiento, por lo que se infiere que desde la última estimación de su distribución en algunas zonas de la Ciudad Universitaria realizada cuatro años atrás

en el 2012 (Lot *et al.*, 2012), se haya incrementado su crecimiento en superficie lo suficiente para poder ser estimado mediante métodos de percepción remota.

## **VII. Objetivo general**

Generar un mapa de distribución de *Pennisetum clandestinum*, actualizado con apoyo de la percepción remota y calcular el porcentaje de superficie que ha invadido en la REPSA.

### **Objetivos particulares**

- Establecer una clasificación no supervisada en imágenes multi-espectrales para diferenciar la clase espectral generada por zonas de crecimiento de *P. clandestinum* en cuatro zonas de amortiguamiento.
- Evaluar la cobertura de pasto kikuyo en campo utilizando el Geopedregal como sitio de referencia para verificar la clase espectral de éste.
- Generar un mapa de distribución actualizada del pasto kikuyo en la REPSA a una escala de 1:2,500, utilizando la clasificación supervisada y comprobando la fiabilidad de la misma.
- Calcular el incremento de cobertura comparando con shapefiles elaborados en el 2012.

## VIII. Metodología

### 8.1 Descripción del sitio de estudio

#### 8.1.1 REPSA

La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel se localiza al suroeste de la Ciudad de México (19 17' N, 99 11' O), dentro de Ciudad Universitaria, el *campus* principal de la UNAM. (Cano-Santana *et al.*, 2008).

Es una reserva ecológica de carácter urbano, particular por su biodiversidad, geomorfología de gran valor paisajístico y protegida por la UNAM, lo cual garantiza su conocimiento a través de las numerosas instituciones dedicadas a la investigación y divulgación científica. Sin embargo, el reto de conservar tan valioso patrimonio es complejo por tratarse de un ecosistema fragmentado que ocupa 237 hectáreas y representa el 33% del *campus* universitario, con la presión del crecimiento urbano de la Ciudad de México.(SЕРЕPSA, 2008).

El territorio de la Reserva está compuesto por 18 fragmentos de área natural, separados por el circuito universitario y la Avenida de los Insurgentes; colinda con 47 dependencias de la UNAM y con 21 terrenos de casas particulares de la colonia Jardines del Pedregal (SЕРЕPSA, 2008).

## 8.1.2 Geopedregal

Entre las instalaciones del *campus* universitario existen pedregales remanentes que, a pesar que no cuentan con un estatus de protección oficial, como es el caso de las zonas de amortiguamiento, son protegidos por la SEREPSA debido a la diversidad biológica que se presentan en ellos (Lot *et al.*, 2012).

El Geopedregal ubicado en el estacionamiento de los institutos de Geografía y Geología, forma parte del programa de adopción de pedregales remanentes en Ciudad Universitaria. Cuenta con 3050 m<sup>2</sup>, y contiene todos los micro ambientes descritos para la REPSA (Instituto de Geología, 2013).



Figura 17. Plano con el polígono oficial de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel de Ciudad Universitaria, UNAM. Distrito Federal, México. Tomado del Atlas de Riesgos (izquierda). Fotografía del Geopedregal generada por A. Peralta (2015) (derecha).

## 8.2. Adquisición y procesamiento de imágenes digitales

Se adquirieron varias imágenes aéreas y shapes del sitio de estudio cuya fuente, formato y fecha se describen en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Imágenes adquiridas para la selección de los sitios de análisis.

Tipo de imagen aérea	Fecha de adquisición	Escala	Formato de datos	Fuente
<b>Cu2015</b>	Febrero 2015	1:2,500	Raster	M. en C. Armando Peralta, Laboratorio de Análisis Geoespacial (LAGE), Instituto Geografía, UNAM
<b>SPOT 6</b>	15/05/2015	1:25,000	Raster	Dra Lilia de Lourdes Manzo Delgado, LAGE, UNAM.
	15/06/2015			
<b>SPOT 7</b>	16/11/2015			
	29/11/2015			
	14/02/2016			
<b>Distribución de pasto kikuyo en la REPSA Ciudad Universitaria.</b>	2012		Vectorial	Arq. Psj. Saúl Rodríguez Palacios. Responsable de Cartografía y Sistemas de Información Geográfica, SEREPSA, UNAM.

### **8.2.1 Clasificación no supervisada**

Las imágenes adquiridas por el dron y SPOT fueron clasificadas de acuerdo con lo descrito previamente por Vega Guzmán y colaboradores (2008) basado en el análisis espectral y visual de vegetación y uso del suelo con imágenes Landsat ETM+ y con apoyo de fotografías aéreas digitales en el Corredor Biológico Chichinautzin, Morelos, México. De acuerdo con ello, se establecieron los parámetros para la clasificación no supervisada mediante el método de Isodata con el programa ENVI 5.3, al cual se le indicó que separara en 20 clases jerárquicas, sin tener un conocimiento previo de las clases existentes en la fotografía multi espectral, pero con el fin de tener una mejor separación entre los diversos materiales existentes:

- 1) Número de clases: en este punto se eligieron como un mínimo de clases 15 y un máximo 20 para que de esta manera, se tuviera una buena discriminación de los materiales presentes en la imagen.
- 2) Interacción máxima: este es el número máximo que se utilizará para agrupar los píxeles de la imagen.
- 3) Mínimo de píxeles en las clases: se eligió que fueran cinco píxeles como mínimo hicieran la interacción para representar una clase.

### **8.2.2 Clasificación visual de las clases**

Para este punto se tuvo que establecer un campo de prueba, un sitio ya conocido a lo largo de un tiempo y con condiciones controladas para determinar las clases espectrales de diversos objetos, discriminando entre ellos los no pertenecientes al sujeto de estudio y que fueron las zonas de crecimiento de *Pennisetum clandestinum* (el pasto kikuyo). Se seleccionó al Geopedregal como sitio de referencia para establecer la clasificación. Cabe mencionar que la verificación en campo se realizó en secas, que concuerda con las fechas de adquisición de las imágenes realizadas por Peralta en el año 2015.

### **8.2.3 Clasificación No Supervisada en Imágenes spot**

En caso de las imágenes SPOT, éstas ya fueron entregadas con correcciones geométrica, atmosférica y radiométrica por parte de la Dra. Manzo Delgado, estas imágenes son multiespectrales, su matriz se conforma del espectro visible y además de la banda pancromática o de elevación del terreno con una resolución de 1.5 m. Sin embargo, debido al tamaño de captura de 60 x 60 km, se tuvieron que hacer recortes sobre de éstas para enfocarse únicamente en el área de estudio. La resolución de las imágenes recortadas, no permitió discriminar las clases espectrales y realizar su verificación en campo. Sin embargo, a nivel temporal, sí

permiten notar un cambio en la distribución del pasto una vez que se ha clasificado su firma de acuerdo con los criterios anteriormente descritos.

#### **8.2.4 Delimitación de las zonas de evaluación del área de cobertura del pasto**

A partir del procesamiento de las imágenes descrito anteriormente, se estableció la clasificación visual de las clases que permitieron discriminar la firma espectral que correspondiera de manera más exacta al crecimiento de *Pennisetum clandestinum*. Dado que dentro de la Reserva muchas zonas de vegetación que han sido invadidas por esta planta crecen de manera conjunta con otras, no es posible establecer una firma espectral exclusiva para esta especie. Se seleccionaron algunos sitios dentro de la REPSA que previamente fueron documentados de manera visual en trabajo de campo donde se cartografiaron sitios de invasión en zonas de amortiguamiento y dentro de zonas núcleo (Anexo 2). Los sitios seleccionados fueron sugeridos por el Arq. Saúl Rodríguez, quien realizó el mapa de distribución en el Atlas de Riesgos, quién realizó el mapa de distribución en el Atlas de Riesgos (Lot *et al.*, 2012).

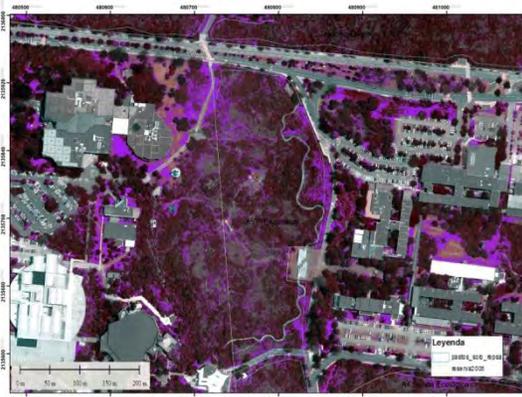
Los sitios seleccionados se muestran en la figura 18 y son cuatro zonas de amortiguamiento (A4, A5, A11 y A13), una de ellas ubicada en la zona núcleo poniente dentro de la REPSA. Se trabajó con la clasificación no supervisada; para esto se imprimieron cuatro cartas de estas zonas con cuadrículas de 20 x 20 m (Figura 19). Se hizo la verificación en campo de que las clases seleccionadas

correspondieran a las zonas de crecimiento del pasto. Esto se hizo utilizando el shape generado por la SEREPSA en el año 2012, que se comparó con la clasificación, con la ayuda del programa Arcmap. En total se comprobaron 100 puntos en campo con el GPS Garmin GPSMAP 64S, donde se tomaron fotos de cada uno de estos puntos sacados cada 40 m o bien donde la agrupación de pasto no apareciera en la carta y correspondiera, por tanto, a un crecimiento del mismo no cartografiado anteriormente. Para ello, se recorrieron los polígonos en razón del primer levantamiento realizado en el 2010 por parte de la SEREPSA con el que se generó el shape.

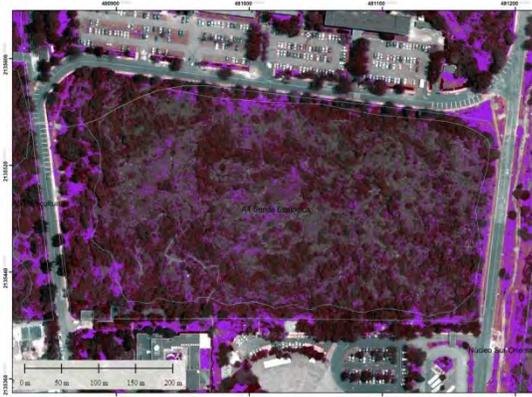


Figura 18. Imagen multiespectral generada por el vuelo de un dron (A. Peralta, 2015) en donde se muestran las zonas seleccionadas en los recuadros verdes en la parte inferior. Las letras indican las zonas de

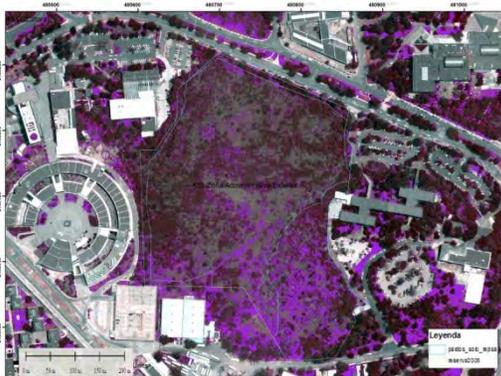
amortiguamiento catalogadas en la REPSA: A5 Paseo de las esculturas, A6 Senda ecológica A13 Unidad administrativa, A11 Vivero alto (ver Fig. 19).



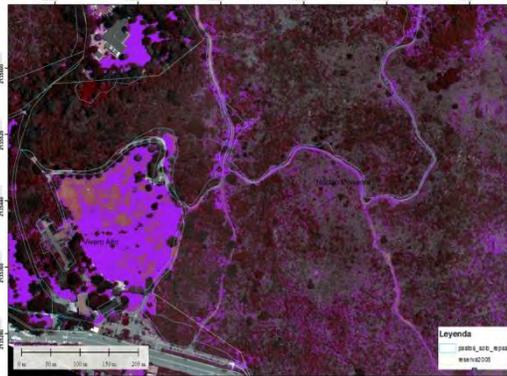
a) Zona de amortiguamiento A5



b) Zona de amortiguamiento A7



c) Zona de amortiguamiento A13



d) Zona de amortiguamiento A11

Figura 19. Selección de los sitios de estudio: imágenes a falso color rojo después de la clasificación no supervisada, donde se muestra la clase perteneciente al pasto kikuyo en capa con el shape de distribución del mismo (magenta).

### **8.2.5 Evaluación mediante método supervisado máxima verosimilitud**

Con los datos de identificación del crecimiento del pasto Kikuyo en el Geopedregal y en las zonas de amortiguamiento, se corroboraron las firmas espectrales mediante la clasificación supervisada (donde se asigna el valor a la especie identificada) con el método "Máxima verosimilitud". Esto se hizo en 21 puntos como evidencia de que el pasto kikuyo se encontraba en estos pixeles para que fuera más probable que los pixeles se agruparan en la clase de forma correcta, en las imágenes CU2015. Se calibraron con 21 de los 100 puntos, debido a que este método consiste en agrupar los elementos con la misma reflectividad y parte de que estos elementos sigan un patrón homogéneo de distribución. Para la comprobación se utilizó la matriz de varianza-covarianza para estimar la probabilidad que un pixel pertenezca a cada una de las clases calibradas en el software (Mas *et al.*, 2003). Estos 21 puntos fueron seleccionados por la dominancia casi exclusiva o exclusiva del pasto kikuyo en ellos. Para ello se utilizó el programa ENVI 5.0. Este mismo proceso se repitió en el resto de los 100 puntos de comprobación en campo realizando otra clasificación supervisada con el fin de tener una evaluación global entre ambas clasificaciones.

### **8.2.5 Evaluación en la exactitud de las clasificaciones**

Para conocer la proporción de error obtenido se hizo una matriz de confusión utilizando el programa ENVI 5.3, la cual permite confrontar la información de los sitios de muestreo y la imagen clasificada (García-Mora y Mas, 2008). Ésta se genera comparando los valores de los píxeles obtenidos de los sitios donde había exclusivamente pasto kikuyo y los valores de los píxeles obtenidos en trabajo de campo. Esta matriz debe alcanzar un mínimo establecido (Anderson *et al.*, 1976) mayor del 70 % de confiabilidad y se logra cuando la clasificación supervisada representó una separabilidad espectral alta entre los diferentes puntos de calibración para el agrupamiento. Los errores de omisión y comisión, son la interacción entre las clases espectrales que generan confusión en los valores.

### **8.3 Modificaciones de los polígonos y generación de un nuevo shape de distribución**

A partir de los shapefiles generados por la SEREPSA (2008), el trabajo de campo y la clasificación no supervisada, se modificaron los polígonos o zonas de distribución del pasto kikuyo en las zonas estudiadas. Con esto se generó un mapa para cada zona de amortiguamiento y también se generó un mapa de toda la REPSA de posible distribución, basándose en la clasificación de la máxima verosimilitud y el shape. La simbología se mantuvo a partir del mapa presentado en el Atlas de Riesgos. A partir

de esto se calculó el porcentaje de cobertura de pasto kikuyo.

## **IX. Resultados**

### **9.1 Clasificación digital**

#### **9.1.1 Clasificación no supervisada**

Con las imágenes adquiridas, la clasificación no supervisada permitió agrupar los píxeles de la imagen multiespectral a partir de medias y desviaciones estándar de los valores de reflectancia. Esto se hizo a partir de clases definidas *a priori* con lo que se obtuvieron las clases prioritarias en la REPSA. Se utilizó la banda “R”, correspondiente al color rojo, que permitió discriminar de mejor manera a la vegetación de otros elementos en Ciudad Universitaria (Figura 20). A través del Método de Isodata, el programa dividió la imagen espectral en 20 diferentes clases (Figura 21).

#### **9.2 Clasificación visual de las imágenes**

El Geopedregal, fue el lugar donde se llevó a cabo la separación espectral de la clasificación no supervisada. Las clases predominantes que se encontraron fueron la 9, 11, 12, 13, 17 y 20 (Figura 22 izquierda) que se corroboraron con 10 puntos

diversos donde se localizaron (Figuras 22 derecha y 23). Con ello, se identificó la clase correspondiente a la cobertura del pasto kikuyo que perteneció a la 13.

### **9.3 Clasificación no supervisada en Imágenes SPOT**

En las distintas imágenes spot, dependiendo de la fecha en las que fueron adquiridas, se pudo apreciar el cambio en la reflectancia de la clase perteneciente a este pasto (Figura 24). El análisis permitió evaluar algunas superficies (marcadas de amarillo en la figura) que sí corresponden al crecimiento del pasto. Sin embargo, se observa que en zonas muy específicas como el estadio olímpico universitario (marcadas con flechas), el espacio escultórico y la zona de amortiguamiento A13, la superficie de la clase es mayor y disminuye en imágenes posteriores. Esto se debe relacionar con la estación del año en que se encuentre la imagen (lluvias y sequías) y la hora del día en que esta imagen fue captada, dependiendo de la luz disponible al momento. De este modo, este tipo de imágenes no pudieron ser utilizadas para la evaluación dada la poca precisión.

### **9.4 Evaluación de la cobertura en los polígonos seleccionados en la REPSA**

Teniendo en cuenta que la clase 13 fue la correspondiente a la clase asociada a pasto kikuyo, se obtuvo un número distinto de puntos de comprobación en cada zona de la Ciudad Universitaria (Figura 25). En la zona A5 se comprobaron 29

puntos donde se obtuvieron 47 fotos; en la senda ecológica se comprobaron 27 puntos y 118 fotografías; en la unidad administrativa se comprobaron 21 puntos y se obtuvieron 68 fotografías; en Vivero alto A11 se corroboraron 23 y se obtuvieron 77 fotografías (Figura 26; Anexos 2-5).

#### **9.4 Evaluación mediante clasificación supervisada y matriz de confusión**

Una vez clasificada la imagen con los puntos calibrados (Cuadro 4) se obtuvo una clasificación más exacta donde se encuentra esta especie con todos los puntos del recorrido en campo de las zonas de estudio (Cuadro 5) y los porcentajes pertenecientes al pasto kikuyo. Los valores de la matriz de confusión y los de omisión-comisión se presentan en la Cuadro 5, donde se puede ver un resultado de 18.72% de sobre estimación dentro de la reserva.

#### **9.5 Mapas finales y leyendas**

Las verificaciones en campo de las clases, permitieron corroborar la presencia del pasto y también su distribución en el momento (Figura 27). Con ello, se delimitaron las superficies que aumentaron en el año 2015 y se proyectaron las superficies para generar un mapa para cada una de las zonas de amortiguamiento (Figura 28). De este modo, se proyectó un mapa basado en el shape generado en el 2012 por la

SEREPSA y en la clasificación supervisada donde los nuevos límites teóricos de distribución del pasto kikuyo se observan en la figura 29. Las superficies calculadas por zona de estudio son:

Unidad Administrativa A13 de 18 974.7 m<sup>2</sup> a 19 014.7 m<sup>2</sup>; Paseo de las Esculturas A5 de 10 791.3 m<sup>2</sup> a 14 701.3 m<sup>2</sup>, Sendero Ecológico A7 de 10 258.5 m<sup>2</sup> a 10 598.5 m<sup>2</sup> y Vivero Alto A11 de 1 175 m<sup>2</sup> a 1 375 m<sup>2</sup> (Figura 29).

La REPSA tiene 2 370 000 m<sup>2</sup>; de éstos 402 900 m<sup>2</sup> (el 17%) abarcaba el pasto kikuyo en el año 2012, por lo tanto, teóricamente con la proyección en este estudio, aumentó a 40 5900 m<sup>2</sup> que corresponde al 17.12 % de la superficie de la misma (Figura 30).

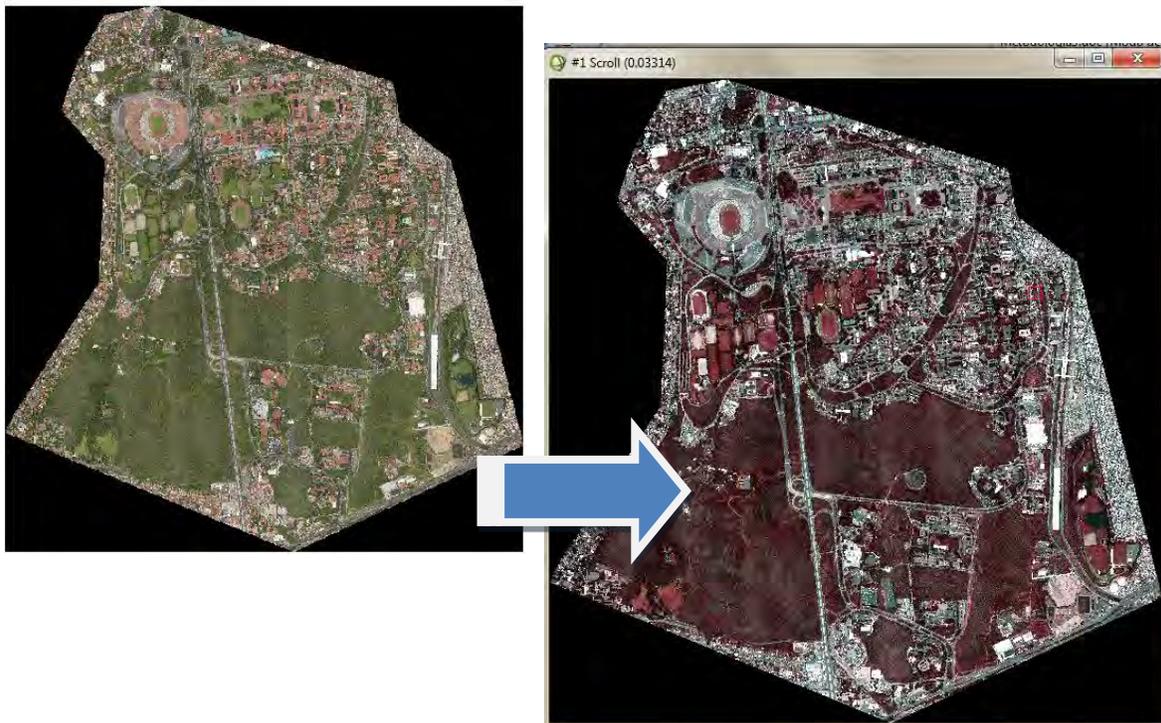


Figura 20. Imágenes de la Ciudad Universitaria de la UNAM tomada por el dron (izquierda) (A. Peralta, 2015) donde se muestra la banda “r” espectral con falso color rojo (derecha).

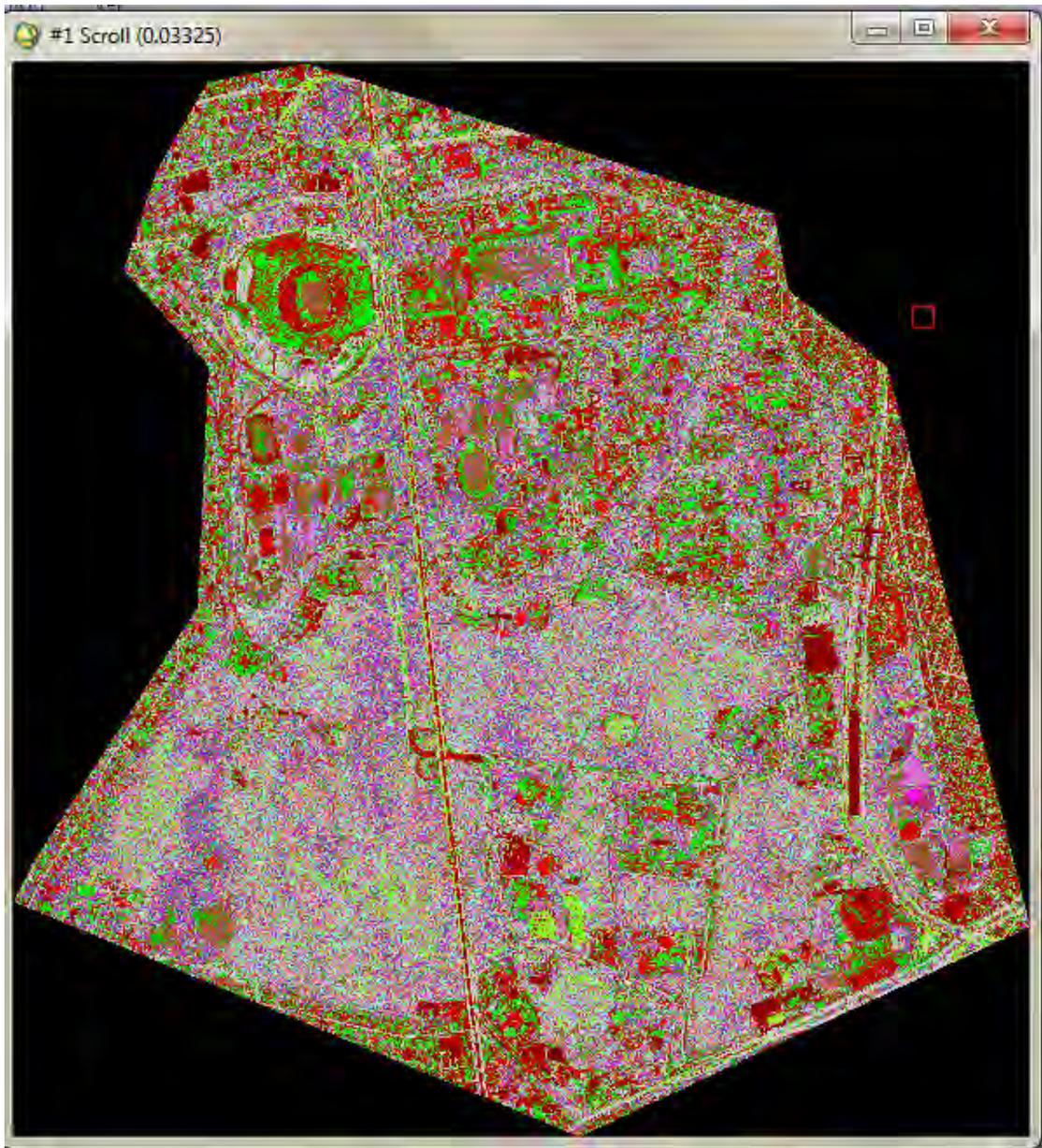


Figura 21. Imagen de la Ciudad Universitaria de la UNAM tomada por el dron (Peralta, 2015) después de realizar la clasificación no supervisada por el método de isotadas presentando las clases espectrales.

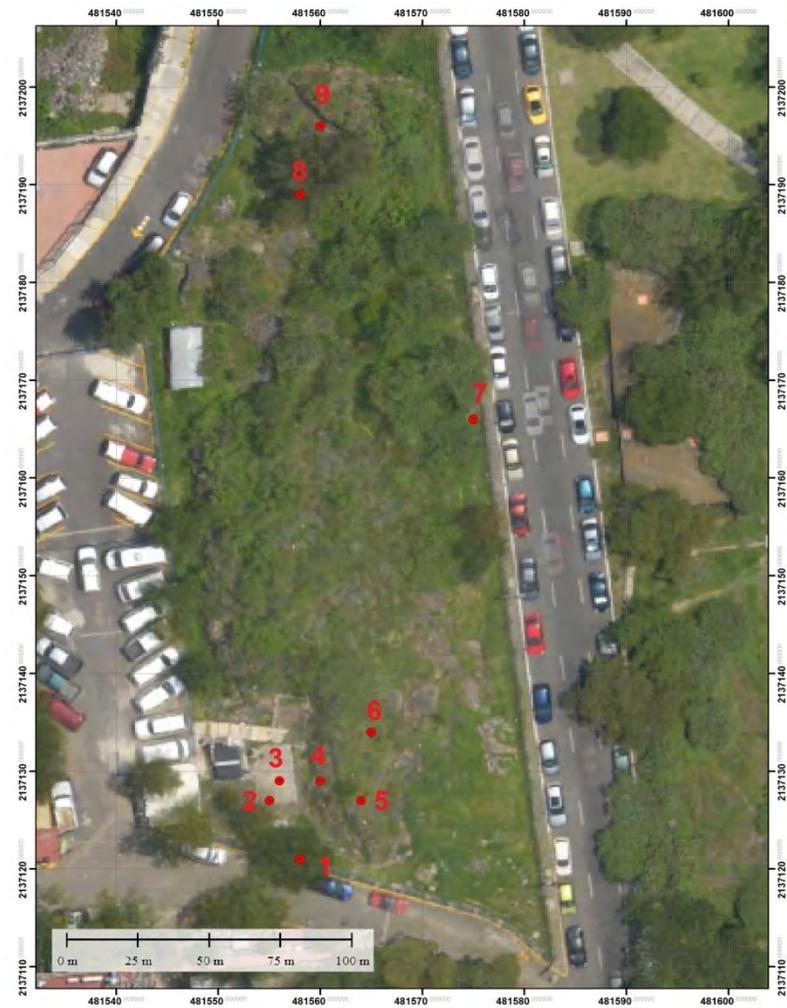
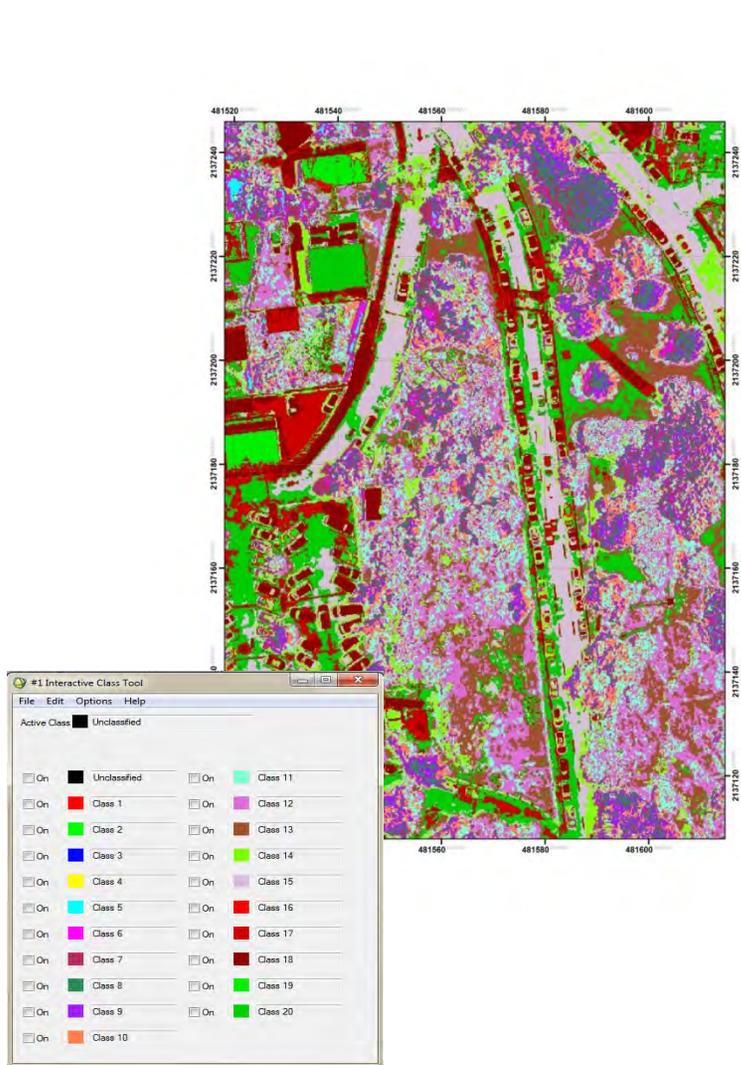


Figura 22.Izquierda: acercamiento de una zona de la imagen de la figura 21 donde se observan las clases predominantes en el Geopedregal, Derecha: se muestran con puntos numerados cuyas imágenes se presentan en la Figura 23, las zonas de verificación de los sustratos correspondientes a dichas clases.



a)



b)



c)



d)



e)



f)



g)

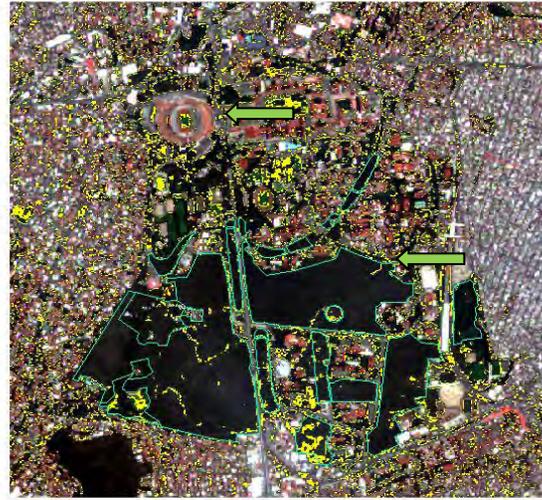


h)

Figura 23. Verificación en campo de las clases espectrales de los mapas anteriores (figuras 22 y 23) dominantes en el Geopedregal para identificar la perteneciente a la especie de estudio (pasto Kikuyo). a) Árboles (clase 9, punto 1); b) basalto (clase 11, punto 4); c) suelo (clase 12, punto 5); d) pavimento (clase 17, punto 3); e) pasto Kikuyo y zacatón (*Muhlenbergia robusta*) (clase 13, puntos 6, 7 y 9); f) clase generada por sombras y variaciones de color en pavimento y basalto (clase 20, punto 3). Fotos tomadas por Arenas, 2015.



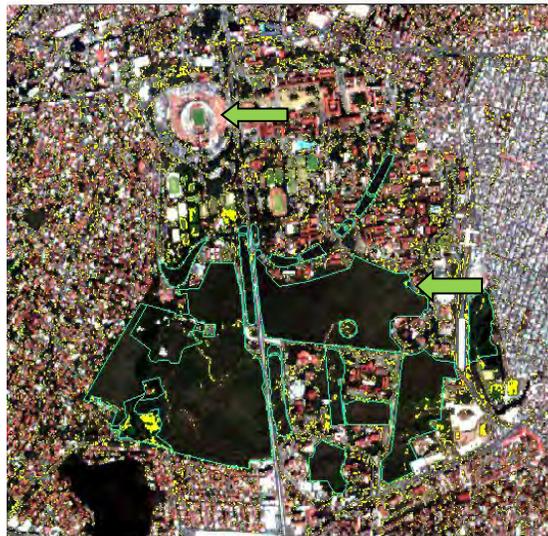
a)



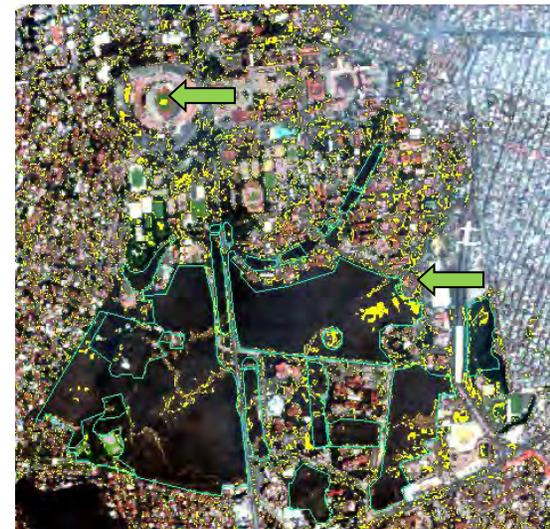
b)



c)

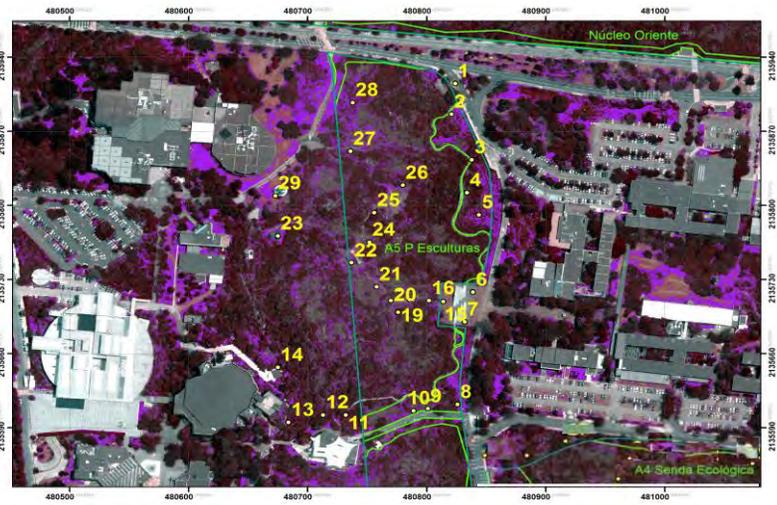


d)

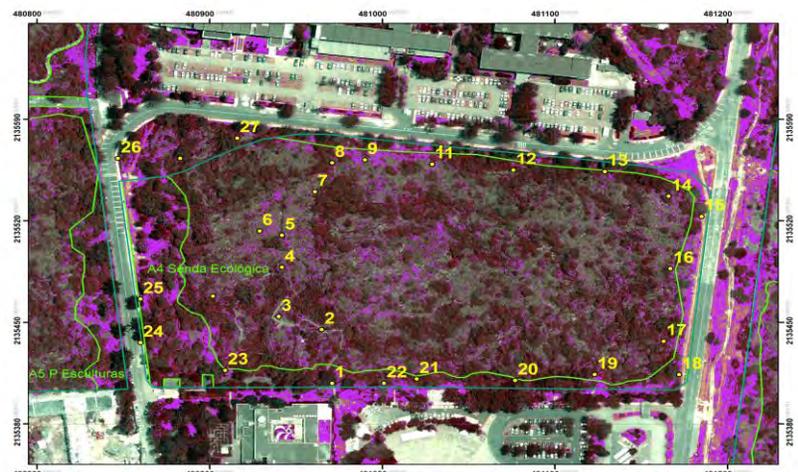


e)

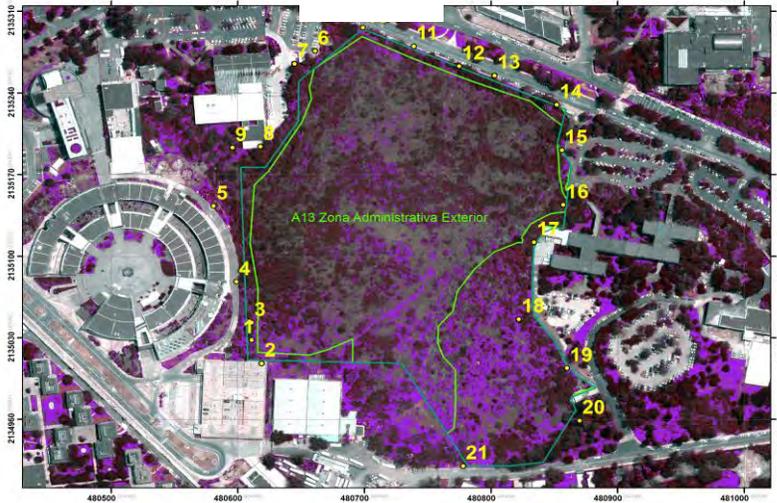
Figura 24. Distribución del pasto kikuyo vista desde los satélites SPOT 6 y 7 durante un año. a) 15 de mayo 2015, b) 15 de junio 2015, c) 16 de Noviembre 2015, d) 29 de Noviembre 2015, e) 14 de Febrero 2016, donde se encuentran señalados los cambios en la clase perteneciente al pasto kikuyo.



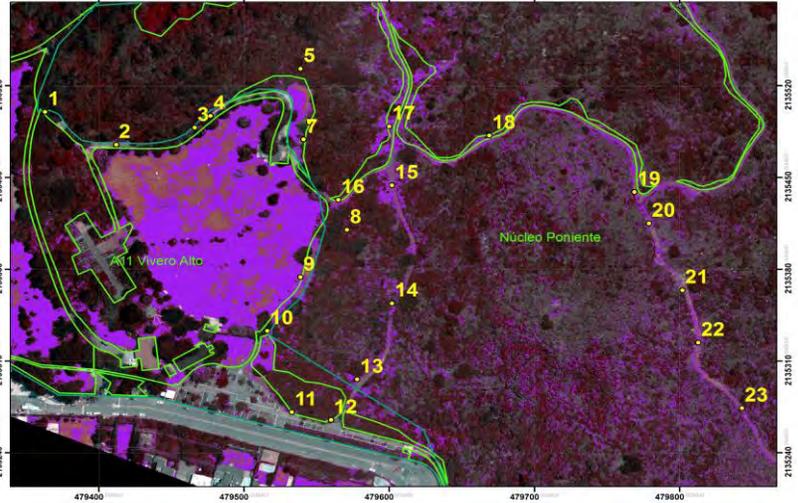
a)



b)



c)



d)

Figura 25. Puntos verificados en cada una de las zonas de amortiguamiento, a) Zona de Amortiguamiento A5, Paseo de las esculturas; b) Zona de Amortiguamiento A4, Senda ecológica; c) Zona de Amortiguamiento A13, zona administrativa exterior; d) Zona Núcleo poniente. En líneas verdes se sobrepusieron los shapefile's generados por SEREPSA 2012.





Figura 26. Algunos puntos de verificación durante el trabajo de campo. Las zonas recorridas se muestran en la figura 18 de Metodología y en la figura 25. a y b) Puntos 6 y 16 respectivamente en la Zona de Amortiguamiento A5 en el Paseo de las Esculturas, donde se observa que el pasto no puede pasar más allá de la estructura conocida como la serpiente (a) y en el camino a la escultura en donde a pesar de su presencia, su cartografía no fue posible debido a su poca abundancia (b); c) en el caso del punto 19, alrededor de la escultura “Azul” en la misma zona, éste si pudo agregarse al software; d) abundante pasto indicando un alto grado de disturbio en el punto 26 en esta misma zona; e) mezcla de pasto Kikuyo y Muhlenbergia en la zona de amortiguamiento A4 en el punto 4 que tampoco pudo ser cartografiada por la presencia del basalto; f) pasto kikuyo y otras especies exóticas dentro del área de amortiguamiento A4 tomada en el punto 10 en el Sendero Ecológico; g) incendio favorecido por el pasto kikuyo dentro de la misma zona de amortiguamiento, tomada en el punto 13 en el sendero ecológico; h e i ) tomadas en los puntos 8 y 18 de la Zona de Amortiguamiento A13 donde se ve la barda alrededor de la misma en el área exterior administrativa y el alto disturbio en el punto 18 donde se observan algunas otras especies exóticas invasivas en un terreno accidentado; j y k) Zona de Amortiguamiento A 11 en el punto 2 correspondiente al vivero alto dedicado al mantenimiento de las aéreas verdes en Ciudad Universitaria; l) desechos de poda de pasto kikuyo vertidos en la zona núcleo, punto 4 de la misma zona; m) pasto kikuyo en la zona núcleo poniente junto a la zona de amortiguamiento A 11 tomada en una brecha central en el punto 18. Fotos: Arenas, 2016.



Figura 27. Puntos de verificación en campo (color rojo) utilizados para calibrar el software. Imagen de la Ciudad Universitaria de la UNAM tomada por el dron (Peralta, 2015).

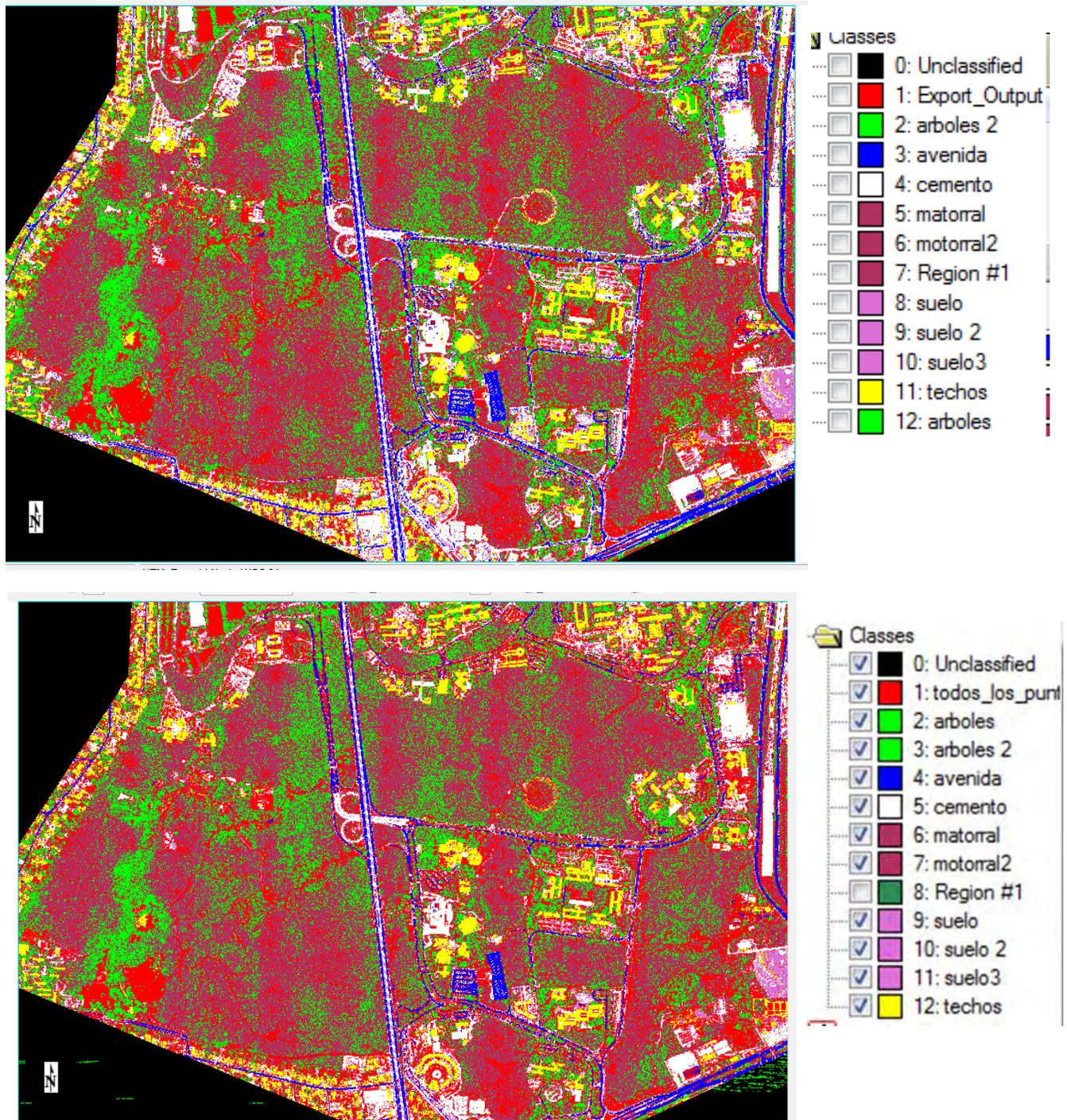


Figura 28. Clasificación elaborada por el método de máxima verosimilitud donde se visualiza en rojo a la clase generada por el pasto kikuyo. Superior, imagen clasificada con 21 puntos; inferior, clasificación donde se incluyeron todos los sitios de muestreo. Imágenes clasificadas a partir de imagen dron (Peralta, 2015).

Cuadro 4. Matriz de confusión realizada con la clasificación supervisada donde se muestran los valores de pixeles leídos en cada una de las clases y los correspondientes al pasto (export output) en cada clase. Los puntos que quedan fuera de la diagonal están sobreestimados. En el Cuadro inferior están los porcentajes pertenecientes al pasto kikuyo.

Overall Accuracy = (117086971/129721778) 90.2601%  
 Kappa Coefficient = 0.8869

Class	Unclassified	avenida	cemento	matorral	matorral2	Region #1	suelo	suelo 2	suelo3	techos	todos_los_pun	arboles	arboles 2	Total
Unclassified	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
avenida	0	4323370	0	0	0	0	0	0	0	0	1069362	0	0	5392732
cemento	0	0	9228374	0	0	0	0	0	0	0	3292102	0	0	12520476
matorral	0	0	0	18033244	0	0	0	0	0	0	2236668	0	0	18256912
matorral2	0	0	0	0	23596558	0	0	0	0	0	1314813	0	0	24911371
Region #1	0	0	0	0	0	16239439	0	0	0	0	0	0	0	16239439
suelo	0	0	0	0	0	0	635870	0	0	0	0	0	0	960324
suelo 2	0	0	0	0	0	0	0	1462468	0	0	0	0	0	189710
suelo3	0	0	0	0	0	0	0	0	619425	0	0	0	0	1652178
techos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5176331	0	0	0	668589
Export_Output	0	0	10870	95197	3293279	0	153	28084	0	480	17914079	698161	0	5641570
arboles	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16232546	0	22040303
arboles 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3625267	17700465
Total	0	4323370	9239244	18128441	26889837	16239439	636023	1490552	619425	5176811	26422662	16930707	3625267	129721778

Basic Stats	Min	Max	Mean	Stdev
Band 11	0	1	0.065591	0.247566

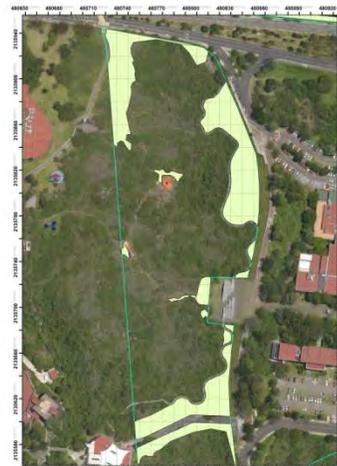
Histogram	DN	Npts	Total	Percent	Acc Pct
Band 11	0	121213195	121213195	93.4409	93.4409
	1	8508583	129721778	6.5591	100.0000

Cuadro 5. Porcentajes de Omisión Comisión que indican las proporciones de pixeles que fueron sobreestimadas u omitidas respectivamente en el análisis.

Class	Commission (Percent)	Omission (Percent)	Commission (Pixels)	Omission (Pixels)
Unclassified	0.00	0.00	0/0	0/0
avenida	19.83	0.00	1069362/5392732	0/4323370
cemento	26.29	0.12	3292102/12520476	10870/9239244
matorral	1.23	0.53	2236668/18256912	95197/18128441
matorral2	5.28	12.25	1314813/24911371	3293279/26889837
Region #1	0.00	0.00	0/16239439	0/16239439
suelo	33.79	0.02	324454/960324	153/636023
suelo 2	11.48	1.88	189710/1652178	28084/1490552
suelo3	7.35	0.00	49164/668589	0/619425
techos	8.25	0.01	465239/5641570	480/5176811
Export_Output	18.72	32.20	4126224/22040303	8508583/26422662
arboles	8.29	4.12	1467919/17700465	698161/16930707
arboles 2	3.00	0.00	112152/3737419	0/3625267



a) Area administrativa



b) Paseo de las esculturas



c) Sendero Ecológico



d) Vivero alto

Figura 29. Mapas elaborados a partir de la foto aérea generada por Peralta (2015) de la Ciudad Universitaria de la UNAM y modificaciones de los Shapefile's generados por SEREPSA (2012), donde se muestra la distribución del pasto kikuyo (polígonos amarillos) en el año 2016 en cuatro zonas de amortiguamiento. Elaborado por Alcántara 2016.

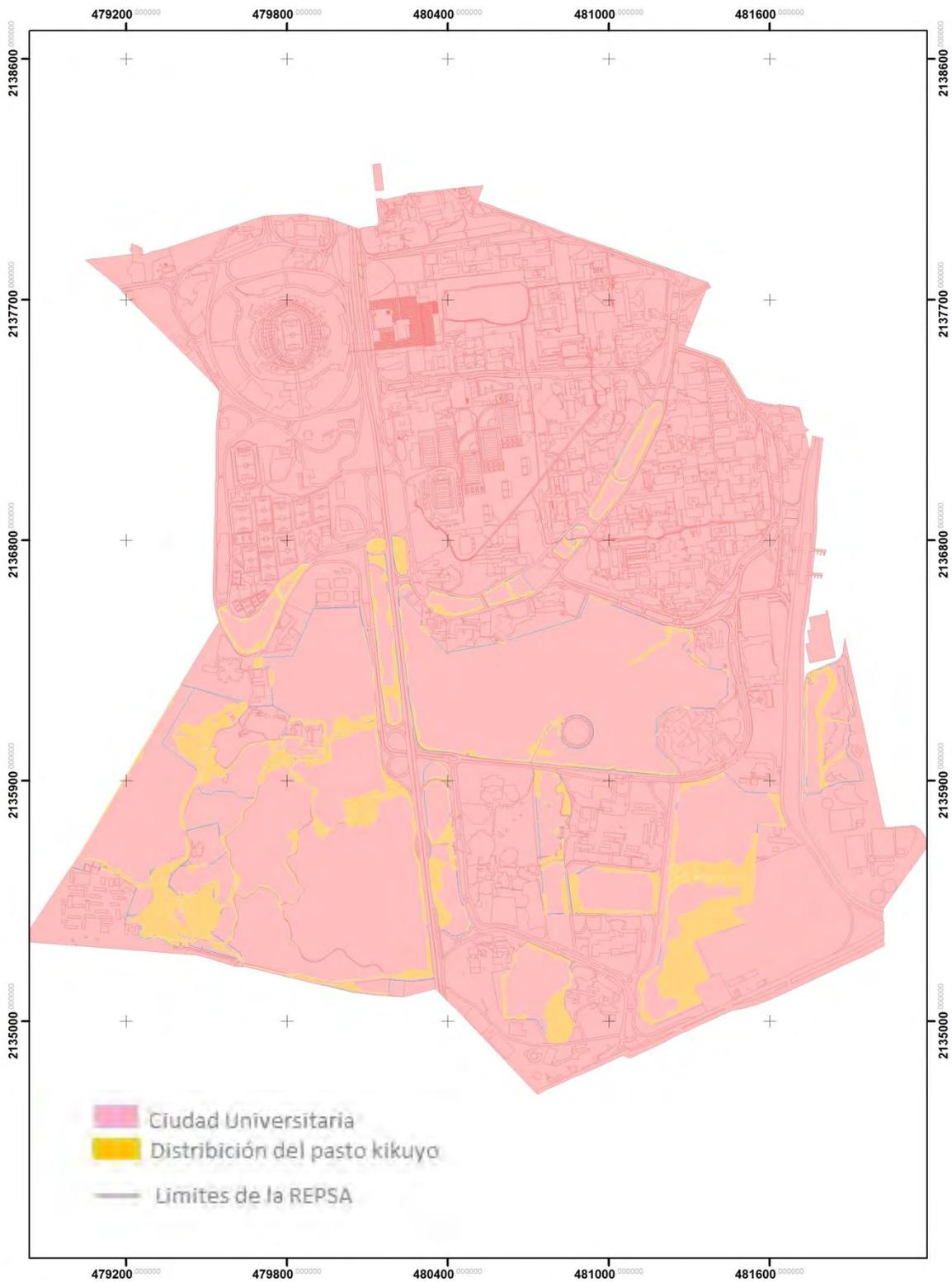


Figura 30. Mapa de posible distribución de pasto kikuyo para el 2015, generado a partir del método de clasificación supervisada y de los polígonos generados por la SEREPSA 2012. Elaborado por Alcántara 2016.

## X. Discusión

### 10.1 Selección de Materiales y clasificación digital.

Para comenzar un análisis en el campo de la percepción remota se deben buscar varios tipos de imágenes generadas por cualquier tipo de sensores, *v. gr.* cámaras digitales, imágenes satelitales, imágenes de dron, entre otros (Parody y Zapata, 2015). Para esto, se deben conocer las dimensiones del área a estudiar; en el caso de Ciudad Universitaria, después de adquirir y trabajar con las imágenes SPOT y las generadas por un dron, se decidió utilizar a estas últimas por la resolución de 15 cm por pixel a diferencia de la resolución de las primeras de 6 m por pixel. La problemática generada por el manejo de esta única fotografía multiespectral, fue que se realizó en febrero del 2015, temporada de secas en la REPSA, cuando únicamente se puede diferenciar la biomasa seca de muchas de las especies que habitan en la Reserva.

La clasificación selección de áreas de entrenamiento a partir de lo obtenido en el trabajo de campo, permitió realizar una clasificación supervisada más cercana a la realidad que si sólo se hubiera elaborado una clasificación únicamente visual sobre la imagen aérea (Vega-Guzmán *et al.*, 2008). La problemática también resultó en que la clase espectral perteneciente al pasto kikuyo llegó a confundirse con la firma espectral generada por las comunidades de zacatillo, *Muhlenbergia robusta*, que sí es una especie nativa y que puede llegar a crecer en manchones considerables. De este modo, la comprobación en campo fue necesaria (Mas, 2005).

Se optó por la clasificación digital a diferencia de Palacios y colaboradores en el año 2000, que evaluaron el estado de algunos ecosistemas en parte del territorio nacional. Debido al tamaño de cobertura de las imágenes que utilizaron y el tamaño de la superficie a evaluar, utilizaron una clasificación visual de las comunidades vegetales en las imágenes satelitales, que resulta más práctica. Su área mínima de captura por parte del sensor fue de 1 km, mientras que el área mínima captada 15 cm. Estos dos tipos de análisis visuales también presenta problemas de confusión entre algunas de las clases obtenidas, que fue resuelto basándose en los mapas previamente generados.

## **10.2 Trabajo de campo.**

Castillo-Argüero y colaboradores (2009) mencionaron cómo es que las malezas se comportan en la REPSA, así como los mecanismos de dispersión, beneficiadas, en algunas ocasiones por la acción antrópica. Algunos mecanismos contribuyen a que el pasto se disperse como se observó alrededor de las esculturas donde se logró diferenciar una gran cantidad del mismo, transportado posiblemente por el caminar de los visitantes (Lema *et al.*, 2003).

Se observó que en el área A5, el pasto y otras especies exóticas invasoras se han introducido a la Reserva; aquí, el polígono que decretó la SEREPSA en el año 2008 que fue publicado en el 2012 en el Atlas de Riesgos (Lot *et al.*, 2012), sufrió una modificación muy considerable en tanto al tamaño debido al relleno de cascajo que

ha sufrido (puntos 26, 27 y 28 de la Figura 25 a y nuevo shape generado de la figura 30 de resultados).

Algunos procesos conjuntos como las constantes visitas en los caminos de visitantes dentro de la REPSA que representan un vector secundario de dispersión, incendios pasados, manejo de la brecha cortafuegos, entre otros, han favorecido que el pasto se vaya introduciendo al matorral conservado como lo que se documentó en el camino principal de la Brecha 1 en la zona Núcleo poniente (Fig. 29 d) a partir de la brecha central hasta la parte sur de ésta. Aquí se pudo observar que el pasto se encuentra principalmente en el camino, y en algunos puntos se pudo cartografiar su introducción a la reserva.

En el Sendero Ecológico de la zona de Amortiguamiento A 4, verificando la entrada situada enfrente del edificio de la Sociedad Mexicana para la Divulgación de la Ciencia y la Técnica (punto 1 de la figura 25 b de resultados), a pesar de que el pasto se encuentra sobre el relleno que cubre toda esta zona, las condiciones morfológicas de la roca basáltica han ligeramente detenido su frente de crecimiento al sendero. Por otro lado, en la misma zona pero en la sección norte, se encontró un gran cambio en la distribución del pasto (puntos 9 a 15 de la figura 25b), el cual ha logrado ganar territorio dentro de la REPSA y lamentablemente, también comparte el espacio con otras especies exóticas invasoras. Sin embargo, esta periferia es de alto riesgo debido a su exposición a la avenida que la circunda y el fácil e ilimitado acceso que se tiene a esta sección.

Otro factor que fue posible observar en este trabajo, fue un incendio forestal en el área A4, causado por el bajo punto de combustión del pasto (Lot *et al.*, 2012), acabado con el matorral xerófilo que ahí había y dando paso a la dispersión del kikuyo (punto 13 de la figura 25b). Camacho-Altamirano (2007) estudió el efecto del fuego en el banco de semillas como factor de dispersión de algunas especies de la REPSA. De igual manera estudió algunos sitios quemados y encontró que la mayoría de especies beneficiadas por el efecto del fuego son las que se comportan como malezas (Martínez-Orea, 2001).

Por otro lado, la problemática del vivero alto como zona destinada para el crecimiento de pasto para el mantenimiento de las áreas verdes universitarias, causa un gran impacto dentro de la reserva y ha sido ya discutido por Lot y colaboradores en el Atlas de Riesgo (2012). La colindancia de estas aéreas artificiales con la Reserva y sus zonas de amortiguamiento, genera un riesgo latente debido a que en la época de sequías este pasto puede servir como combustible y provocar incendios.

En este caso, se observó en la verificación en campo, que el polígono que se encuentra en la parte norte de la zona se modificó notablemente, debido a la inmersión de esta especie a la REPSA. Entre todo ello una causa de esto es que debido a las actividades de poda de este campo, la materia orgánica retirada es acumulada dentro de la REPSA, teniendo en cuenta que este pasto es una especie muy resistente, al contacto con el suelo genera raíces y estolones que favorecen su dispersión subterránea. Capdevila-Argüelles y colaboradores (2013) en su artículo “Causas de la pérdida de biodiversidad: especies exóticas invasoras”, exponen el

riesgo de los viveros en un ambiente natural, donde las especies exóticas logran su adaptación al mismo y, en caso de que la propagación no sea adecuada, logran su expansión al ambiente natural y, con ello, el desplazamiento de las especies nativas.

Sin embargo, también se reconocieron barreras físicas tanto geográficas como artificiales (Morrone, 2004) que limitaron el crecimiento del mismo como por ejemplo, en el Paseo de las Esculturas donde se pudo denotar que la estructura denominada como la “serpiente” (punto 15 de la figura 25 a), sirve como barrera ecológica que impide el crecimiento del pasto más allá de ésta en la zona de amortiguamiento A4.

Mientras que en los puntos verificados junto al edificio de Desarrollo Académico en la zona de Amortiguamiento A13, a pesar de la abundancia de este pasto, el shape no sufrió modificaciones en este punto debido a que la morfología del terreno como un desnivel abrupto del derrame lávico en una extensa superficie considerada una cantera de aproximadamente 10 m (Cano-Santana *et al.*, 2008), ha generado las condiciones para que este pasto no pueda introducirse a la reserva (Figura 25, i). Aunado a esto, el enrejado que se ha colocado en esta zona, también ha favorecido que sea la que menos cambios ha tenido en el shape original. Esto posiblemente debido al aislamiento que tiene esta zona, lo cual impide que factores externos ayuden a la dispersión de este pasto. Cano-Santana y colaboradores (2008) argumentaron que la zona A 13 es importante para la conservación del matorral debido a que tiene un alto valor de especies nativas de acuerdo en un índice de valor para la conservación.

### 10.3 Fiabilidad del trabajo de campo y mapeo

Por otro lado, la biomasa del pasto en algunos puntos representó una limitante para la detección y presencia del pasto: la clasificación no supervisada no fue sensible a características espectrales debido a que la escala no permitió su diferenciación. Durante la comprobación en campo se pudo verificar que en algunos caminos se encontraba esta especie y no pudo ser cartografiada. Se verificaron algunos andadores, en donde de nueva cuenta se notó la presencia de esta especie, pero debido a que no genera agrupamientos notables, no apareció en la clasificación no supervisada y no invadió más allá de este camino (Rullán-Silva *et al.*, 2011).

La clasificación y el trabajo de campo debe ser evaluado para conocer su fiabilidad; para que el mapa elaborado pueda ser confiable (Mas *et al.*, 2003). Al respecto, la matriz de confusión generada, debe tener valores de más del 90 % de fiabilidad, tal es el caso de este trabajo en donde los valores se acercaron a este porcentaje para el pasto kikuyo y, en consecuencia, el mapa elaborado puede decirse que se parece en un 90 % a la realidad en campo. Se observó que la clase del pasto se confundió con algunas otras clases, esto se debe a que el pasto suele estar creciendo por debajo de algunos materiales o cercano a ellos (Rullán-Silva *et al.*, 2011). Los errores de omisión-comisión como lo mencionaron Buendía-Rodríguez e Islas-Gutiérrez (2008) tampoco deben pasar de ciertos porcentajes; en este caso dieron como resultado 18% en errores de omisión y 32% en los errores de comisión, lo cual indicó que no existió una sobre estimación en esta clase de importancia.

## **XI. Conclusiones**

La resolución de las imágenes multiespectrales adquiridas por distintos sensores permitió seleccionar a las generadas por un dron como las de mejor resolución para llevar a cabo el análisis de distribución del pasto Kikuyo en varias zonas de amortiguamiento de la REPSA.

La corroboración en campo de la clasificación de las imágenes es necesaria para dar una mejor separación espectral. A esto se adicionan otros criterios como el conocimiento de la biología de esta especie y contar con otro tipo de análisis adquiridas como las tipo SPOT para establecer una comparativa temporal de su crecimiento en época de lluvias lo que permite obtener una mejor diferenciación.

La clasificación no supervisada por el método de isodata permitió observar la distribución de este pasto para su corroboración en campo. La calibración del software con puntos donde existía únicamente esta especie, permitió alcanzar un porcentaje de la matriz de confusión de 90.44% en la clase del pasto kikuyo, que es aceptable tomando en cuenta la confusión que existe entre las emisión e interferencia de otras clases analizadas. La generación de los mapas con el valor mencionado anteriormente y los valores de omisión de 18.72% de error y en comisión de un 32.20% cumplen con los estándares establecidos.

Se calculó que hubo un incremento cercano al 0.12 % de crecimiento del pasto kikuyo en toda la Reserva estimado a partir de las zonas de amortiguamiento

calibradas. Este crecimiento corresponde a un periodo de tres años de la última imagen representada en el Atlas de Riesgos y la generada en este trabajo.

Se corroboró que el incremento del área de distribución tiene una relación muy estrecha con la adición de materiales de desecho como cascajo a superficies de suelo natural por factores antrópicos. Algunas barreras físicas han permitido que la invasión de esta especie no continúe. Sin embargo, existen zonas de alto riesgo y vulnerabilidad como la zona de vivero A11 en donde el pasto comienza a invadir las zonas núcleo. Esto es evidente además en las zonas de los caminos dentro de la REPSA en donde los transeúntes, así como los incendios permiten el incremento en estas zonas.

Esta propuesta de clasificación y de reconocimiento de esta especie, requiere de dos etapas, la primera es la clasificación no supervisada con la imagen obtenida por el dron y basarse de los polígonos establecidos por la SEREPSA y, en segunda estancia la clasificación supervisada con un conocimiento de los materiales más relevantes presentes en Ciudad Universitaria.

## **XII. Recomendaciones**

Los factores que permiten aplicar el análisis de imágenes aéreas en la cuantificación de cualquier fenómeno en la superficie terrestre, siempre tendrá limitaciones atribuibles tanto a la técnica como a los factores humanos. En este caso, cabe destacar que hay zonas en la Reserva donde sólo se puede acceder bajo

supervisión y donde no se pudo ingresar al momento de llevar a cabo el levantamiento por lo que se recomienda que el punto siguiente de esta investigación es que el mapa generado a partir de la clasificación supervisada que sea entregado a la SEREPSA sirva para la evaluación de las zonas que sean más perjudicadas por esta especie invasora para que le dé un seguimiento y se propongan una estrategias de manejo para este pasto.

Por otro lado, los sensores no pueden captar la reflectancia de pasto kikuyo en algunas zonas debido a la vegetación de estratos mayores. Además de que solo se contó con una imagen multi espectral en temporada de secas por lo que el papel del geógrafo en este tipo de estudios es muy importante para poder interpretar y analizar de manera adecuada este tipo de imágenes.

Debido al tamaño del terreno de Ciudad Universitaria o superficies de iguales dimensiones, lo mejor es utilizar fotografías multiespectrales de una escala de resolución similar de 15 cm por pixel, para de esta forma poder hacer una buena discriminación de los elementos que puedan existir en el terreno. Para esto, hay que verificar que estas fotografías aéreas sean lo más cercanas a las fechas donde se pueda discriminar de mejor manera la especie de estudio. Si se puede hacer con ello un análisis mutitemporal se podrá discriminar de mejor manera las clases de la especie que se quiere estudiar. Encontrar los puntos donde la especie a estudiar sea muy abundante en el proceso de la elaboración de clasificación supervisada ayuda a que posteriormente, la elaboración de la matriz de confusión, arroje un alto porcentaje y bajos valores de errores de omisión y comisión.

Desde el punto de vista biológico, sin embargo, también existen otras consideraciones como que se debe realizar el trabajo de campo preferentemente cuando el ciclo de vida de la especie a estudiar permita diferenciarlo de las otras.

La identificación en los listados de esta especie invasora en la REPSA es muy reciente y no coincide con su posible fecha de introducción a la misma. La obtención de mapas anteriores de distribución no se había practicado con anterioridad al año 2012. Para concluir el estudio y protección de este ecosistema es muy importante generar información actualizada y viable debido a la vulnerabilidad que representa.

La estrategia nacional de control de especies invasoras indica la importancia del control de las especies exóticas invasoras debido a la amenaza constante a la biodiversidad del país. A pesar que el pasto kikuyo se encuentra considerado en varios países en México no considero esta especie sino hasta el año 2016.

### XIII. Literatura citada.

Aguirre-Muñoz, A., Mendoza-Alfaro, R. (2009). *Especies exóticas invasoras: impactos sobre las poblaciones de flora y fauna, los procesos ecológicos y la economía*. En: Acosta, J. L., Monrroy, E. Capital natural de México, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio. Comisión Nacional para el conocimiento y de la biodiversidad (Conabio), México. Pp. 277-318.

Alonso-Sarría, F. (2006a). *Sistema de Información Geográfica. SIG y Teledetección*. Universidad de Murcia, España. 239 p.

Alonso-Sarría, F. (2006b). *Tema 9. Clasificación. Teledetección*. En: Alonso-Sarría, F. *SIG y Teledetección*. Universidad de Murcia, España. Pp. 147-180.

Anderson, J. R., Hardy E. E., Roach J.T., Witmer R.E. (1976). A land use and land cover classification system for use with remote sensing data, Geological Survey Professional Paper 964.

Antonio-Garcés, J. I. (2008). *Restauración ecológica de la zona de amortiguamiento 8 de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, D. F. (México)*. Tesis de Licenciatura en Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 61 p.

Antonio-Garcés, J. I., Peña, M., Cano-Santana, Z., Villeda, M., Orozco-Segovia, A. (2009). *Cambios en la estructura de la vegetación derivados de acciones de restauración ecológica en las Zonas de Amortiguamiento Biológicas y Vivero Alto*.

En: A. Lot y Z. Cano-Santana (Eds.) Biodiversidad del Pedregal de San Ángel. UNAM, Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel y Coordinación de la Investigación Científica, D.F. México. Pp. 465-481.

Arango-Gutiérrez, M., Branch-Bedoya, J. W., Botero-Fernández, V. (2005). *Clasificación no supervisada de coberturas Vegetales sobre imágenes digitales de sensores Remotos: " landsat-etm+"*. Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín 51(8): 2611-2634.

Billingsley, F. C. (1984). *Remote Sensing for Monitoring Vegetation: An Emphasis on Satellites*. En: Woodwell, G. M. (Ed.), The Role of Terrestrial Vegetation in the Global Carbon Cycle: Measurement by Remote Sensing. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California, USA. Pp. 161-180.

Buendía-Rodríguez, E., Islas-Gutiérrez, F. (2008). *Identificación de áreas erosionadas por medio de imágenes Landsat ETM+, en Tlaxco y Terrenate, Tlaxcala*. México. Tierra Latinoamericana Mexico 26(1): 1-9.

Capdevila-Argüelles, L., Zilletti, B., Álvarez, V. Á. S. (2013). *Causas de la pérdida de biodiversidad: especies exóticas invasoras*. Real Sociedad Española de Historia Natural 10. Madrid, España. Pp. 55-75.

Cano-Santana, Z., Castillo-Argüero, S., Martínez-Orea, Y., Juárez-Orozco, S. (2008). *Análisis de la riqueza vegetal y el valor de conservación de tres áreas incorporadas a la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, Distrito Federal (México)*. Boletín de la Sociedad Botánica de México (82). México .Pp 1-14.

Camacho-Altamirano, J. M. (2007). *Efectos del fuego sobre la lluvia de semillas en la reserva ecológica del pedregal de San Ángel, México D. F.* Tesis de Licenciatura en Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 53 p.

Castillo-Argüero, S., Martínez-Orea, Y., Meave, J. A., Hernández-Apolinar, M., Nuñez-Castillo, O., Santibañez-Andrade, G., Guadarrama-Chávez, P. (2009). *Flora: susceptibilidad de la comunidad a la invasión de malezas nativas y exóticas.* En: A. Lot y Z. Cano-Santana (Eds.) Biodiversidad del Pedregal de San Ángel. UNAM, Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel y Coordinación de la Investigación Científica. D.F, México. Pp. 107-137.

Chuvienco, E. (1996). *Fundamentos de teledetección espacial.* Ed. Rialp, Madrid, España. 568 p.

Comité Asesor Nacional sobre Especies Invasoras. (2010). *Estrategia nacional sobre especies invasoras en México, prevención, control y erradicación.* Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Comisión Nacional de Áreas Protegidas, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 94 p.

Ericson, J. (2006). *Técnicas de monitoreo para el manejo de especies invasoras.* En: Pisanty I., Caso M. (Eds.). *Especies, Espacios y Riesgos.* Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. México. Pp. 159-171.

Estañol-Tecuatl, F. (2014). *Estructura de la comunidad vegetal en zonas perturbadas, conservadas y sujetas a restauración ecológica en la Reserva del Pedregal de San Ángel*. Tesis de Licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 63 p.

Foody, G. M. (2001). *Status of land cover classification accuracy assessment*. Remote sensing of environment 80 (1): 185-201.

García-Mora, T. J., Mas, J. F. (2008). *Comparación de metodologías para el mapeo de la cobertura y uso del suelo en el sureste de México*. Investigaciones Geográficas (67): 7-19.

GIPS (Global Invasive Plant Species). (2005). *Sudamérica invadida: el creciente peligro de las especies exóticas invasoras*. Programa Mundial sobre Especies Invasoras. 80 p.

Huisman, O., De By, R. (2009). *Principles of geographic information systems*. ICT Educational Textbook Series, 1. Cambridge, London, Inglaterra. 536 p.

Instituto de Geología. (2013). <http://www.geologia.unam.mx:8080/igl/index.php/proyectos-extra/311-proyectos-ambientales/geopedregal>. última fecha de consulta 07/01/2017

Jensen, J. R. (1986). *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*. University of South Carolina. Columbus, EU. 256 p.

Keane, R. M., Crawley, M. J. (2002). *Exotic plant invasions and the enemy release hypothesis*. Trends in Ecology and Evolution (17): 164-170.

Lema, L. F., Polanía, J., Urrego, L. E. (2003). *Dispersión y establecimiento de las especies de mangle del río Ranchería en el periodo de máxima fructificación*. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales 27: 102-105.

Lizarazo, I. (2013). *Caracterización de la condición de la vegetación usando sensores próximos y remotos. Percepción Remota de la Vegetación*. Universidad Distrital. Bogotá, Colombia. 20 pp.

Lot, A., Pérez-Escobedo M., Gil-Alarcón G., Rodríguez-Palacios S., Camarena P. (2012). *La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel: Atlas de Riesgos*. 30 aniversario 1983-2013. Secretaría Ejecutiva de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, UNAM, ICyT. 52 p.

Maravilla-Romero, M. C. (2011). *Flora y vegetación de nueve áreas naturales de Ciudad Universitaria, México D. F.* Tesis de Licenciatura en Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 93 p.

March, I. (2008). *El uso de los SIG y otras tecnologías en la prevención, control y erradicación de especies invasoras*. Resumen presentado en el Taller sobre Sistemas de Información Geográfica en los procesos de Planificación para la Conservación de Áreas en México. 22-24 de Abril del 2008. Monterrey, N.L., México. P. 59.

Martínez-De La Cruz, I., Vibrans, H., Lozada-Pérez, L., Romero-Manzanares, A., Aguilera-Gómez, L., Rivas-Manzano, I. V. (2015). *Plantas Ruderales del Área*

*Urbana de Malinalco, Estado de México, México. Botanical Sciences 93 (4): 907-919.*

Martínez-Orea, Y. (2001). *Efecto del fuego sobre el banco de semillas de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel*. Tesis de Licenciatura en Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 62 p.

Mas, F. J., Reyes Díaz-Gallegos, J., Pérez Vega, A. (2003). *Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión*. Investigaciones Geográficas (51): 53-72.

Mas, J. F. (2005). *Un método para combinar datos espectrales e información auxiliar en una red artificial neuronal*. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Goiânia, Brasil. Pp. 3543-3549.

Mbulisi, S., Onesimo, M., Mathieu, R. (2016). *Comparing the spectral settings of the new generation broad and narrow band sensors in estimating biomass of native grasses grown under different management practices*. GIScience & Remote Sensing 53(5): 614-633. DOI: 10.1080/15481603.2016.1221576

McNeely, J. A., Mooney, H. A, Neville, L. E, Schei, P., Waage, J. K. (2001). *Estrategia mundial sobre especies exóticas invasoras*. UICN Gland, Suiza y Cambridge, Reino Unido. 50 p.

Mears, P. T. 1970. *Kikuyu (Pennisetum clandestinum) as a pastures grass- A review*. Tropical grassland 4(2): 139-152.

Mehl, H., Peinado, O. (1997). *Fundamentos del Procesamiento Digital de Imágenes*. En: Aplicación de la teledetección y de los sistemas de información geográfica en la gestión de recursos naturales. En Mehl, H, Mies, E. (Eds.). Parte I: Fundamentos teóricos y prácticos. Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE). 24 p.

Monroy I., R. C., Travieso-Bello, A. C. (2006). *Herramientas técnicas para la planificación: índices, mapas, bases de datos y sistemas de información geográfica*. En Moreno-Casasola, P., Peresbarbosa; R. E., Travieso-Bello, A. C., Estrategia para el manejo costero integral: el enfoque municipal. Instituto de Ecología, A.C. CONANP y Gobierno del estado de Veracruz-Llave, Xalapa, Ver., México.

Morrone, J. J. (2004). *Panbiogeografía, componentes bióticos y zonas de transición*. Revista Brasileira de Entomologia 48(2): 149-162.

Mumby, P. J., Harborne, A. R. (1999). *Development of a systematic classification scheme of marine habitats to facilitate regional management and mapping of Caribbean coral reefs*. Biological conservation 88(2): 155-163.

Muñoz-Saavedra, R. (2013). *Efecto de cinco años de restauración sobre la comunidad vegetal y dos poblaciones de artrópodos en el área A8 de la reserva del Pedregal de San Ángel*. Tesis de Licenciatura en Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 70 p.

NSW Scientific Committee (2003). *Invasion of native plant communities by exotic perennial grasses—key threatening process declaration*. NSW Scientific Committee: Hurstville, NSW. 10 p.

Olaya, V. (2011). *Sistemas de Información Geográfica. Tomo I*. Crative Common Atributes. Pp 1-25.

Parody, Z. A. M., Zapata, S. E. (2015). *Estudio multitemporal de la deforestación de Colombia utilizando procesamiento de imágenes*. Revista Ingenio UFPSO 8(1): 159-175.

Peralta, H. A., Molina, P. J. (2009). *Los Límites y la Cartografía*. En: A. Lot y Z. Cano-Santana (Eds.). Biodiversidad del Pedregal de San Ángel. UNAM, Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel y Coordinación de la Investigación Científica, D.F. México. Pp. 10-25.

Pérez, J. D. (2007). *Introducción a los sensores Remotos, Aplicaciones en Geología*. Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Buenos Aires, Argentina. 45 p.

Rullán-Silva, C. D., Gama-Campillo, L. M., Galindo-Alcántara, A., Olthoff, A. E. (2011). *Clasificación no supervisada de la cobertura de suelo de la región Sierra de Tabasco mediante imágenes LANDSAT ETM+*. Universidad y Ciencia 27(1): 33-41.

Sánchez-Ken, J. G., Zita-Padilla, G A., Mendoza-Cruz, M. (2012). *Catálogo de las gramíneas malezas nativas e introducidas de México*. SAGARPA, México. 436p.

Sathishkumar, S., Gray, T., Lee, H., Luan, C., Preston, S., Robert, M. (2016). *Using unmanned aerial vehicles for highresolution remote sensing to map invasive Phragmites australis in coastal wetlands*. International Journal of Remote Sensing, DOI: 10.1080/01431161.2016.1239288.

Secretaria Ejecutiva de la Reserva Ecologica del Pedregal de San Angel. (2008). <http://www.repsa.unam.mx/index.php/ubicacion> (última fecha de consulta 07/01/2017).

Valladares, F. (2009). *Plantas Ruderales*. Investigación y Ciencia. Ciencia y sociedad 390: 1-2.

Vega Guzmán, Á., López-García, J., Delgado, M., de Lourdes, L. (2008). *Análisis espectral y visual de vegetación y uso del suelo con imágenes Landsat ETM+ con apoyo de fotografías aéreas digitales en el Corredor Biológico Chichinautzin, Morelos, México*. Investigaciones Geográficas (67): 59-75.

Vincent, R. K. (1997) *Fundamentals of geological and environmental remote sensing*. Prentice Hall, New Jersey. 366 p.

Vibrans, H. (2009). *Identificación y descripción malezas de México (Pennisetum clandestinum)*. CONABIO.

<http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/poaceae/pennisetum-clandestinum/fichas/ficha.htm#3>. Fecha de última revisión, 7 de enero del 2017.

Vibrans, H., Espinosa, F., Villaseñor, J.L., Tenorio, P. (2009). *Panorama general de la vegetación secundaria y malezas de México*. Simposium 10 de diciembre del 2009. Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, N.L., México.

Von-Martini, A., Bragachini, M., Bianchini, A., Martellotto, E., Méndez, A. (2011). *Percepción Remota. Agricultura de Precisión*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Manfredi. Córdoba Argentina. 20 p.

## **Anexo 1. Descripción de *Pennisetum clandestinum* (pasto kikuyo).**

Identificación y descripción según Vibrans (2009).

Hábito y forma de vida: es una planta perenne, rastrera, formando matas. Puede trepar, apoyándose en arbustos.

Tamaño: De 5-10 cm de longitud.

Tallo: De corto crecimiento, marcadamente rastreros, con entrenudos cilíndricos, glabros (sin ornamentación), de 1-2 cm de longitud; nudos glabros.

Hojas: Glabras o con pelos. Vainas esparcidamente vilosas en el envés a glabras, con márgenes membranosos y secos; lígula en forma de anillo de pelos de 1-2 mm de longitud, láminas foliares planas o conduplicadas (dobladas a lo largo de su nervio medio), con el ápice obtuso, de (1.5) 2 a 9 cm de longitud, de 2 a 5 mm de ancho, glabras o esparcidamente vilosas en la base.

Inflorescencia: Inconspicua, escondida entre las vainas, compuesta, con espigas cortas axilares. Sólo se pueden ver los estambres por fuera cuando florece.

Espiguilla/Flores: Espiguilla 2 a 3 (4), de 1.4 a 1.8 cm de longitud, escasas, ocultas en las vainas superiores, una espiguilla pedicelada y las demás sésiles, pedicelo de la espiguilla de 2 a 5 mm de longitud, cada una con 15 a 16 cerdas hasta de 1 cm de longitud, glumas ausentes; lema de la flor estéril igual a la lema de la flor fértil, con varias nervaduras, pálea casi igual a la lema. Estambres y estigmas exertos.

Raíz: Rizomas fuertes y estolones bien desarrollados.

Características especiales: La floración puede pasar desapercibida por la inflorescencia inconspicua.

Anexo 2. Base de datos de las fotos tomadas en el área de amortiguamiento A5 de la Reserva ecológica el Pedregal de San Ángel, Ciudad Universitaria, UNAM.

PUNTO	X	Y	OBSERVACIONES	FOTOS					
1	480824	2135915	Pasto abundante	PE.P1.IM1	PE.P1.IM2				
2	480836	2135885	Pasto abundante	PE.P2.IM1	PE.P2.IM2				
3	480851	2135847	Pasto abundante	PE.P3.IM1					
4	480859	2135810	Pasto en grietas de pavimento	PE.P4.IM1	PE.P4.IM2	PE.P4.IM3			
5	480863	2135794	Pasto abundante	PE.P5.IM1					
6	480839	2135718	Entrada a Paseo de las Esculturas	PE.P6.IM1	PE.P6.IM2	PE.P6.IM3	PE.P6.IM4		
7	480832	2135690	Pasto abundante	PE.P7.IM1	PE.P7.IM2				
8	480826	2135612	Pasto abundante	PE.P8.IM1	PE.P8.IM2				
9	480801	2135608	Pasto abundante	PE.P9.IM2					
10	480789	2135606	Pasto con Moulebergia	PE.P10.IM1					
11	480733	2135582	Presencia de pasto (no indicado en el mapa)	PE.P11.IM1					
12	480716	2135589	Presencia de pasto (no indicado en el mapa)	PE.P12.IM1					
13	480677	2135580	Pasto abundante	PE.P13.IM1					
14	480675	2135647	Último punto que se pudo verificar por fuera	PE.P14.IM1					
15	480814	2135709	Pasto abundante	PE.P15.IM1	PE.P15.IM2	PE.P15.IM3			
16	480802	2135710	Pasto y Muhlebergia (abajito de la entrada)	PE.P16.IM1	PE.P16.IM2	PE.P16.IM3			
17	480786	2135711	Pasto sobre las lavas	PE.P17.IM1	PE.P17.IM2	PE.P17.IM3			
18	480777	2135720	Muhlebergia	PE.P18.IM1					
19	480776	2135699	Pasto abundante	PE.P19.IM1					
20	480770	2135710	Pasto abundante	PE.P20.IM1					
21	480758	2135723	Pasto abundante	PE.P21.IM1	PE.P21.IM2	PE.P21.IM3	PE.P21.IM4	PE.P21.IM5	
22	480737	2135746	Pasto abundante	PE.P22.IM1	PE.P22.IM2	PE.P22.IM3			
23	480675	2135771	Pasto abundante	PE.P23.IM1	PE.P23.IM2	PE.P23.IM3			
24	480752	2135765	Pasto abundante	PE.P24.IM1					
25	480756	2135793	Pasto abundante	PE.P25.IM1					
26	480780	2135819	Pasto abundante	PE.P26.IM1					
27	480736	2135851	Moulebergias	PE.P27.IM1					
28	480738	2135897	Pasto abundante	PE.P28.IM1	PE.P28.IM2	PE.P28.IM3	PE.P28.IM4	PE.P28.IM5	
29	480673	2135809	Pasto abundante	PE.P29.IM1	PE.P29.IM2	PE.P29.IM3	PE.P29.IM4		

Anexo 3. Base de datos de las fotos tomadas en el área de amortiguamiento A13 de la Reserva ecológica el Pedregal de San Ángel, Ciudad Universitaria, UNAM.

PUNTO	X	Y	OBSERVACIONES	FOTOS				
				#1	#2	#3	#4	#5
1	480611	2135028	Pasto abundante	EP.P1.IM1	EP.P1.IM2			
2	480619	2135008	Pasto abundante	EP.P2.IM1	EP.P2.IM2			
3	480611	2135043	Pasto abundante	EP.P3.IM1	EP.P3.IM2			
4	480599	2135078	No hay presencia de pasto	EP.P4.IM1	EP.P4.IM2			
5	480581	2135143	Pasto abundante	EP.P5.IM1	EP.P5.IM2			
6	480661	2135276	-	EP.P6.IM1	EP.P6.IM2	EP.P6.IM3		
7	480645	2135265	Pasto abundante	EP.P7.IM1	EP.P7.IM2			
8	480618	2135194	-	EP.P8.IM1	EP.P8.IM2	EP.P8.IM3	EP.P8.IM4	EP.P8.IM5
9	480596	2135193	-	EP.P9.IM1	EP.P9.IM2	EP.P9.IM3	EP.P9.IM4	
10	480699	2135296	Pasto abundante	EP.P10.IM1	EP.P10.IM2	EP.P10.IM3		
11	480739	2135280	poco pasto	EP.P11.IM1	EP.P11.IM2	EP.P11.IM3	EP.P11.IM4	
12	480775	2135263	Pasto y Muhlebergias	EP.P12.IM1	EP.P12.IM2	EP.P12.IM3	EP.P12.IM4	
13	480803	2135255	Pasto abundante	EP.P13.IM1	EP.P13.IM2	EP.P13.IM3	EP.P13.IM4	
14	480852	2135230	-	EP.P14.IM1	EP.P14.IM2	EP.P14.IM3	EP.P14.IM4	EP.P14.IM5
15	480856	2135191	-	EP.P15.IM1	EP.P15.IM2	EP.P15.IM3		
16	480857	2135144	Poco pasto	EP.P16.IM1	EP.P16.IM2			
17	480834	2135112	La pared no deja que pase	EP.P17.IM1	EP.P17.IM2	EP.P17.IM3		
18	480822	2135046	Pasto abundante	EP.P18.IM1	EP.P18.IM2	EP.P18.IM3	EP.P18.IM4	
19	480860	2135004	Pasto abundante	EP.P19.IM1	EP.P19.IM2	EP.P19.IM3	EP.P19.IM4	
20	480870	2134959	Pasto abundante	EP.P20.IM1	EP.P20.IM2	EP.P20.IM3	EP.P20.IM4	
21	480778	2134920	Pasto abundante	EP.P21.IM1	EP.P21.IM2	EP.P21.IM3	EP.P21.IM4	

Anexo 4. Base de datos de las fotos tomadas en el área de amortiguamiento A4 de la Reserva ecológica el Pedregal de San Ángel, Ciudad Universitaria, I INAM

PUNTO	X	Y	OBSERVACIONES	# FOTO										
				#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9		
P1	480971	2135408	Pasto abundante	SE.P1.IM1	SE.P1.IM2	SE.P1.IM3	SE.P1.IM4	SE.P1.IM5	SE.P1.IM6					
P2	480965	2135445	Mulembergias	SE.P2.IM1	SE.P2.IM2	SE.P2.IM3								
P3	480940	2135454	Pasto abundante	SE.P3.IM1	SE.P3.IM2	SE.P3.IM3	SE.P3.IM4							
P4	480942	2135488	Mulembergias	SE.P4.IM1	SE.P4.IM2	SE.P4.IM3								
P5	480942	2135510	Mulembergias	SE.P5.IM1	SE.P5.IM2	SE.P5.IM3								
P6	480929	2135513	Mulembergias	SE.P6.IM1	SE.P6.IM2	SE.P6.IM3	SE.P6.IM4							
P7	480961	2135540	Pasto abundante	SE.P7.IM1	SE.P7.IM2	SE.P7.IM3	SE.P7.IM4							
P8	480971	2135560	Pasto abundante	SE.P8.IM1	SE.P8.IM2	SE.P8.IM3	SE.P8.IM4	SE.P8.IM5	SE.P8.IM6	SE.P8.IM7	SE.P8.IM8	SE.P8.IM9		
P9	480990	2135562	Mulembergias	SE.P9.IM1	SE.P9.IM2	SE.P9.IM3	SE.P9.IM4	SE.P9.IM5	SE.P9.IM6	SE.P9.IM7				
P10	481034	2135571	Pasto abundante	SE.P10.IM1	SE.P10.IM2	SE.P10.IM3	SE.P10.IM4							
P11	481029	2135559	Alcance del pasto	SE.P11.IM1	SE.P11.IM2									
P12	481075	2135567	Pasto abundante	SE.P12.IM1	SE.P12.IM2	SE.P12.IM3	SE.P12.IM4	SE.P12.IM5	SE.P12.IM6	SE.P12.IM7	SE.P12.IM8			
P13	481129	2135554	*Hubo un incendio y el fuego favoreció el crecimiento del pasto (más verde)	SE.P13.IM1	SE.P13.IM2	SE.P13.IM3	SE.P13.IM4	SE.P13.IM5	SE.P13.IM6	SE.P13.IM7	SE.P13.IM8			
P14	481169	2135554	Pasto abundante	SE.P14.IM1	SE.P14.IM2	SE.P14.IM3	SE.P14.IM4	SE.P14.IM5						
P15	481185	2135523	Alcance del pasto	SE.P15.IM1	SE.P15.IM2	SE.P15.IM3	SE.P15.IM4	SE.P15.IM5						
P16	481183	2135489	Pasto abundante	SE.P16.IM1	SE.P16.IM2	SE.P16.IM3	SE.P16.IM4							
P17	481176	2135435	Pasto abundante	SE.P17.IM1	SE.P17.IM2	SE.P17.IM3	SE.P17.IM4							
P18	481172	2135414	Pasto abundante	SE.P18.IM1	SE.P18.IM2	SE.P18.IM3	SE.P18.IM4	SE.P18.IM5	SE.P18.IM6	SE.P18.IM7	SE.P18.IM8			
P19	481119	2135408	Pasto abundante	SE.P19.IM1	SE.P19.IM2	SE.P19.IM3	SE.P19.IM4							
P20	481079	2135401	Pasto abundante	SE.P20.IM1	SE.P20.IM2	SE.P20.IM3								
P21	481022	2135405	Pasto abundante	SE.P21.IM1	SE.P21.IM2	SE.P21.IM3								
P22	481001	2135408	Pasto abundante	SE.P22.IM1	SE.P22.IM2									
P23	480911	2135404	Pasto abundante	SE.P23.IM1	SE.P23.IM2	SE.P23.IM3	SE.P23.IM4	SE.P23.IM5	SE.P23.IM6					
P24	480860	2135436	Pasto abundante	SE.P24.IM1	SE.P24.IM2									
P25	480860	2135466	Pasto abundante	SE.P25.IM1	SE.P25.IM2									
P26	480854	2135563	Pasto abundante	SE.P26.IM1	SE.P26.IM2									
P27	480917	2135587	Pasto abundante	SE.P27.IM1	SE.P27.IM2	SE.P27.IM3								

**Anexo 5.** Base de datos de las fotos tomadas en el área de amortiguamiento **A11** de la Reserva ecológica el Pedregal de San Ángel, Ciudad Universitaria, UNAM.

PUNTO	X	Y	OBSERVACIONES	FOTOS						
				#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
1	479363	2135500	Pasto abundante	VA.P1.IM1	VA.P1.IM2					
2	479412	2135475	Pasto abundante	VA.P2.IM1	VA.P2.IM2	VA.P2.IM3	VA.P2.IM4	VA.P2.IM5	VA.P2.IM6	
3	479466	2135488	Pasto abundante	VA.P3.IM1	VA.P3.IM2					
4	479477	2135497	Pasto abundante	VA.P4.IM1	VA.P4.IM2	VA.P4.IM3	VA.P4.IM4	VA.P4.IM5	VA.P4.IM6	
5	479539	2135533	Pasto abundante	VA.P5.IM1	VA.P5.IM2	VA.P5.IM3	VA.P5.IM4	VA.P5.IM5	VA.P5.IM6	VA.P5.IM7
6	479545	2135492	pedregal remanente	VA.P6.IM1	VA.P6.IM2	VA.P6.IM3				
7	479541	2135479	Pasto abundante	VA.P7.IM1	VA.P7.IM2	VA.P7.IM3	VA.P7.IM4	VA.P7.IM5	VA.P7.IM6	
8	479571	2135410	Pasto abundante	VA.P8.IM1	VA.P8.IM2	VA.P8.IM3	VA.P8.IM4	VA.P8.IM5		
9	479539	2135374	Pasto abundante	VA.P9.IM1	VA.P9.IM2					
10	479516	2135333	Pasto abundante	VA.P10.IM1	VA.P10.IM2	VA.P10.IM3				
11	479533	2135271	Poco pasto	VA.P11.IM1						
12	479560	2135265	Poco pasto	VA.P12.IM1						
13	479578	2135296	Poco pasto	VA.P13.IM1	VA.P13.IM2	VA.P13.IM3	VA.P13.IM4			
14	479602	2135354	poco pasto	VA.P14.IM1	VA.P14.IM2	VA.P14.IM3	VA.P14.IM4			
15	479602	2135444	Poco pasto	VA.P15.IM1	VA.P15.IM2	VA.P15.IM3	VA.P15.IM4			
16	479565	2135433	Poco pasto	VA.P16.IM1	VA.P16.IM2					
17	479600	2135489	Poco pasto	VA.P17.IM1	VA.P17.IM2	VA.P17.IM3				
18	479669	2135482	Muhlebergias	VA.P18.IM1	VA.P18.IM2	VA.P18.IM3				
19	479769	2135439	Poco Pasto	VA.P19.IM1	VA.P19.IM2					
20	479779	2135415	pasto y Moulebergias	VA.P20.IM1	VA.P20.IM2	VA.P20.IM3				
21	479802	2135364	Poco pasto	VA.P21.IM1	VA.P21.IM2	VA.P21.IM3				
22	479813	2135324	Poco pasto	VA.P22.IM1	VA.P22.IM2	VA.P22.IM3				
23	479843	2135274	Poco pasto	VA.P23.IM1	VA.P23.IM2					