



UNODC

Oficina de las Naciones Unidas
contra la Droga y el Delito

MÉXICO

GOBIERNO DE LA REPÚBLICA



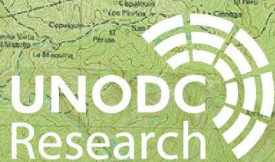
México

Monitoreo de Cultivos de Amapola

2014-2015



JUNIO 2016





MÉXICO

Monitoreo de Cultivos de Amapola 2014-2015

Junio 2016



UNODC

Oficina de las Naciones Unidas
contra la Droga y el Delito

MÉXICO
GOBIERNO DE LA REPÚBLICA



Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito
Oficina de Enlace y Partenariado en México

Obrero Mundial 358, piso 2,
Col. Viaducto Piedad, Col. Narvarte,
Del. Benito Juárez, C.P. 03000, Ciudad de México.
Tel.: +52 (55) 5588-4426, ext. 106
Fax: +52 (55) 5588-4429
Email: fo.mexico@unodc.org
Website: https://www.unodc.org/mexicoandcentralamerica/es/romex/oficina_LPO.html

Copyright © Naciones Unidas, 2016. Reservados todos los derechos en el mundo.

La presente publicación puede reproducirse íntegra o parcialmente por cualquier medio para fines educativos o sin ánimo de lucro, y no es necesario un permiso especial del titular de los derechos de autor, siempre que se cite expresamente la fuente. La Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC) agradecerá que se le envíe copia de toda publicación que utilice como fuente la presente publicación.

Se sugiere hacer la cita como sigue: UNODC, México, Monitoreo de Cultivos de Amapola 2014-2015.

La presente publicación no se puede revender ni podrá ser utilizada para ningún otro fin comercial sin la autorización previa por escrito de la UNODC. Esa autorización deberá solicitarse de la Subdivisión de Investigación y Análisis de Tendencias de la UNODC, indicando claramente el propósito y la intención de la reproducción.

ISBN:978-92-1-058233-9

Fotografías: Proyecto MEXK54/UNODC-LPO México

Primera edición: Junio 2016

Cuidado editorial e impresión en:
Instituto Nacional de Ciencias Penales (Inacipe)
Magisterio Nacional 113, Col. Tlalpan Centro,
C.P. 14000, Ciudad de México.



FÉ DE ERRATAS

Las cifras de estimación del cultivo de amapola publicada en junio 2016 en el presente informe, fueron revisadas por una inconsistencia estadística¹, por lo que UNODC realizó dicho ajuste. Por lo anterior, las cifras de estimación de superficie sembrada con cultivo de amapola que figuran a continuación son correctas, y se incluyen a continuación en el presente **Fé de Erratas**.

RESUMEN EJECUTIVO

El sexto párrafo *debe decir*:

De acuerdo con el estudio de cultivos ilícitos de amapola en México, entre julio de 2014 y junio de 2015, la estimación de superficie de cultivo de amapola arrojó el siguiente resultado:

- Valor alto: 30,400 hectáreas.
- Valor medio: 26,100 hectáreas (más preciso).
- Valor bajo: 21,800 hectáreas.

APARTADO 6.1. ÁREA ESTIMADA CON CULTIVOS DE AMAPOLA

El segundo párrafo *debe decir*:

La estimación de superficie nacional sembrada con cultivos de amapola en 12 meses para el periodo de monitoreo julio 2014 a junio 2015 se estimó en su punto medio con 26,100 hectáreas, con un intervalo de confianza (95%), con un rango estadístico de 21,800 a 30,400 hectáreas (tabla 2). Esto es el resultado de una suma de tres estimaciones en este periodo tomando en cuenta que los cultivos de amapola pueden crecer en diferentes momentos durante el año.

En la tabla 2. Área estimada con cultivos de amapola (ha) para 12 meses de monitoreo en 2014-2015, *debe decir*:

Periodo del resultado	Área (ha) (punto bajo)	Área (ha) (punto medio)	Área (ha) (punto alto)
Julio 2014 - Junio 2015	21,800	26,100	30,400

APARTADO 7.14. FORMULA APLICADA A LA ESTIMACIÓN ESTADÍSTICA A CADA MARCO DE MUESTREO

En la tabla 11. Estimaciones de área de amapola para el marco de muestreo (I), basado en la destrucción histórica de cultivos, *debe decir*:

Periodos analizados	Área (ha) (punto bajo)	Área (ha) (punto medio)	Área (ha) (punto alto)
Julio-Octubre 2014	6,470	7,570	8,670
Noviembre 2014-Febrero 2015	6,190	9,370	12,540
Mazo-Junio 2015	3,470	6,490	9,510
Totales	18,910	23,430	27,950

En la tabla 13. Área total estimada con cultivos de amapola (ha) para el periodo del 2014-2015, *debe decir*:

Periodo analizado	Área (ha) (punto bajo)	Área (ha) (punto medio)	Área (ha) (punto alto)
Julio 2014-Junio 2015	21,800	26,100	30,400

¹ El cálculo tuvo una asignación incorrecta en los factores de ponderación para los distintos estratos de la muestra, lo que provocó una subestimación del área de cultivo de amapola para el periodo 2014-2015.

AGRADECIMIENTOS

La implementación del Programa de Monitoreo de Cultivos Ilícitos en México ha sido posible gracias a las contribuciones financieras del gobierno federal en México, a través de sus instituciones involucradas para su ejecución (SEDENA, SEMAR, PGR/AIC-CENAPI).

Agradecemos a las instituciones del gobierno federal de México, a las universidades, a los expertos de UNODC, a los Analistas y Técnicos, y al Grupo de Seguimiento que integran el proyecto "MEXK54", por su gran esfuerzo, empeño y colaboración en la implementación del Sistema de Monitoreo de Cultivos de Amapola en México, por su contribución y valiosos comentarios para la elaboración del presente reporte nacional para el periodo de estudio 2014-2015.

Al gobierno federal de México:

Secretaría de Relaciones Exteriores (SRE)

Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA)

Secretaría de Marina-Armada de México (SEMAR)

Procuraduría General de la República, a través de la Agencia de Investigación Criminal y el Centro Nacional de Planeación, Análisis e Información para el Combate a la Delincuencia (PGR-AIC/CENAPI)

Al Grupo de Seguimiento al Proyecto:

Alfredo Enríquez Delgado, SEMAR

Abel Trejo Castelán, SEMAR

Isaac Morales Tenorio, SRE

José Romero Libano, SEDENA

Oscar Santiago Quintos, PGR-AIC

Vidal Díazleal Ochoa, PGR-AIC

A la UNODC:

Antonio Mazzitelli, Representante (UNODC LPO-México)

Angela Me, Jefa del Área de Investigación y Análisis de Tendencias (UNODC-Viena)

Coen Bussink, Experto en Sensores Remotos y SIG, Área de Investigación y Análisis de Tendencias (UNODC-Viena)

Irmgard Zeiler, Experta en Investigación, Área de Investigación y Análisis de Tendencias (UNODC-Viena)

Lorenzo Vita, Experto en SIG y Sensores Remotos (UNODC-Viena)

Matteo Mattuizzi, Experto en Sensores Remotos (Consultor UNODC)

A los Analistas y Técnicos del Proyecto:

Jerónimo Solís Guillen, Coordinador de Proyecto

Iván A. Trujillo Roura, Asistente Técnico de Análisis y Monitoreo

David Ravaux, Asistente de Programa

Antonio Domínguez González, Analista

Braulio González Linares, Analista

Ernesto Guillén Avilés, Analista

Gabriel Vázquez López, Analista

Julio C. Uscanga González, Analista

Juan J. Navarrete López, Analista

Miguel Silva Bahena, Analista

Manuel Sánchez Ávila, Analista

Marco A. Vela Tapia, Analista

Luis Santamaría Campos, Analista

A las Universidades:

Universidad Nacional Autónoma de México, México (UNAM), a través del Instituto de Geografía

Universidad de Recursos Naturales y Ciencias Aplicadas, Viena, Austria (BOKU)

SRE

SECRETARÍA DE
RELACIONES EXTERIORES

SEDENA

SECRETARÍA DE
LA DEFENSA NACIONAL

SEMAR

SECRETARÍA DE MARINA

PGR

PROCURADURÍA GENERAL
DE LA REPÚBLICA

ABREVIATURAS

AFI	Agencia Federal de Investigación
AIC	Agencia de Investigación Criminal
CEM	Continuo de Elevaciones Mexicano
CENAPI	Centro Nacional de Planeación, Análisis e Información para el Combate a la Delincuencia
CONAPO	Consejo Nacional de Población
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PGR	Procuraduría General de la República
ICMP	Programa de Monitoreo de Cultivos Ilícitos (por sus siglas en inglés)
PPS	Probabilidad Proporcional al Tamaño (por sus siglas en inglés)
SIG	Sistema de Información Geográfica
SRE	Secretaría de Relaciones Exteriores
SEDENA	Secretaría de la Defensa Nacional
SEMAR	Secretaría de Marina-Armada de México
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
UNODC	Oficina de las Naciones Unidas Contra la Droga y el Delito

GLOSARIO

Término	Definición
Espectro Electromagnético	Es el conjunto de todas las longitudes de onda (o frecuencias) posibles en las que se manifiesta la radiación electromagnética.
Fusión	Es la técnica de combinar dos imágenes, una pancromática y una multiespectral, esto permite incrementar su resolución espacial y espectral de los rasgos u objetos observados.
Luz Infrarroja (IRc)	Es la porción del espectro electromagnético correspondiente al infrarrojo cercano.
Imagen Multiespectral	Imagen satelital que contiene distintas porciones del espectro electromagnético.
Modo Espectral	Define las propiedades espectrales de una imagen satelital, si esa es pancromática o multiespectral.
Ortofoto	Fotografía aérea obtenida de una cámara métrica que ha sido corregida geométricamente, así se obtiene un producto que permite hacer mediciones reales de los objetos (distancias, superficies, etcétera).
Ortorectificación	Proceso digital que permite corregir las distorsiones geométricas a las imágenes satelitales o fotografías aéreas ocasionadas por los desplazamientos e inclinación del sensor sobre el relieve del terreno.
Pancromático	Imágenes satelitales representadas en escala de grises, conforme a las características del sensor.
Percepción Remota o Teledetección	Técnica que permite obtener una imagen de la superficie terrestre a través de sensores remotos sin estar en contacto con ella, es decir, situados en satélites o aviones.
Raster	Archivo conformado por una matriz de células (píxeles) organizado en filas y columnas con un valor para cada célula, este archivo puede obtenerse utilizando cualquier tipo de los Sensores Remotos disponibles.
SIG	Sistemas de Información Geográfica.
Sensores Remotos	Instrumentos que sirven para obtener imágenes de la superficie terrestre a distancia, como los satélites artificiales y/o cámaras digitales para tomar fotos aéreas.
VHR	Muy alta resolución espacial contenida en las imágenes satelitales y fotografías aéreas (por sus siglas en inglés Very High Resolution).
Luz Visible (VIS)	Espectro visible con capacidad de captarlo por el ojo humano, donde el espectro está conformado por el rojo, verde, y azul.

ÍNDICE GENERAL

1. RESUMEN EJECUTIVO	1
2. INTRODUCCIÓN	3
3. ANTECEDENTES	5
4. INSTITUCIONES Y PERSONAL DEL PROYECTO	9
4.1. Organización de las Instituciones Involucradas	9
4.2. Instituciones externas (académicas)	9
4.3. Organización del personal del proyecto	10
5. BREVE DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA APLICADA EN EL MONITOREO	11
5.1. Determinación de las áreas de estudio: dos marcos de muestreo	11
5.2. Metodología basada en la toma de muestras	13
5.3. Muestras colectadas tres veces durante el año para la identificación de cultivos de amapola	16
5.4. Sensores utilizados para la colecta de imágenes satelitales y fotografía aérea	16
5.5. Determinación de fechas óptimas para la colecta de imágenes satelitales	17
5.6. Interpretación de las imágenes satelitales	18
5.7. Cálculo estadístico para determinar el área con cultivos ilícitos	19
6. RESULTADOS DE LA ESTIMACIÓN DE ÁREA CON CULTIVOS DE AMAPOLA	20
6.1. Área estimada con cultivos de amapola	20
6.2. Área de cobertura de las imágenes colectadas y utilizadas para la estimación con cultivos	22
7. INSUMOS DE LA METODOLOGÍA DETALLADA	25
7.1. Rejilla nacional (grilla) de 10 x 10 kilómetros	26
7.2. Zonas de monitoreo	28
7.3. Marco de muestreo sobre los datos de destrucción histórica	29
7.4. Marco de muestreo sobre el análisis estadístico de probabilidades para cultivos ilícitos por factores determinantes	31
7.5. Selección de muestras para el monitoreo	33
7.6. Análisis de fechas para determinar calendarios agrícolas, utilizando series temporales de imágenes satelitales	35
7.6.1. Áreas de prueba para las 3 regiones con imágenes Landsat	35
7.6.2. Análisis de los datos	37

7.6.3. Calendario agrícola durante el año (ciclos de cosecha)	37
7.6.4. Primeros resultados del análisis al calendario agrícola.	41
7.7. Etapas y flujo de trabajo para la interpretación de cultivos ilícitos en imágenes satelitales	42
7.8. Imágenes utilizadas para el monitoreo	44
7.9. Procesos de corrección y mejoría de las imágenes satelitales	45
7.9.1. Softwares utilizados para el procesamiento y análisis de las imágenes.	46
7.9.2. Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM).	46
7.9.3. Ortorectificación	49
7.9.4. Fusión de las imágenes	50
7.9.5. Recorte de las imágenes	51
7.9.6. Realce de sus histogramas.	52
7.10. Fotointerpretación y medición de cultivos de amapola con imágenes satelitales	53
7.10.1. Flujo de trabajo robusto para la fotointerpretación de cultivos de amapola en imágenes satelitales	56
7.10.2. Análisis espectral mediante la combinación de bandas en las imágenes satelitales	57
7.10.3. Árbol de decisiones para cultivos de amapola	58
7.10.4. Claves de Interpretación y su uso en cultivos de amapola.	59
7.10.5. Análisis multitemporal con sensores remotos.	60
7.11. Vuelos de validación con fotos aéreas (trabajos de campo).	61
7.11.1. Cámaras digitales de formato pequeño con sensor visible e infrarrojo utilizadas en los vuelos de fotografía aérea	62
7.11.2. Calibración del sensor de la cámara digital	64
7.11.3. Funcionalidad del intervalómetro	65
7.11.4. Geolocalización de la fotografía aérea digital	66
7.11.5. Uso de plataformas metálicas con especificaciones aéreas.	68
7.11.6. Diseño, características e instalación de las plataformas metálicas, e integración de un sistema aerotransportado para la adquisición de fotografía aérea digital para el proyecto	70
7.12. Planeación de vuelo para la colecta de fotografía aérea.	73
7.13. Proceso para creación de fotomosaicos	76
7.14. Fórmula aplicada a la estimación estadística a cada marco de muestreo	77
7.15. Factor de ajuste aplicado a la estimación de superficie por tipo de resolución espacial	79
ANEXOS	81
ANEXO I. Mapa nacional de probabilidades para cultivos ilícitos por factores determinantes/riesgo	81
ANEXO II. Características de imágenes satelitales disponibles utilizadas en el proyecto	98
ANEXO III. Descripción del sensor de tipo pasivo y/o satélites ópticos	100
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Los tres periodos de colecta para las imágenes satelitales/fotografía aérea.	16
Tabla 2. Área estimada con cultivos de amapola (ha) para 12 meses de monitoreo en 2014 -2015.	20
Tabla 3. Resumen general de la muestra colectada y analizada para los tres periodos.	22
Tabla 4. Número de segmentos por porcentaje de cobertura con imágenes satelitales y/o fotos aéreas..	22
Tabla 5. Calendario con los valores NDVI más altos (promedio) por región.	41
Tabla 6. Cantidad de imágenes utilizadas por tipo de sensor sobre la muestra de 368 segmentos.	44
Tabla 7. Calendario para la colecta de imágenes satelitales.	45
Tabla 8. Características del CEM utilizado en el proyecto para la corrección de las imágenes satelitales.	47
Tabla 9. Características de la cámara digital réflex.	63
Tabla 10. Relación del número de vueltas y cantidad de disparos por segundo.	66
Tabla 11. Estimaciones de área de amapola para el marco de muestreo (I), basado en la destrucción histórica de cultivos.	78
Tabla 12. Estimaciones de área de amapola para el marco de muestreo (II), basado en análisis de factores determinantes/riesgo.	78
Tabla 13. Área total estimada con cultivos de amapola (ha) para el periodo del 2014 -2015.	79
TABLAS EN ANEXOS	
Tabla 14. Total de las variables utilizadas en el estudio.	83
Tabla 15. Variables independientes seleccionadas para el modelo logístico binomial.	84
Tabla 16. Modelo logístico binomial: probabilidad de cultivos ilícitos.	86
Tabla 17. Características de los sensores pasivos utilizados para el monitoreo.	98

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Ejemplo ciclos fenológicos identificados con series temporales de imágenes satelitales.	17
Gráfica 2. Curvas fenológicas para la amapola en la región Norte.	38
Gráfica 3. Curvas fenológicas para la amapola en la región Centro.	39
Gráfica 4. Curva fenológica para la amapola en la región Sur.	40
Gráfica 5. Cálculo lineal de las hectáreas en imágenes y fotos aéreas utilizadas.	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Etapas de la metodología del proyecto.	25
Figura 2. Ejemplo de una rejilla (grilla) alfanumérica.	26
Figura 3. Izquierda: imagen satelital WorldView-2 y polígonos de amapola. Centro: serie de capas NDVI. Derecha: curva fenológica obtenida de una serie de capas NDVI para la ubicación central de un pixel.	37
Figura 4. Ubicación de los datos de referencia (segmentos) en la región Norte.	38
Figura 5. Ubicación de los datos de referencia (segmentos) en la región Centro.	39
Figura 6. Ubicación de los datos de referencia (segmentos) en la región Sur.	40
Figura 7. Diagrama de flujo del proyecto de monitoreo para cultivos ilícitos en México.	43
Figura 8. Interface del software ERDAS Imagine para la ortorectificación.	49
Figura 9. Interface del software ERDAS Imagine para ejecutar la ortorectificación.	49
Figura 10. Interface del software Socet GXP para la ortorectificación.	50
Figura 11. Interface del software ERDAS Imagine para realizar la fusión de las imágenes.	50
Figura 12. Interface del software Socet GXP para realizar la fusión de las imágenes.	51
Figura 13. Interface del software ERDAS y área de recorte de la imagen para cada segmento. ...	51
Figura 14. Interface del software Socet, realizando la fusión y recorte de una imagen al mismo tiempo.	52
Figura 15. Interface del software ERDAS y el realce de los histogramas manual.	52
Figura 16. Interface del software SOCET y el realce de histogramas automático.	53
Figura 17. Flujo de trabajo robusto para la fotointerpretación de imágenes satelitales.	56
Figura 18. Flujograma del árbol de decisión para determinar los cultivos de amapola.	58
Figura 19. Ejemplo de una clave de interpretación para cultivos de amapola.	59
Figura 20. Esquema de la temporalidad utilizada entre los periodos de análisis.	60
Figura 21. Ejemplo de la distribución de los equipos utilizados en helicóptero para trabajos de campo.	62
Figura 22. Ejemplo de navegación del GPS aéreo.	67
Figura 23. Elementos de la orientación exterior de la cámara; esta está definida por el ángulo en los tres ejes de giro y por su posición x, y, z en una proyección cartográfica y un datum de referencia.	68
Figura 24. Modelado digital de la plataforma sobre en la escotilla para determinar sus dimensiones y posición de los largueros, travesaños y demás componentes para ser instalada en aeronaves de ala móvil y fija.	71
Figura 25. Líneas de vuelo con la sobreposición recomendada.	73

Figura 26. Hoja del cálculo y parámetros de las líneas de vuelo.	74
Figura 27. Interface del software utilizado para la creación de las líneas de vuelo.	75
Figura 28. Interface del software Pix4D mapper.	76
Figura 29. Reporte de calidad generado por el software Pix4D mapper.	76
FIGURAS EN ANEXOS	
Figura 30. Diagrama de relaciones.	82
Figura 31. Esquema de las longitudes de onda del espectro (visible).	100
Figura 32. Esquema del número de bandas por tipo de espectro en imágenes Geo Eye-1.	101
Figura 33. Ejemplo de órbitas (izquierda) y barrido de un satélite (derecha).	102

ÍNDICE DE FOTOS

Foto 1. Cultivos de amapola en imágenes satelitales de muy alta resolución (VHR).....	13
Foto 2. Cultivos de amapola en imagen satelital de alta resolución y foto aérea.....	16
Foto 3. Imagen satelital con nubosidad y fotografía aérea de la misma área.....	17
Foto 4. Equipo de analistas interpretando las imágenes satelitales en pantalla.....	18
Foto 5. Digitalización de polígonos y superficie (ha) en imagen satelital Geo Eye-1 (VHR).....	19
Foto 6. Esfuerzos en destrucción de amapola por instituciones participantes en el proyecto de monitoreo.....	21
Foto 7. Ejemplo de campos de amapola identificados con imagen satelital WorldView-2.....	35
Foto 8. Tipos de resolución de las imágenes utilizadas para el monitoreo.....	44
Foto 9. Análisis de fotointerpretación de amapola en imagen Geo Eye-1 (VHR).....	54
Foto 10. Cultivo de amapola detectado en imagen VHR, con combinación de bandas en RGB y IRc.....	57
Foto 11. Ejemplo de cultivos de amapola interpretados en diferente periodo de análisis.....	61
Foto 12. A) Imagen visible (RGB). B) imagen en el infrarrojo cercano (IRc) y C) imagen compuesta en falso color, integrada por una combinación de las bandas visibles y la infrarroja cercana.....	63
Foto 13. Comparación del sensor con ajustes de calibración.....	64
Foto 14. Intervalómetro utilizado en los trabajos de campo.....	65
Foto 15. Plataforma con adaptación exterior para aeronave ala móvil (helicóptero) tipo cápsula.....	69
Foto 16. Plataformas metálicas construidas para aeronaves de ala móvil y ala fija.....	72
Foto 17. Aeronave de ala móvil, con escotilla en el piso que permite la colocación de la plataforma metálica.....	72
Foto 18. Aeronave ala fija, con escotilla en el piso para instalación de la base metálica y cámaras.....	72
Foto 19. Ejemplo de la instalación de las cámaras visible (VIS) e infrarroja (IRc) en las plataformas metálicas para ala móvil o fija.....	73
FOTOS EN ANEXOS	
Foto 20. Comparación de detalles entre imágenes satelitales.....	101
Foto 21. Nivel de detalles por cantidad de bits en cada imagen.....	102

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 1. Área de estudio conformada por dos marcos de muestreo para el monitoreo.	12
Mapa 2. Marcos de muestreo conformado por la rejilla nacional (grilla) de 10 x 10 kilómetros y los segmentos elegidos como muestras para coleccionar imágenes satelitales/fotos aéreas.	14
Mapa 3. Distribución de la muestra (368 segmentos) para la programación de imágenes satelitales de periodo de estudio julio 2014-junio 2015.	15
Mapa 4. Área (ha) con cultivos de amapola en los 368 (10 x 10 Km) segmentos de la muestra.	23
Mapa 5. Porcentaje de adquisición de imágenes satelitales y fotos aéreas por segmento de la muestra promediado con los tres periodos cuatrimestrales.	24
Mapa 6. Rejilla ortogonal nacional (grilla) de 10 x10 Km (100 Km ² por segmento)..	27
Mapa 7. Los marcos de muestreo (I y II) que formaron la base para estimación del área (ha) para cultivos de amapola.. . . .	28
Mapa 8. Marco de muestreo con datos de destrucción histórica de plantíos ilícitos.	30
Mapa 9. Área nacional de probabilidades/riesgo por factores determinantes para cultivos ilícitos.	32
Mapa 10. Ubicación de las imágenes satelitales utilizadas en la muestra de 368 segmentos.	33
Mapa 11. Distribución del marco de muestro I, con 100 geoestratos para extraer la muestra de 300 segmentos de 10 x 10 Km	34
Mapa 12. Ubicación de las áreas de prueba con imágenes satelitales de LANDSAT 7 y 8.	36
Mapa 13. Modelo del Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM).	48
Mapa 14. Cantidad de segmentos de la muestra (10 x 10 km) con fotografías aéreas colectadas en las campañas de trabajos campo.. . . .	80
MAPAS EN ANEXOS	
Mapa 15. Información histórica de cultivos de amapola en 2010.	87
Mapa 16. Información histórica de cultivos de marihuana para el año 2010.	88
Mapa 17. Altitudes promedio (MSNM) del territorio mexicano.	89
Mapa 18. Promedio de las pendientes (%) en el territorio mexicano.	90
Mapa 19. Desviación estándar del promedio de las pendientes (%) en el territorio mexicano.. . . .	91
Mapa 20. Distancia (Km) mínima a caminos pavimentados al centroide de cada segmento 10 x 10 Km en el territorio mexicano.	92
Mapa 21. Población total por localidades en el territorio mexicano.	93
Mapa 22. Promedio del Índice de Marginación de la población en del territorio mexicano.	94
Mapa 23. Presencia de vegetación densa en el territorio mexicano.. . . .	95
Mapa 24. Presencia de otros tipos de vegetación en el territorio mexicano.. . . .	96
Mapa 25. Área nacional de probabilidades/riesgo por factores determinantes para cultivos ilícitos.	97

1. RESUMEN EJECUTIVO

Este reporte presenta la primera estimación nacional oficial de cultivos de amapola en México, resultado del proyecto MEXK54 “Sistema de Monitoreo de Cultivos Ilícitos en el Territorio Mexicano”, implementado conjuntamente por el gobierno de México y el Programa de Monitoreo de Cultivos Ilícitos de la Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC “por sus siglas en inglés”).

La metodología del estudio se desarrolló durante la fase piloto que inició desde el segundo semestre de 2012 hasta el primer semestre de 2014. Como un primer paso se realizó un análisis de las áreas de riesgo para cultivos de amapola. Como segundo paso, se probaron diferentes diseños espaciales para el muestreo estadístico y se estableció la programación óptima de imágenes satelitales de acuerdo con los calendarios agrícolas derivados del análisis de una serie temporal de un gran número de imágenes satelitales. En un tercer paso, se realizó un diseño a la medida de acuerdo con las características geográficas del territorio mexicano y se desarrollaron los procedimientos técnicos y operativos para capturar fotografías aéreas desde aeronaves de ala fija y ala móvil. Por último, se determinaron un conjunto de criterios estandarizados para interpretar las imágenes y fotos aéreas, lo cual incluye un flujo de trabajo de control de calidad y evaluaciones externas permanentes de la precisión, en cooperación con los expertos en estadística y sensores remotos de UNODC y dos universidades (una de México y una de Austria).

La metodología del estudio se basó en el análisis de las imágenes satelitales y las fotografías aéreas tomadas en áreas de 10 por 10 kilómetros (100 km²), cada una fue seleccionada mediante la toma de muestras (segmentos). La muestra seleccionada es de 368 segmentos por cada periodo potencial de siembra y se obtuvo mediante el uso de dos diferentes marcos muestrales. El primer marco se basó en los datos históricos de destrucción de cultivos ilícitos y el segundo en los factores biofísicos y socioeconómicos que fueron correlacionados con las áreas tradicionales de siembra de cultivos ilícitos. Este análisis estadístico puso en evidencia la correlación entre la producción de cultivos ilícitos y las condiciones socioeconómicas en las áreas de siembra de enervantes.

Las imágenes satelitales tienen una alta resolución espacial (VHR) de 1.5 a 0.50 metros por píxel. Adicionalmente, las fotografías aéreas fueron tomadas mediante sobrevuelos con una mejor resolución espacial hasta de 25 centímetros por píxel. Las imágenes satelitales se adquirieron durante los tres periodos potenciales de “siembra-cosecha”: 1) de julio a octubre de 2014; 2) de noviembre de 2014 a febrero de 2015; y 3) de marzo a junio de 2015. El periodo de la siembra a la cosecha dura por lo menos 4 meses, es por ello que cualquier cultivo de amapola crecido dentro de los segmentos durante el periodo de julio de 2014 a junio de 2015 debió haber sido observado en los segmentos de la muestra anteriormente mencionada.

Las imágenes aéreas y satelitales fueron analizadas a través de técnicas de interpretación visual y con una verificación sistemática cruzada de las interpretaciones. Debido a la diferencia entre las resoluciones espaciales de las imágenes satelitales y aéreas, algunos cultivos no pudieron ser detectados en las imágenes de menor resolución, pero pudieron ser detectados en imágenes de mayor resolución, especialmente en el caso de imágenes satelitales cubiertas con nubes, sombras o falta de cobertura de la imagen. Estas diferencias fueron corregidas mediante la aplicación de un factor de corrección.

De acuerdo con el estudio de cultivos ilícitos de amapola en México, entre julio de 2014 y junio de 2015, la estimación de áreas de cultivo de amapola arrojó el siguiente resultado:

- Valor alto 30,400 hectáreas.
- Valor medio más preciso de 26,100 hectáreas.
- Valor bajo 21,800 hectáreas.

Los resultados anteriores corresponden a un intervalo de confianza del 95%. Los cultivos de amapola observados se localizaron principalmente en la Sierra Madre Occidental, sobre los estados de Sinaloa, Chihuahua, Durango y Nayarit; así como, en la Sierra Madre del Sur en los estados de Guerrero y Oaxaca.

El área estimada de extensión de amapola representa el área encontrada únicamente en las imágenes satelitales/fotos aéreas y no es corregida respecto al historial de la destrucción de dicho enervante que pudo estar sembrado después de la adquisición de las imágenes. El gobierno de México reporta que para el periodo de estudio antes mencionado (julio 2014-junio 2015), se destruyeron un total de 24 729 hectáreas de cultivos de amapola.

Se está llevando a cabo el próximo ciclo de monitoreo de cultivos de amapola de julio del 2015 a junio del 2016. El monitoreo regular permitirá monitorear tendencias y dará un panorama de los cultivos de amapola en tiempo y espacio. Adicionalmente, se agregaron dos nuevas metas al proyecto de monitoreo: 1) la obtención de una estimación de rendimiento para la producción de goma de opio (kg/ha) y 2) la determinación del contenido de morfina de la goma de opio mexicano, a través de análisis químico.

El estudio incluía también el monitoreo de cultivos de marihuana, pero los resultados del estudio aún no han sido terminados, ya que se continúa trabajando en el monitoreo y análisis de este cultivo para llegar a una estimación técnicamente confiable. La marihuana se cultiva a una escala más reducida que la amapola, en lugares más urbanizados como huertos, patios y pequeñas parcelas de tierras o invernaderos. Además, el cultivo a veces es mezclado con otros cultivos (lícitos), lo cual complica su detección con imágenes de sensores remotos.

Con este reporte, el gobierno de México reafirma su interés por avanzar en la recolección de evidencias científicas para explicar las dinámicas del fenómeno multidimensional de las drogas. El proyecto de estudio es un elemento de la implementación de políticas públicas integrales que toman en cuenta las causas y consecuencias socioeconómicas, en congruencia con las metas y el compromiso del gobierno de México, resultado de la Sesión Extraordinaria de la Asamblea General de las Naciones Unidas sobre el problema mundial de la droga, que tuvo lugar en Nueva York del 19 al 21 de abril de 2016 (UNGASS 2016).

2. INTRODUCCIÓN

El fenómeno de cultivos ilícitos en México es complejo, por lo que debe analizarse desde un enfoque integral que permita la comprensión de los múltiples factores económicos, geográficos y sociales. Requiere de esfuerzos adicionales por parte de las instituciones encargadas no sólo del control y reducción del área cultivada de amapola y marihuana, sino también de las que se enfocan a mejorar las condiciones socio-económicas y ambientales de estos sitios afectados. Y en esa medida, adoptar políticas públicas que permitan implementar programas de desarrollo alternativo y actividades lícitas viables que apoyen a estas sociedades afectadas, principalmente, en los espacios rurales, garantizando la sustentabilidad de sus comunidades y la reducción en la siembra de enervantes.

La comunidad internacional requiere trabajar de manera integral y coordinada, bajo un esquema de cooperación que contrarreste los daños causados en la operación de las economías transnacionales por el tráfico de drogas ilícitas, así como sus efectos a nivel nacional, regional y global, con el fin de generar políticas públicas efectivas en el combate de esta problemática que propicien la disminución de la oferta y la demanda de drogas.

La UNODC tiene el mandato de apoyar a los gobiernos para enfrentar los aspectos relativos al problema mundial de las drogas, la delincuencia organizada, la corrupción y la prevención del terrorismo. Este trabajo se alimenta por las diversas aspiraciones y mandatos encaminados a una mejoría en la satisfacción de las necesidades compartidas por los Estados Miembros de las Naciones Unidas.

El sustento del presente estudio de monitoreo de cultivos de amapola para México, se encuentra previsto en el “Marco Jurídico Internacional sobre la Fiscalización de Drogas”, compuesto por tres importantes tratados internacionales en materia de fiscalización de drogas, los cuales se complementan mutuamente y proporcionan la base legal necesaria que guía las acciones para combatir a los delitos relacionados con las drogas.

Al mismo tiempo, estos tratados codifican medidas internacionales para asegurar la disponibilidad de estupefacientes y sustancias psicotrópicas con fines médicos y científicos, y prevenir el desvío de dichas sustancias para fines ilícitos. También incluyen disposiciones generales en materia de tráfico ilícito y abuso de drogas. Los multicitados instrumentos consisten en:

1. Convención Única sobre Estupefacientes 1961.
2. Convenio sobre Sustancias Sicotrópicas 1971.
3. Convención de las Naciones Unidas contra el Tráfico Ilícito de Estupefacientes y Sustancias Sicotrópicas 1988.

Desde 1999, la UNODC a través del Programa de Monitoreo de Cultivos Ilícitos (ICMP, por sus siglas en inglés), con sede en Viena, Austria, establece metodologías para la recolección y análisis de datos con el objeto de incrementar la capacidad de los gobiernos para monitorear cultivos ilícitos en sus territorios y asistir a la comunidad internacional en el monitoreo de la extensión y evolución.

El ICMP actualmente cubre siete países: Colombia, Bolivia y Perú para plantaciones de hoja de coca; así como, Afganistán, Laos y Myanmar para amapola. En el año 2012 se lanzó el Programa de Monitoreo de Cultivos Ilícitos de Amapola en México denominado: Proyecto MEXK54 “Sistema de Monitoreo de Cultivos Ilícitos en el Territorio Mexicano”. Este se estableció bajo la colaboración de la UNODC y el gobierno mexicano, a través de sus instituciones federales: Secretaría de Relaciones Exteriores (SRE), Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA), Secretaría de Marina (SEMAR) y Procuraduría General de la República, a través de la Agencia de Investigación Criminal y el Centro Nacional de Planeación, Análisis e Información para el Combate a la Delincuencia (PGR/AIC-CENAPI).

De esta forma, el gobierno mexicano incursiona en la práctica del monitoreo de cultivos ilícitos con insumos tecnológicos y capacidades propias con las que venía trabajando desde varios años antes. Hecho que resalta el uso de su infraestructura ya disponible; es por ello que, busca el intercambio de experiencias a nivel internacional y en últimas fortalecer el Programa Nacional de Estimación de Superficie, expandirlo y hacerlo más eficiente.

El objetivo general del proyecto es el “fortalecimiento de las capacidades técnicas del gobierno de México en la detección de los cultivos ilícitos con alta precisión, lo cual permitirá desarrollar políticas públicas integrales encaminadas a combatir la oferta y la demanda de drogas”. Destacando como, meta principal para este primer estudio, la “Obtención de la estimación de superficie (ha) sembrada con cultivos de amapola anualmente (12 meses)”.

Para la implementación de esta iniciativa en México, se requirió de la asistencia técnica y teórica de expertos en la materia, que permitieran mejorar la metodología, interpretación y análisis de los datos a través de sensores remotos, con el fin de obtener resultados para la elaboración de estadísticas confiables en relación a la estimación de superficie cultivada de amapola y marihuana sobre las áreas de interés, la cual representa la totalidad del territorio nacional.

Los primeros trabajos del proyecto se realizaron a partir del segundo semestre del 2012 y hasta el primer semestre del 2014, en el marco de la conocida como “fase piloto”, por medio de la cual se desarrollaron varias partes de la metodología aplicada en el proyecto, entre las cuales destacan:

- Diferentes diseños espaciales para el monitoreo.
- Análisis de las áreas potenciales o de riesgo para la siembra de cultivos ilícitos.
- Estandarización de los criterios utilizados para las diversas interpretaciones entre analistas y el control de calidad de las mismas.
- Sincronización y programación de la colecta de imágenes satelitales y fotografías aéreas con presencia de cultivos, de acuerdo a sus calendarios agrícolas.
- Diseño y operación para la toma de fotografías aéreas con un sistema personalizado para aeronaves de ala fija (avión) y móvil (helicóptero).
- Análisis estadístico de la estimación de superficie sembrada y la necesidad de incorporar factores de corrección, si fuera necesario, a la estimación estadística final.

El informe describe en detalle los insumos, métodos y procesos usados para llegar a tener una estimación de los cultivos ilícitos de amapola. Los capítulos 3 y 4 describen los antecedentes, instituciones y personal involucrados en el proyecto. El capítulo 5 presenta en una manera breve la metodología con las etapas seguidas para llegar al resultado, que son presentados en el capítulo 6. Finalmente, en el capítulo 7 se describen todos los detalles de la metodología aplicada al monitoreo.

3. ANTECEDENTES

Las principales zonas en las cuales se concentra la siembra de cultivos ilícitos en México, coinciden en la convergencia de los estados de Sinaloa, Chihuahua y Durango. Es decir, la denominada área del “Triángulo Dorado”, específicamente, en la parte de la Sierra Madre Occidental de estos estados. Asimismo, destaca el estado de Guerrero en la parte de la Sierra Madre del Sur. Adicionalmente, con una dinámica variable y tendencias más bajas de siembra se presentan en estados como: Nayarit, Jalisco, Michoacán y Oaxaca.

Dentro de los esfuerzos y estrategias que ha venido realizando el Gobierno de México, se puede señalar que en 2006, por decisión presidencial, se instruyó la transferencia de las labores de destrucción de la PGR a las Fuerzas Armadas, tal y como lo señalan los Programas Sectoriales 2013-2018 de la Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA) y de la Secretaría de Marina (SEMAR). A dichas instituciones se les ha facultado para realizar acciones de erradicación y prevención de la producción de enervantes, en el caso de la SEDENA a través de la implementación de operaciones de erradicación intensiva en las áreas de mayor cultivo de enervantes y operaciones de intercepción para inhibir el tráfico de todo tipo de drogas.

En el sentido apuntado, el Gobierno de México se está enfrentando a esta creciente tendencia y ha identificado la necesidad de desarrollar nuevas estrategias y herramientas tecnológicas que logren armonizar a las políticas globales con las locales.

El Gobierno de México mediante acciones de inteligencia, la SEDENA y SEMAR han potenciado sus capacidades en la detección de cultivos ilícitos a través de imágenes satelitales, y así monitorear el impacto de las estrategias para reducir cultivos ilícitos. En tanto que la Secretaría de Relaciones Exteriores (SRE) y en particular, la Procuraduría General de la República (PGR), intensificaron las acciones en materia de cooperación internacional, en las áreas de reducción de la oferta, medidas de control y el combate a los delitos conexos a través de Agencia de Investigación Criminal, órgano que se encarga de recopilar y analizar información estadística a través del Centro Nacional de Planeación, Análisis e Información para el Combate a la Delincuencia (CENAPI).

El gobierno de México ha planteado la necesidad de estudiar el fenómeno de los cultivos ilícitos desde una perspectiva amplia, que permita entender el tamaño de la problemática de los cultivos de amapola y marihuana en México, buscando el acercamiento con algún organismo internacional para la conformación de una metodología sustentada en estándares internacionales para el monitoreo y estimaciones de superficie sembrada de cultivos ilícitos.

Cabe destacar que México actualmente adoptó, como consta en el “Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018”, estrategias enfocadas a impulsar la creación de instancias de coordinación interinstitucional para: la generación de estudios, investigaciones y proyectos; promover esquemas de cooperación nacional e internacional; fortalecer las actividades militares en los ámbitos terrestre, aéreo y marítimo en el territorio y zonas marinas; así como, reforzar los Sistemas de Inteligencia Militar y Naval, para integrarlos con diversas dependencias de la Administración Pública Federal con infraestructura, y mayores medios tecnológicos.

Por lo anterior, el gobierno federal de México, previo a la implementación del Proyecto MEXK54 “Sistema de Monitoreo de Cultivos Ilícitos en el Territorio Mexicano”, había realizado esfuerzos y estudios sobre la problemática de los cultivos ilícitos a lo largo del país. Los cuales abarcaban desde: la destrucción de enervantes, el monitoreo de cultivos, pruebas en la obtención de rendimientos y el análisis de fenología de los cultivos, hasta proyectos de desarrollo alternativo, concentrándose en la reconversión de la siembra ilícita en áreas de alta incidencia.

I. TRABAJOS PARA LA DESTRUCCIÓN DE CULTIVOS ILÍCITOS:

- En México, durante la década de los años 50, se observó un incremento en la siembra, el cultivo y el tráfico de enervantes, situación que obligó al Gobierno de la República a establecer medidas tendientes a nulificar dicha ilícita actividad. Para lo cual, se pusieron en ejecución varios planes como los denominados “Plan CANADOR”, “Operación CÓNDOR”, “Fuerza de Tarea MARTE”, entre otros. Los cuales empleaban gran parte de sus recursos humanos y materiales para combatir este acto ilícito con el apoyo de las fuerzas armadas, ya que aquellas actividades eran consideradas una amenaza emergente para la seguridad nacional.
- Como parte de la Estrategia de Atención para la Destrucción de Enervantes en México, se consideró el desarrollo de investigaciones técnico-científicas en cultivos ilícitos que permitieran establecer una metodología propia y adecuada a las condiciones físico-ambientales, socio-económicas y culturales que prevalecían en la mayor parte de las regiones productoras para la estimación de la producción de enervantes en México, así como de la superficie potencialmente cultivable sobre el territorio nacional.
- Para el año 2004 se creó el Grupo Bilateral de Análisis e Intercambio de Información sobre Intercepción (GBAII), con la finalidad de fortalecer los mecanismos de cooperación bilateral en el ámbito de la intercepción de drogas, conforme a las legislaciones nacionales aplicables en cada país. La Procuraduría encabezó los trabajos de la delegación mexicana, a través del Centro Nacional de Planeación, Análisis e Información para el Combate a la Delincuencia (CENAPI) y los trabajos de la delegación estadounidense fueron encabezados por el Director Ejecutivo de la Coordinación para Intercepción (USIC, por sus siglas en inglés).

II. MONITOREO DE CULTIVOS ILÍCITOS:

- Desde 1974 se llevó a cabo un programa inicial de identificación de cultivos ilícitos a través de un sistema avanzado de fotografía aérea, el cual permitió ubicar los plantíos de manera precisa. Asimismo, siguiendo los esfuerzos por parte del gobierno de México, en 1983 destacó el hecho que entre las estrategias implementadas para obtener una mejor vigilancia de las zonas productoras de estupefacientes, se dividió al territorio nacional en bases operativas, con la finalidad de realizar actividades como: operaciones aéreas de reconocimiento, destrucción y verificación de los plantíos ilícitos, con planes y operaciones especiales, en los periodos conformados por la información histórica de alta incidencia en siembra y cosecha de estupefacientes; así como las operaciones de investigación policíaca, entre otras.
- Los primeros trabajos desarrollados por el gobierno de México a través de sus instituciones encargadas de la seguridad nacional (SEMAR-SEDENA) con una visión vanguardista consistente en el uso de las nuevas tecnologías para la detección de cultivos ilícitos en su territorio, se iniciaron en el año 2003 con la operación de la “Estación de Recepción México de la Constelación SPOT” (ERMEXS) que permitiera la obtención de imágenes satelitales de 20, 10 y 2.5 metros de resolución espacial. Dicha estación se localizaba y era operada en instalaciones de la SEMAR.
- Para el periodo comprendido de 2004 a 2006, la SEMAR desarrolló los primeros trabajos para obtener una metodología para la detección de cultivos ilícitos de amapola y marihuana en el país usando la tecnología de la constelación SPOT, lo que sirvió de antecedente para que en 2008 se creara un grupo de colaboración interinstitucional SEMAR-SEDENA conformado por analistas de ambas instituciones, para trabajar en la detección y destrucción de cultivos ilícitos.

- En 2009, el gobierno mexicano, a través de las dependencias SEMAR-SEDENA, tuvo un acercamiento con dependencias del gobierno de Estados Unidos de América, logrando concretar apoyos importantes en especie como la programación y entrega de imágenes satelitales de alta resolución obtenidas de los sensores Ikonos, Quick Bird y World View 2, con resoluciones espaciales entre 1.0 hasta 0.50 metros.
- El 1 de marzo del 2010, el Servicio de Información, Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), dependiente de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) y la SEDENA suscribieron un convenio de colaboración con el objeto de implementar el proyecto de extracción de imágenes de satélite “SPOT” de la ERMEXS, como apoyo a los proyectos que sobre el particular implementaba la SEDENA; posteriormente y con el propósito de dar continuación al proyecto de la estación ERMEXS, el 9 de marzo del 2012, dichas instituciones firmaron un nuevo convenio para operar de manera conjunta la Estación de Recepción México Nueva Generación” (ERMEX ng), destinada a la obtención y empleo imágenes satelitales de alta resolución (SPOT 6 y SPOT 7) hasta el año 2023.
- La SEMAR en el 2011 adquirió una nueva tecnología en la obtención de imágenes satelitales VHR, incrementado nuevas capacidades en el análisis y observación remota sobre el territorio mexicano, logrando, con la empresa GEOEYE de los Estados Unidos de América, la instalación de la Estación Virtual de Imágenes Satelitales de Muy Alta Resolución (EVISMAR). Al recibir este tipo de imágenes satelitales de hasta 0.45 metros de resolución espacial, se aumentaron las capacidades y precisión en la detección de cultivos ilícitos.

III. PRUEBAS EN LA OBTENCIÓN DE RENDIMIENTO Y ANÁLISIS FENOLÓGICO PARA CULTIVOS ILÍCITOS:

- El gobierno mexicano dentro del periodo de 1999 a 2004, a través de sus instituciones, y en particular la PGR, ya había realizado algunos primeros estudios sobre rendimiento de cultivos ilícitos, características y desarrollo fenológico para el país. Dichos estudios se hicieron en los invernaderos de la Base de Operaciones, Adiestramiento y Capacitación denominada “El Caracol”, en Culiacán, Sinaloa, perteneciente a la extinta Dirección General de Erradicación de Cultivos Ilícitos de la entonces Agencia Federal de Investigación (AFI) adscrita a la PGR y que fue absorbida en junio de 2012 por la Policía Federal Ministerial. Para este periodo, se obtuvieron los parámetros de rendimiento y etapas de crecimiento de los cultivos ilícitos en México, impulsando el desarrollo de proyectos especiales de investigación genética de la amapola y marihuana, lo que a su vez brindó apoyo a las fuerzas federales en sus labores de destrucción en diversos puntos de los estados.
- Para el estudio de “Rendimiento de Goma de Opio en México”, se implementó la metodología utilizada por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) y que posteriormente fue publicada en el 2001 como “Directrices para la Medición del Rendimiento de Amapola de Opio en cortas visitas a campo”, por la propia UNODC. En el año siguiente, el gobierno mexicano para la evaluación del rendimiento, capacitó al personal militar para llevar a cabo la recolección de los datos durante los muestreos en campo. En ese sentido, en los meses de febrero y marzo de 2001, se llevó a cabo el primer muestreo en la zona norte comprendiendo los estados de Chihuahua, Sinaloa, Durango y Nayarit, así como en la zona sur, Michoacán, Guerrero y Oaxaca.

- Las “Características y Desarrollo Fenológico de Cultivos de Amapola”, fue otro de los estudios científicos disponibles a los que tuvo acceso el proyecto de monitoreo en México, lo que le permitió tener una referencia de la fenología de las plantas de los cultivos de amapola. Los trabajos de investigación se realizaron en 2004 y junto con los resultados de laboratorio, se determinó que los cultivos de amapola tienen una duración de 120 días para su óptimo desarrollo fenológico, desde que se siembra hasta su cosecha. El estudio incluye una gráfica con la cantidad de días que representa cada etapa de crecimiento del cultivo.

IV. PROGRAMA DE RECONVERSIÓN A CULTIVOS ILÍCITOS:

- El gobierno mexicano, a través de la Secretaria de Relaciones Exteriores (SRE), la PGR y el gobierno de los estados de Oaxaca, Guerrero y Michoacán, dentro del programa de desarrollo rural para el periodo de 1990 a 1993, implementaron un proyecto denominado: “Desarrollo Rural para Desalentar Cultivos Ilícitos, la experiencia Mexicana en Oaxaca, Guerrero y Michoacán”, con el objetivo de ampliar las oportunidades de empleo y elevar el nivel de ingresos de las comunidades, de tal modo que se lograra desincentivar la siembra de cultivos ilícitos, a través del establecimiento de un programa de proyectos comunitarios de pequeña escala y de carácter productivo, social y de infraestructura en espacios rurales pertenecientes a los estados de Oaxaca, Guerrero y Michoacán; El proyecto no tuvo el suficiente seguimiento, por lo que la medición de sus beneficios fue escasa.

4. INSTITUCIONES Y PERSONAL DEL PROYECTO

Las actividades del proyecto de monitoreo MEXK54 han sido producto de la suma de esfuerzos entre la UNODC y el Gobierno en México, con la convergencia de dependencias federales e instituciones académicas nacionales e internacionales. Sus contribuciones e insumos son responsabilidad de cada parte.

4.1. ORGANIZACIÓN DE LAS INSTITUCIONES INVOLUCRADAS

Estas instituciones son las encargadas de coadyuvar e implementar con la UNODC las diferentes actividades que realiza el Proyecto de monitoreo de cultivos de amapola en México:

- A. La Secretaría de Relaciones Exteriores (SRE), es responsable de la instrumentación de la política exterior determinada por el Ejecutivo Federal, en ese sentido contribuye a fomentar la cooperación internacional para prevenir y atender el problema mundial de las drogas. La SRE da seguimiento al ICMP de la UNODC, que actualmente se instrumenta en México.
- B. La Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA), es la entidad técnica-operativa encargada de realizar los análisis en la detección de cultivos de amapola con apoyo de imágenes satelitales, por su responsabilidad jurisdiccional que ejerce en la mayor parte del territorio mexicano. También es la institución que desempeña el papel preponderante en el esfuerzo nacional para la destrucción de cultivos ilícitos en el país, cuyos resultados son reportados, administrados y sistematizados por la AIC/CENAPI. Además, apoya con la logística al proporcionar aeronaves e imágenes satelitales al proyecto para efectos de poder levantar y validar datos en campo.
- C. La Secretaría de Marina (SEMAR), al igual que la SEDENA, funge como entidad técnica-operativa encargada de realizar tareas de análisis en la detección de cultivos de amapola con apoyo de imágenes satelitales y fotografía aérea. Del mismo modo, coadyuva con el esfuerzo nacional para la destrucción de cultivos ilícitos en México. A la vez, colabora en materia de logística, como lo hace la SEDENA.
- D. La Procuraduría General de la República/Agencia de Investigación Criminal/Centro Nacional de Planeación, Análisis e Información para el Combate a la Delincuencia (PGR/AIC-CENAPI), es la entidad administrativa responsable del proyecto. De igual forma, es la encargada de los sistemas y bases de datos especializados para realizar el análisis y diagnóstico sobre la delincuencia organizada nacional y transnacional en México.
- E. Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC), agencia encargada de la Coordinación del Proyecto y responsable para el desarrollo de su metodología, control de calidad, y transparencia en la presentación de los resultados de conformidad con los estándares internacionales. Cuenta con una Oficina de Enlace y Partenariado en México y su Secretariado Ejecutivo en Viena, Austria.

4.2. INSTITUCIONES EXTERNAS (ACADÉMICAS)

Las instituciones académicas involucradas en el Proyecto son el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y de la Universidad de Recursos Naturales y Ciencias de la Vida "BOKU" (Austria).

Estas instituciones se dedican a la investigación y formación de investigadores, la experiencia que cada una representa ayuda a incrementar las capacidades del proyecto en áreas como: creación de base de datos, generación de cartografía temática; métodos de análisis con sensores remotos; estandarización de control de calidad; desarrollo de tecnologías en SIG para la evaluación de datos geográficos; aplicación de métodos de análisis ambiental regional; y de esquemas de muestreo en campo con levantamiento de fotografía aérea.

Por lo tanto, a través de sus expertos académicos, asesoran y evalúan de manera activa al equipo del proyecto de monitoreo, lo que permite dar el soporte científico que se requiere para obtener datos estadísticos confiables y de alta calidad.

4.3. ORGANIZACIÓN DEL PERSONAL DEL PROYECTO

El proyecto de monitoreo está conformado por personal de UNODC y personal proveído por las instituciones gubernamentales a las que ya se ha hecho referencia. En la oficina de UNODC México, radica la coordinación del proyecto, que consiste de un Coordinador General, un Asistente Técnico de Análisis y Monitoreo, y un Asistente de Programa. En la oficina de UNODC Viena, el proyecto está apoyado por un experto en sensores remotos y SIG, una estadística y un oficial de programas.

La SEDENA, SEMAR y PGR/AIC-CENAPI, quienes son LAS PARTES del gobierno de México en el proyecto, han facilitado personal para integrarse al equipo de monitoreo y apoyar en el procesamiento y corrección digital en imágenes satelitales, así como la obtención de fotografía aérea en campo, el cual es un insumo principal para analizar y validar los cultivos de amapola.

El equipo técnico para la colección y análisis de los datos consisten en diez personas con diferentes perfiles profesionales: tres Geógrafos, dos Biólogos, dos Fotogrametristas, y tres especialistas en Sensores Remotos y SIG. El grupo en general cuenta con la experticia en: uso de cartografía; procesamiento y corrección digital en imágenes satelitales; fotointerpretación a través de sensores remotos; análisis de SIG y uso de tecnologías en campo como: navegadores GPS aéreos y terrestres, cámaras digitales con sensor visible (VIS) e infrarrojo (IRc), geolocalizador satelital, entre otros.

5. BREVE DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA APLICADA EN EL MONITOREO

Este capítulo explica de manera sintética los diferentes elementos del monitoreo, con la finalidad de entender el principio de las estimaciones de superficie sembrada. No obstante que en el capítulo 7 se explican todos los elementos a detalles.

Como parte de los primeros trabajos que se realizaron al interior del proyecto, se consideró una etapa de prueba denominada “fase piloto”, durante la cual se analizó toda la información con la que se contaba, tales como los insumos geográficos, la infraestructura y los medios informáticos, y análisis estadístico de los cultivos históricos de amapola. En ese sentido, se realizó un análisis sobre el desafío que presentan las principales áreas de incidencia de cultivos ilícitos en México, al ser un país con una gran extensión territorial de aproximadamente 2 000 000 Km², con una orografía muy accidentada y áreas de difícil acceso, aunado a la presencia de cultivos ilícitos en pequeñas dimensiones y que son sembrados en pendientes muy inclinadas. Además los cultivos ilícitos en México son sembrados en diferentes épocas del año que varían de la región, condiciones climáticas y otras circunstancias.

Un monitoreo completo del área (censo) con sensores remotos sería una tarea de costos muy elevados y requeriría de una cantidad desproporcionada de recursos humanos y técnicos. Asimismo, en esta “fase piloto” se determinaron las tres principales problemáticas para este tipo de proyectos:

1. Determinación (reducción) de las áreas de estudio.
2. Determinación del método para seleccionar las muestras donde tomar las imágenes satelitales y fotos aéreas.
3. Determinación de la temporalidad y cantidad de siembras-cosechas al año.

5.1. DETERMINACIÓN DE LAS ÁREAS DE ESTUDIO: DOS MARCOS DE MUESTREO

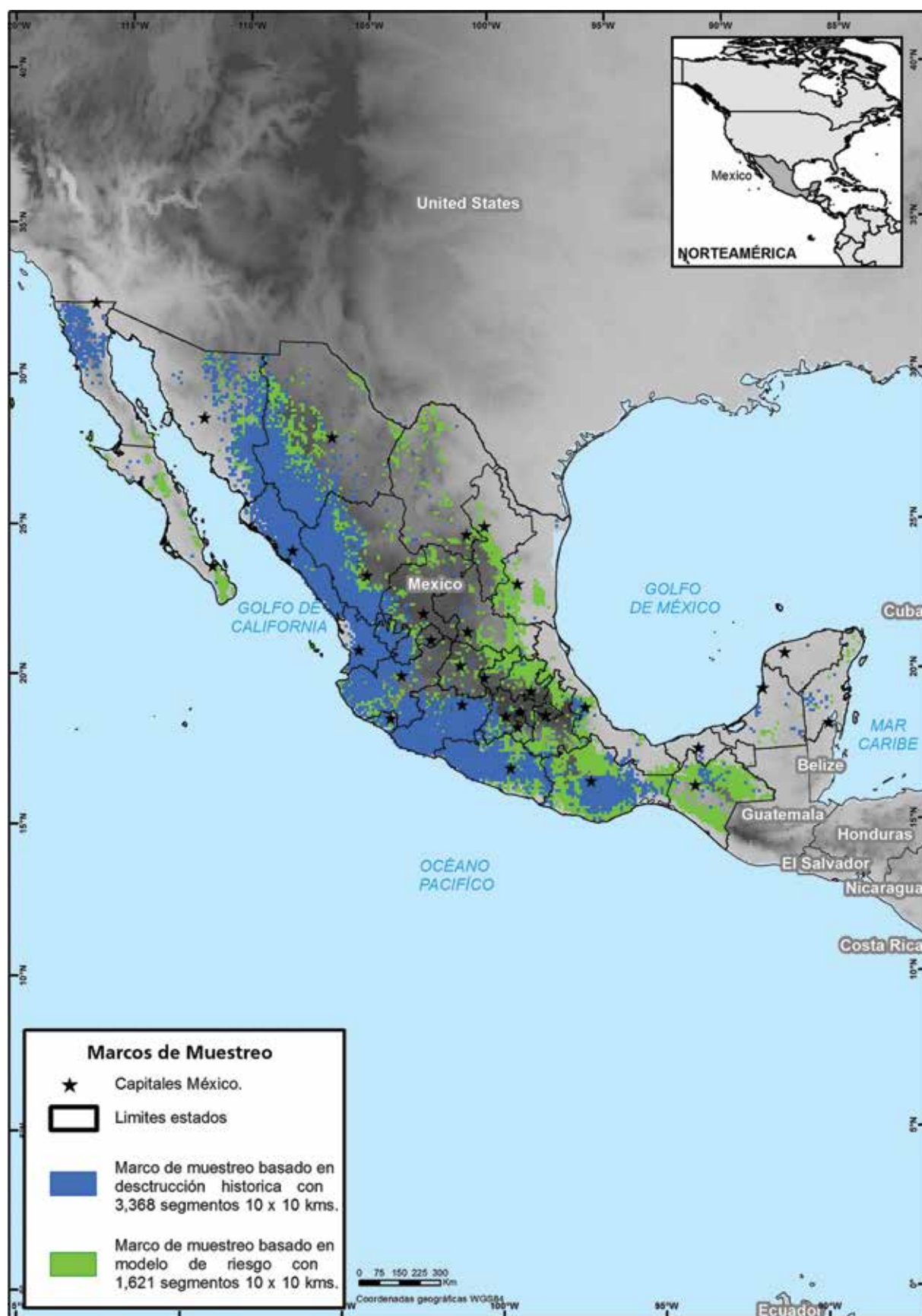
México tiene una dimensión, características geográficas, económicas y sociales, que hace más complejo el entorno en el que se presenta la siembra y cosecha de cultivos de amapola y marihuana. Este fenómeno se presenta en algunas regiones del país que cuentan con las condiciones fisiográficas propicias para el óptimo desarrollo fenológico de las plantas, tales como; altitudes y climas que favorecen el crecimiento de los cultivos; por otro lado, la disponibilidad de cuerpos de agua que resultan favorables para su siembra; y finalmente, una orografía accidentada que dificulta el acceso a aquellas zonas y que es aprovechada como técnica de ocultamiento.

La mejor referencia inicial para la existencia y ubicación de los cultivos ilícitos en el país son los datos históricos de su destrucción. Estos datos fueron usados en dos maneras; primero se usó una serie histórica de los datos geográficos de destrucción que sirvieron para indicar con claridad las zonas con alta incidencia de cultivos ilícitos. En un segundo momento, se usó la base histórica aplicando un modelo estadístico articulado por medio de un set de criterios biofísicos y socioeconómicos que pudieran tener una correlación con la incidencia de cultivos destruidos.

La aplicación del modelo resultó en un mapa de riesgo, indicando las áreas que presentan similitudes con las áreas donde se encontraron cultivos ilícitos en el pasado (Anexo I).¹ El mapa de riesgo permitió la identificación de un área más grande, que el primer marco de muestreo, que fue solamente basado en los datos de destrucción las áreas adicionales, fueron añadidas al área de estudio inicial. Entonces, se obtuvieron dos áreas de estudio, a los cuales se les llama: “marco de muestreo de destrucción y marco de muestro adicional de riesgo” como se muestra en el mapa 1.

¹ Anexo I. Estudio sobre el análisis estadístico de probabilidades para cultivos ilícitos por factores determinantes (riesgo), en este análisis se obtuvieron categorías de probabilidad de riesgo desde muy alta, alta, mediana, baja, muy baja; asimismo, estas áreas fueron comparadas con las áreas de incidencia de cultivos históricos.

Mapa 1. Área de estudio conformada por dos marcos de muestreo para el monitoreo



Fuente: Sistema de Monitoreo de Cultivos Ilícitos en el Territorio Mexicano-apoyado por UNODC.
Los límites y los nombres utilizados en este mapa no implican la aceptación oficial por parte de la Naciones Unidas.

5.2. METODOLOGÍA BASADA EN LA TOMA DE MUESTRAS

La estimación del área de amapola está basada en la identificación de cultivos de amapola en imágenes satelitales y fotos aéreas que tienen mucho detalle (muy alta resolución) y que permiten observar los pequeños cultivos ilícitos (foto 1). A pesar de una reducción del área de estudio escrito en el anterior párrafo, no sería viable analizar toda el área con este tipo de imágenes. Por lo tanto, se optó por un set de muestras donde se programó la colecta de las imágenes satelitales y fotos aéreas (mapa 2).

En este caso se eligieron 300 muestras en el marco de muestreo de destrucción histórica y 68 muestras en el área adicional con el marco de muestro de factores determinantes para cultivos ilícitos (riesgo) como se muestra en el mapa 3. El total de las muestras fueron seleccionadas en una manera estadísticamente representativa para todo el país optimizando la distribución geográfica.

Ambos marcos de muestreo se conformaron dentro de una rejilla nacional (grilla) con cuadrículas geográficas ("segmentos") de 10 por 10 kilómetros que se sobrepuso en las áreas de estudio con los datos de destrucción histórica y los datos de probabilidades por factores determinantes para cultivos ilícitos (riesgo).

Foto 1. Cultivos de amapola en imágenes satelitales de muy alta resolución (VHR)

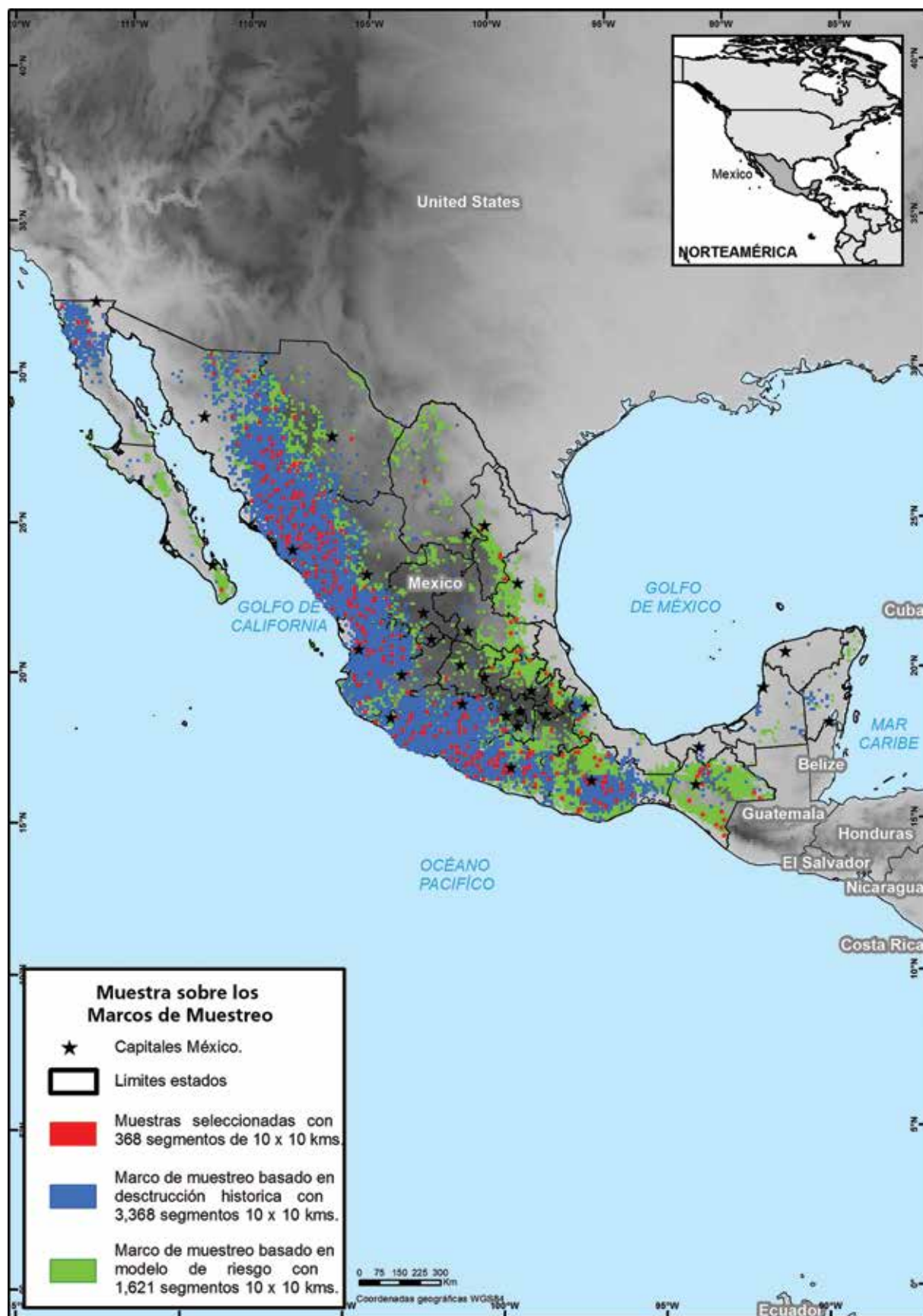


Imagen Wordl View-2 (0.50 metros)



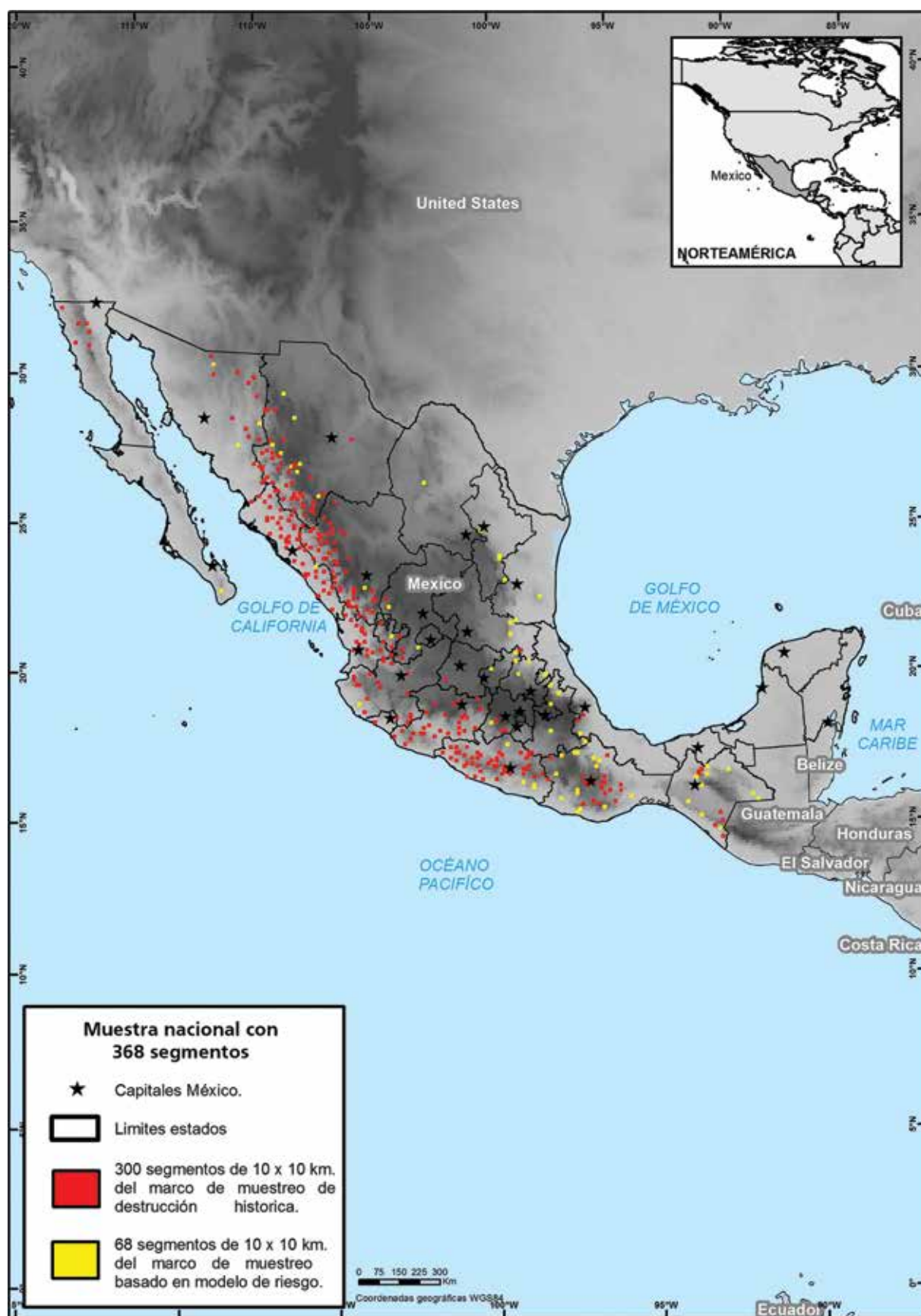
Foto Aérea (0.25 metros)

Mapa 2. Marcos de muestreo conformado por la rejilla nacional (grilla) de 10 x 10 kilómetros y los segmentos elegidos como muestras para colectar imágenes satelitales/fotos aéreas



Fuente: Sistema de Monitoreo de Cultivos Ilícitos en el Territorio Mexicano-apoyado por UNODC.
Los límites y los nombres utilizados en este mapa no implican la aceptación oficial por parte de la Naciones Unidas.

Mapa 3. Distribución de la muestra (368 segmentos) para la programación de imágenes satelitales de periodo de estudio julio 2014-junio 2015



Fuente: Sistema de Monitoreo de Cultivos Ilícitos en el Territorio Mexicano-apoyado por UNODC.
Los límites y los nombres utilizados en este mapa no implican la aceptación oficial por parte de la Naciones Unidas.

5.3. MUESTRAS COLECTADAS TRES VECES DURANTE EL AÑO PARA LA IDENTIFICACIÓN DE CULTIVOS DE AMAPOLA

Las imágenes satelitales y fotos aéreas fueron colectadas como mínimo tres veces dentro de cada periodo cuatrimestral para el año de monitoreo de julio 2014 a junio 2015 (tabla 1). Esto garantizó que todos los cultivos ilícitos sembrados en algún momento del año fueran observados en las imágenes satelitales y/o fotos aéreas, tomando en cuenta que el ciclo de crecimiento para las plantas de amapola es aproximadamente de 4 meses.

Tabla 1. Los tres periodos de colecta para las imágenes satelitales/fotografía aérea

Áreas de colecta	Periodos		
	Julio-octubre 2014	Noviembre 2014-febrero 2015	Marzo-junio 2015
Muestra total en el territorio nacional	368 segmentos de 10 x 10 Km	368 segmentos de 10 x 10 Km	368 segmentos de 10 x 10 Km

5.4. SENSORES UTILIZADOS PARA LA COLECTA DE IMÁGENES SATELITALES Y FOTOGRAFÍA AÉREA

El uso de imágenes de sensores remotos es basado en imágenes satelitales de diferentes sensores (SPOT-6 y 7, Ikonos, Quick Bird, Geo Eye-1, World View-2 y 3) en combinación con fotos aéreas. Durante el año de monitoreo, se tomaron por lo menos 3 imágenes para cada segmento. El tamaño pequeño de las parcelas requiere el uso de imágenes con muy alta resolución de 0.4-0.7 metros por pixel para determinar y diferenciar los cultivos y medir su superficie con precisión el tamaño de las parcelas..

En adición, en cada ciclo hubo campañas de trabajo de campo para colectar fotos aéreas con una resolución de alrededor de 0.25 metros (foto 2) que complementaron las áreas donde las imágenes satelitales no tenían datos, debido por ejemplo a la densidad de nubes que no permitió a los satélites ver el terreno (foto 3). Las fotos aéreas son un insumo importante, ya que validan las detecciones de los cultivos existentes dentro de los segmentos de la muestra. Para el análisis en gabinete (oficina) se hizo preferencia a las muestras que en el caso tuvieran imágenes satelitales y fotos aéreas para la misma área. La diferencia en detalle ha sido importante y las posibles diferencias en la interpretación se han tomado en cuenta en la estimación final del área aplicando un factor de corrección..

Foto 2. Cultivos de amapola en imagen satelital de alta resolución y foto aérea



Imagen WordView-2 (0.50 metros)



Fotografía aérea (0.25 metros)

Foto 3. Imagen satelital con nubosidad y fotografía aérea de la misma área

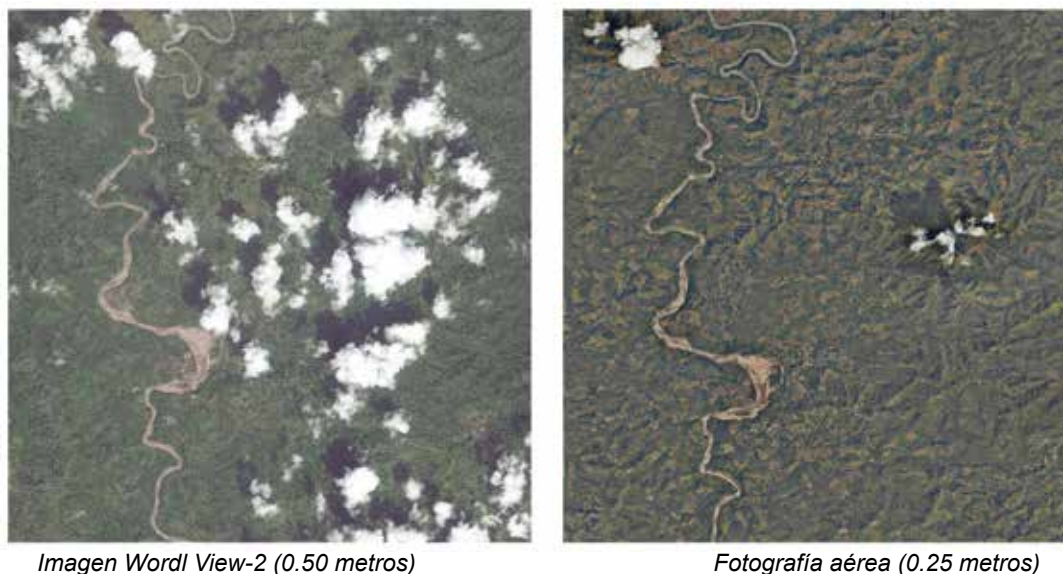


Imagen WordView-2 (0.50 metros)

Fotografía aérea (0.25 metros)

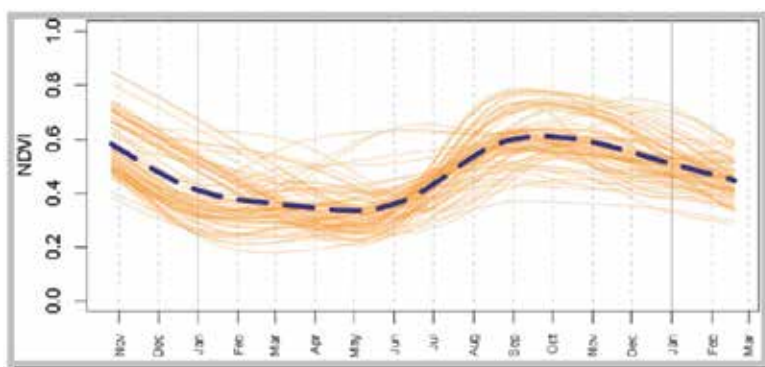
5.5. DETERMINACIÓN DE FECHAS ÓPTIMAS PARA LA COLECTA DE IMÁGENES SATELITALES

Para cada periodo cuatrimestral se programó la colecta de datos de las imágenes alrededor de las fechas óptimas para observar las parcelas con cultivos, que son los momentos que un cultivo está más desarrollado y refleja más luz verde e infrarrojo en las imágenes (Mattiuzzi et al., 2014). La fecha óptima varía por segmento dependiendo de la posición geográfica, la topografía, el clima local y la disponibilidad de agua para su riego. Los estudios piloto que se realizaron en 2012 y 2013 permitieron optimizar las fechas óptimas usando las parcelas encontradas e investigando su fenología (desarrollo vegetativo) de los cultivos encontrados a través de un análisis extensivo de series temporales de imágenes satelitales Landsat² de mediana resolución (gráfica 1).

Inicialmente se aplicaron los siguientes ciclos de programación para la colecta de imágenes satelitales y fotografía aérea en las áreas de estudio, con fechas precisas adaptadas con el estudio de fenología para los tres periodos cuatrimestrales:

1. julio/octubre 2014
2. noviembre 2014/febrero 2015
3. marzo/junio 2015

Gráfica 1. Ejemplo de ciclos fenológicos identificados con series temporales de imágenes satelitales



² Estudio sobre el análisis de fechas para determinar calendarios agrícolas, utilizando series temporales de imágenes satelitales utilizando índices de vegetación (NDVI), con este estudio se estableció un primer calendario agrícola para cultivos de amapola y se utilizó para programar la colecta de imágenes de satélite y fotografía aérea en campo en su fase fenológica de alta producción.

5.6. INTERPRETACIÓN DE LAS IMÁGENES SATELITALES

Posterior a la colección de imágenes satelitales y fotos aéreas, se continuaron los trabajos intensivos de interpretación de las imágenes satelitales en gabinete (oficina). El equipo de analistas interpretó sistemáticamente todas las imágenes y las fotos aéreas disponibles mediante la fotointerpretación visual, digitalizando (polígonos) los cultivos detectados mediante el uso de herramientas SIG, el proceso indica que los criterios pre-establecidos en la metodología (árbol de decisión, claves de interpretación y escalas de visualización predefinidas); en seguida, se tiene establecido un análisis que disminuye la subjetividad en la fotointerpretación de los cultivos de amapola, basado en un flujo de verificación robusto (véase capítulo 7.10.1), que consiste en un intercambio de las imágenes entre analistas, quienes realizan una nueva revisión, y al final del análisis se incluye una revisión final de los cultivos detectados por los supervisores del grupo.

De manera adicional, al concluir el análisis antes descrito, el grupo de analistas realizó una última revisión visual en pantalla (PC/TV), como un control de calidad independiente, donde se discute de manera grupal sobre las interpretaciones integradas a la revisión final (foto 4), esto permitió la retroalimentación grupal sobre dudas surgidas y continuar mejorando en la estandarización de los criterios que son utilizados para la fotointerpretación de los cultivos de amapola existentes.

Foto 4. Equipo de analistas interpretando las imágenes satelitales en pantalla



5.7. CÁLCULO ESTADÍSTICO PARA DETERMINAR EL ÁREA CON CULTIVOS ILÍCITOS

Después de digitalizar los cultivos (polígonos), se calcularon las superficies (ha) para cada cultivo y se sumaron las superficies de todos los cultivos dentro de cada segmento de 10 x 10 Km de la muestra elegida (foto 5). La suma de todos los segmentos muestreados fue extrapolada al marco de muestreo inicial, siguiendo las reglas estadísticas correspondientes al método de tomar muestras. Sin embargo, las extrapolaciones se hicieron de manera separada para los dos marcos de muestreo, porque las muestras fueron tomadas de manera independiente. La suma de las superficies encontradas por periodo cuatrimestral y por marco de muestreo es el resultado de la cifra estadística nacional de amapola.³

El límite inferior (punto bajo) y superior (punto alto) fueron calculados siguiendo las reglas y estándares para estimadores de ratios combinados (combined ratio estimators). Se debe tomar en cuenta que las cifras de estimaciones de área solo representan una estimación del área dentro de los marcos de muestreos establecidos para el monitoreo.

Foto 5. Digitalización de polígonos y superficie (ha) en imagen satelital Geo Eye-1 (VHR)



³ Cabe mencionar que pueden existir correcciones adicionales al primer resultado, como fue el caso de este primer estudio, en donde se realizó una corrección por diferente tipo de resolución. Por ejemplo, en los cultivos que no han sido detectados en las imágenes satelitales disponibles, se aplican los factores de corrección mencionados con anterioridad, tomando como referencia los resultados obtenidos en las fotografías digitales aéreas colectadas en campo.

6. RESULTADOS DE LA ESTIMACIÓN DE ÁREA CON CULTIVOS DE AMAPOLA

Con la integración de las mediciones de cultivos individuales de amapola, se obtuvo una estimación total a nivel nacional. Con base en el modelo estadístico aplicado, fue posible estimar la superficie nacional a partir de las interpretaciones y mediciones realizadas por medio de las imágenes satelitales y fotografías aéreas, las cuales fueron previamente programadas para los 368 segmentos de la muestra utilizada en ambos marcos de muestreo y que a su vez fueron utilizados para todo el periodo; como se muestra en el mapa 3: 1) 300 segmentos de los datos de destrucción histórica y, 2) 68 segmentos del análisis de factores determinantes para cultivos ilícitos/riesgo.

6.1. ÁREA ESTIMADA CON CULTIVOS DE AMAPOLA

La estimación de superficie nacional sembrada con cultivos de amapola en 12 meses para el periodo de monitoreo julio 2014 a junio 2015 se estimó en su punto medio con 26,100 hectáreas, con un intervalo de confianza (95%), con un rango⁴ estadístico de 21,800 a 30,400 hectáreas (tabla 2). Esto es el resultado de una suma de tres estimaciones en este periodo tomando en cuenta que los cultivos de amapola pueden crecer en diferentes momentos durante el año, adicionalmente se presenta en el mapa 4 la cantidad de hectáreas encontradas en cada segmento del monitoreo..

Tabla 2. Área estimada con cultivos de amapola (ha) para 12 meses de monitoreo en 2014-2015

Periodo del resultado	Área (ha) (punto bajo)	Área (ha) (punto medio)	Área (ha) (punto alto)
julio 2014-junio 2015	21,800	26,100	30,400

Por ser el primer resultado a nivel nacional con esta metodología, no se puede indicar alguna tendencia sobre el desarrollo de los cultivos de amapola. En este momento se están procesando y analizando los datos para el periodo de julio 2015-junio 2016, que permitirán interpretar alguna tendencia y las dinámicas geográficas sobre la amapola. Sin embargo, de acuerdo a la muestra utilizada se encontraron cultivos de amapola principalmente en 9 estados: Sinaloa, Chihuahua, Durango, Nayarit, Jalisco, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas.

En otros estados no se detectaron cultivos de amapola en este periodo de estudio, pero no necesariamente significa que estén libres de amapola, sino que por la baja densidad de muestras elegidas para algunos Estados, el área potencial es reducida y puede ser que algunas áreas pequeñas o núcleos con cultivos no fueron observados, pero esto no permite asegurar que dichos Estados estén libres de este cultivo.⁵

El resultado no toma en cuenta si los campos de amapola podrían haber sido destruidos después de las observaciones (detección) y, por lo tanto, las estimaciones solamente indican el nivel de los cultivos en el momento de la toma de las imágenes satelitales y fotos aéreas. Cabe mencionar que el resultado de las cifras oficiales del gobierno de México, para el mismo periodo de monitoreo del proyecto de julio 2014 a junio 2015, reportó una destrucción total de 24 729 hectáreas de amapola; esfuerzo conjunto por las instituciones encargadas: SEDENA, SEMAR y PGR/AIC (foto 6).

⁴ El rango es el intervalo entre el valor máximo y mínimo del método estadístico utilizado en la toma de muestras. El rango no incluye errores muestrales, como lo son errores susceptibles de cometerse en la fotointerpretación de las imágenes satelitales y fotos aéreas.

⁵ La definición de la muestra fue tomada a nivel nacional, no a nivel estatal, entonces no se puede sacar conclusiones para cada estado.

Es importante resaltar que para obtener resultados en estimación de superficie sembrada para marihuana, el proyecto requiere continuar monitoreando este cultivo por más tiempo para recolectar y analizar los datos que validen técnicamente y que muestren la realidad estadística de la siembra de este tipo de enervante en México. En la marihuana, a diferencia de la amapola, intervienen otros factores en su forma de siembra y cosecha; es una actividad que puede realizarse a una escala más reducida o en la cercanía de lugares más urbanizados; así como en huertos, patios, pequeñas parcelas en tierras agrícolas, invernaderos; o bien combinando la siembra de marihuana con cultivos lícitos que dificulten su detección. Esto ha obstaculizado que en el presente reporte no se asiente un resultado estadístico de superficie sembrada para la marihuana que sea técnicamente confiable.

Foto 6. Esfuerzos en la destrucción de amapola por las instituciones participantes en el proyecto de monitoreo



SEDENA



SEMAR



PGR



AIC

6.2. ÁREA DE COBERTURA DE LAS IMÁGENES COLECTADAS Y UTILIZADAS PARA LA ESTIMACIÓN CON CULTIVOS DE AMAPOLA

La colecta de imágenes satelitales se complica cuando hay mucha nubosidad, que es el caso para algunas regiones de monitoreo en México. Esto resulta que no todas las muestras (segmentos) podían ser observadas completamente, resultando en una cobertura parcial para algunos segmentos con imágenes. La cobertura “total-ideal” de 100% está conformada por los 1 104 segmentos de 10 x 10 kilómetros (100 Km²) de la muestra, siendo la suma de todos los 368 segmentos para los tres periodos cuatrimestrales analizados. El total de muestras (imágenes) colectadas para los tres periodos fueron 1 032 segmentos del total de la muestra (1 104 segmentos), esto corresponde a 93% de la cobertura “total-ideal” (tabla 3). El mapa 4 muestra la distribución de hectáreas interpretadas para cada segmento del monitoreo.

Tabla 3. Resumen general de la muestra colectada y analizada para los tres periodos

Datos de la muestra	Periodos de análisis			Totales
	julio-octubre 2014	noviembre 2014-febrero 2015	marzo-junio 2015	
Tamaño de la muestra	368	368	368	1,104
Total de muestras colectadas	332	355	345	1,032
Total de muestras faltantes	36	13	23	72
Porcentaje de la muestra obtenida	90%	96%	93%	93%

Para obtener la estimación de superficie nacional sembrada con cultivos de amapola en el periodo de monitoreo Julio 2014 a Junio 2015, se aplica un estimador ratio a la cobertura total de la muestra para el cálculo.

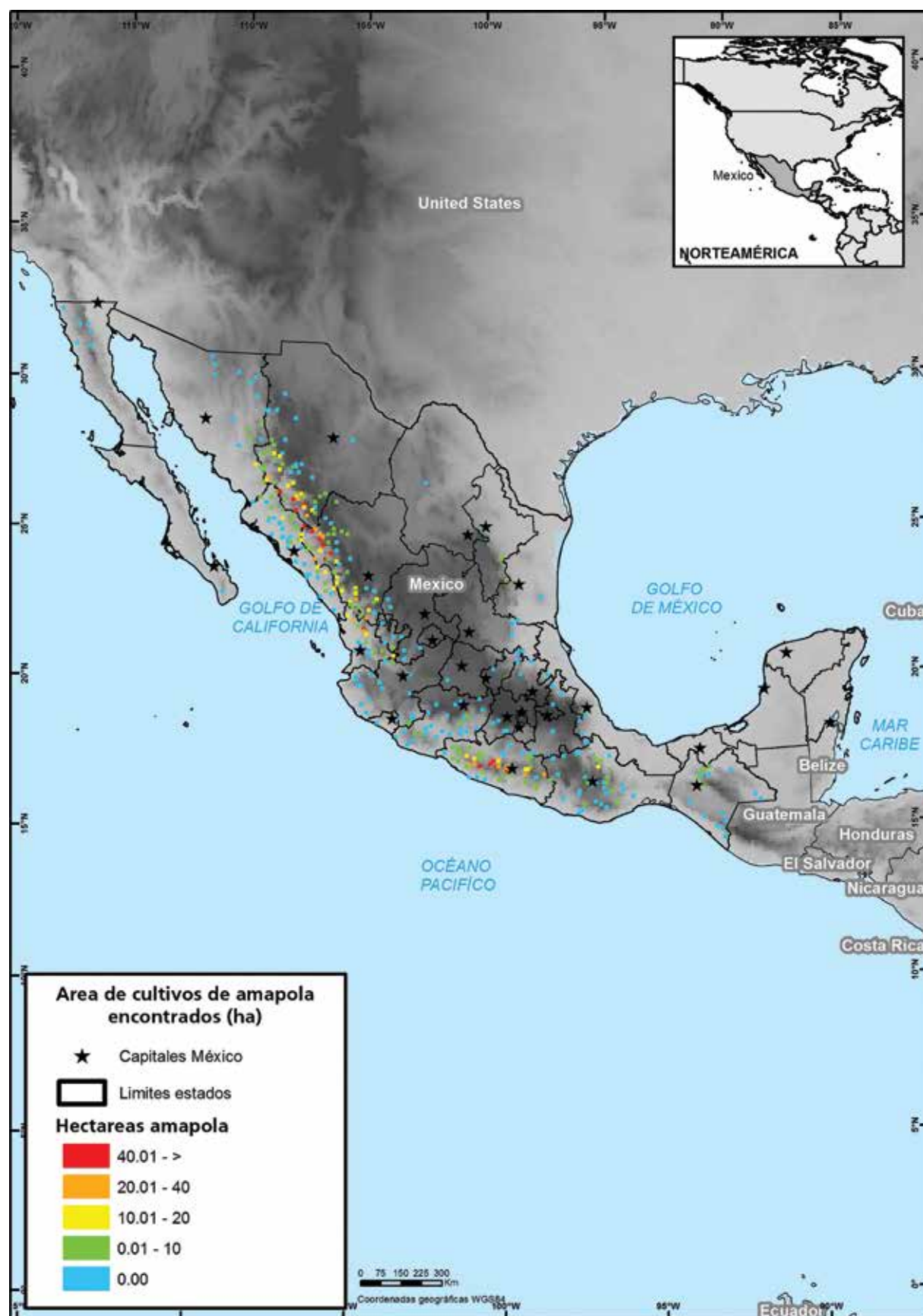
En el resultado del estimador ratio, solo se considera la suma de la superficie total de las imágenes colectadas durante todo el periodo de estudio. La cantidad total de muestras (imágenes) colectadas fue de 1 032 segmentos del total de la muestra (1 104 segmentos), sin embargo el número de muestras para realizar el cálculo de cobertura de superficie fue de 1 046, ya que existen segmentos que cuentan con más de dos imágenes. A cada imagen de los segmentos (100 Km²) colectados se aplicó un análisis visual para calcular su superficie total cubierta en porcentajes de cobertura (%), donde se le resta a su cobertura de 100%, el área cubierta por nubosidades, por efecto de las sombras ocasionadas por el ángulo de toma del satélite, y segmentos incompletos de su cobertura, como consecuencia del alcance de barrido del sensor del satélite por sus diferentes órbitas.

En la siguiente tabla 4 se muestra el resultado del número de segmentos y su cobertura de superficie real para cada porcentaje de 0% a 100%; asimismo, en el mapa 5 se puede observar para cada segmento de la muestra el resultado de la suma de su cubrimiento total y promediado entre los tres periodos que fueron analizados (julio-octubre 2014, noviembre 2014-febrero 2015, y marzo-junio 2015).

Tabla 4. Número de segmentos por porcentaje de cobertura con imágenes satelitales y/o fotos aéreas

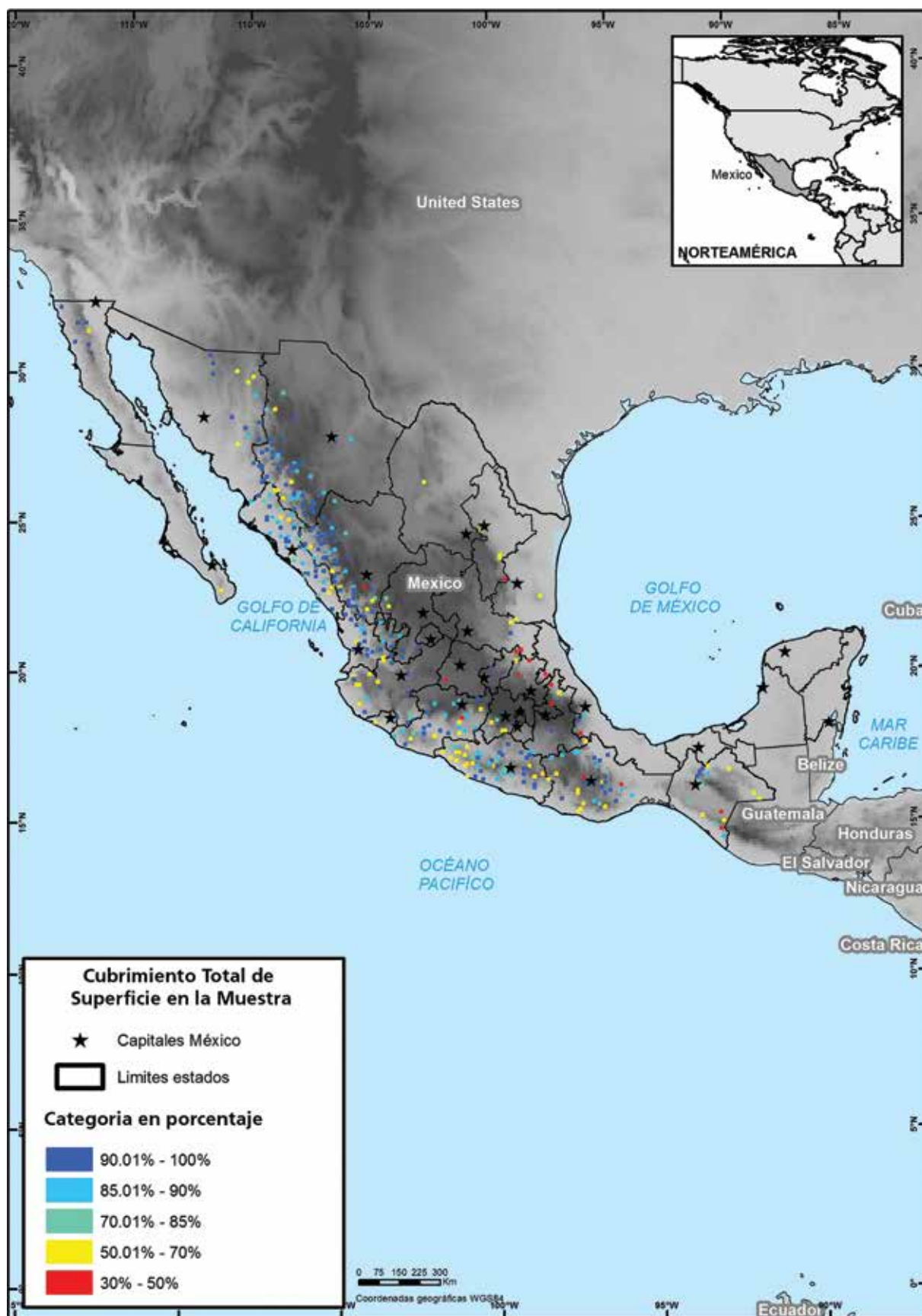
Áreas de colecta	Cobertura de superficie %											Total
	>0	>10	>20	>30	>40	>50	>60	>70	>80	>90	100	
Número de segmentos de 10 x 10 Km	15	8	4	9	13	17	32	52	64	817	15	1,046

Mapa 4. Área (ha) con cultivos de amapola encontrados en los 368 segmentos (10 x 10 Km) de la muestra



Fuente: Sistema de Monitoreo de Cultivos Ilícitos en el Territorio Mexicano-apoyado por UNODC.
Los límites y los nombres utilizados en este mapa no implican la aceptación oficial por parte de la Naciones Unidas.

Mapa 5. Porcentaje de adquisición de imágenes satelitales y fotos aéreas por segmento de la muestra promediado con los tres periodos cuatrimestrales



Fuente: Sistema de Monitoreo de Cultivos Ilícitos en el Territorio Mexicano-apoyado por UNODC.
Los límites y los nombres utilizados en este mapa no implican la aceptación oficial por parte de la Naciones Unidas.

7. INSUMOS DE LA METODOLOGÍA DETALLADA

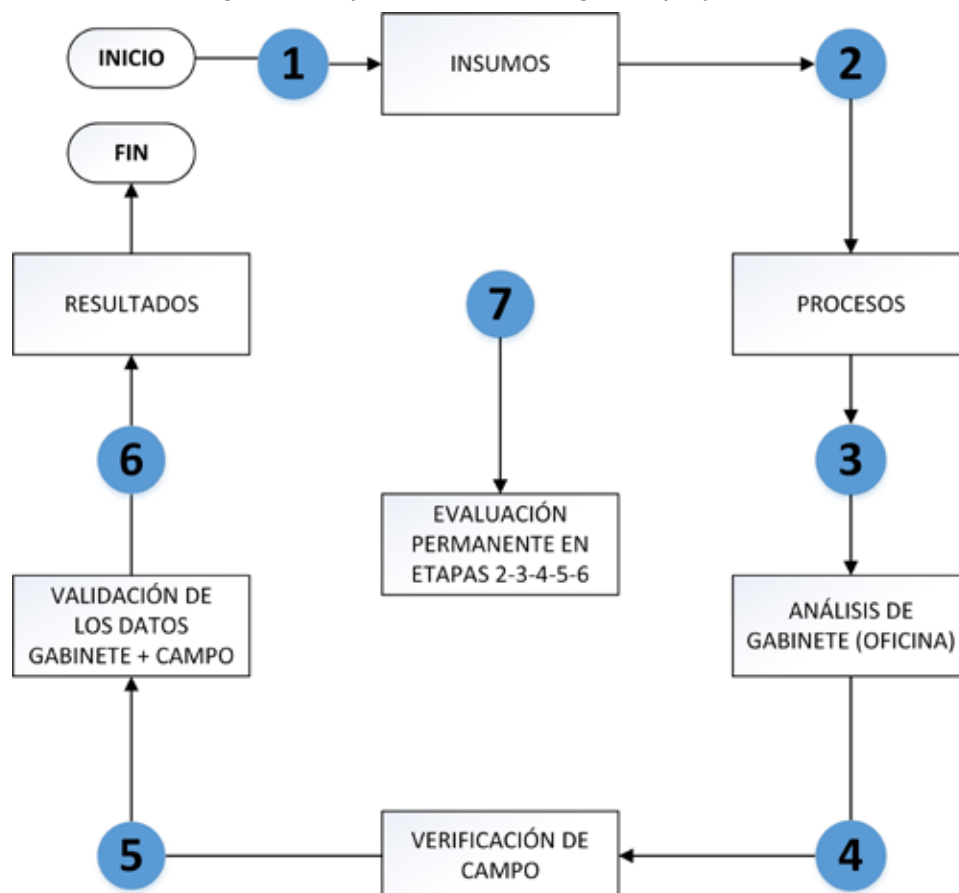
Considerando que el alcance del proyecto es a nivel nacional y que las estimaciones se realizarán de esta manera y no a nivel regional, estatal o municipal, el primer paso fue la evaluación de las herramientas e insumos con los que se contaba y así planear la mejor estrategia para el desarrollo de este proyecto.

La metodología utilizada para estimar la superficie sembrada de cultivos de amapola está basada en la obtención de información espacial a partir de técnicas de sensores remotos como: imágenes satelitales, fotografía aérea y/o video, adquirida desde un satélite artificial en órbita o en aeronaves de ala fija (aviones) o de ala móvil (helicópteros).

La metodología aplicada se compone de 7 etapas como se muestra en la figura 1 donde se incluye el uso de tecnologías, insumos, herramientas de SIG, procesos, validación y verificación de los datos analizados mediante fotos aéreas colectadas por sobrevuelos en trabajos de campo y obtención de resultados aplicando la geoestadística para la estimación final de superficie en hectáreas sembradas.

Sin embargo, el flujo de análisis para la fotointerpretación de los cultivos de amapola enfrentó varios retos para su detección, los cuales fueron solventados con los trabajos de campo complementarios mencionados anteriormente, esto facilitó al analista una mejor visión para la determinación de los cultivos ilícitos. Asimismo, se establecieron vínculos con universidades (una nacional y una extranjera), las cuales evaluaron permanentemente los procesos de la metodología aplicada y colaboraron en la investigación de los estudios sobre las temporalidades óptimas de crecimiento de los cultivos para poder ser observados, y las áreas potenciales/riesgo de la siembra de estos enervantes ilícitos en México, garantizando una buena calidad en las estadísticas finales.

Figura 1. Etapas de la metodología del proyecto



7.1. REJILLA NACIONAL (GRILLA) DE 10 X 10 KILÓMETROS

Para tener una unidad de medición se optó por una rejilla geográfica (grilla) con segmentos de 10 x 10 kilómetros (100 Km^2), esta fue elegida por el tamaño mínimo para obtener determinadas imágenes satelitales y/o fotos aéreas. Las rejillas geográficas se utilizan con frecuencia como un insumo de geolocalización, esta es una información espacial expresada en coordenadas cartesianas (latitud y longitud) dentro y fuera de una red de distribución, estas pueden o no pueden estar alineadas con las líneas de la cuadrícula de latitud y longitud.

En general, las rejillas geográficas se dividen en dos clases, las que son de “ángulo igual”, estas tienen tamaños de celdas constantes en grados de latitud y longitud. Las que son de “áreas iguales”, tienen tamaños de celda con la misma superficie como por ejemplo, $1,000 \text{ Km}^2$, 100 Km^2 , 10 Km^2 , 1 Km^2 . Con el uso de rejillas se puede dividir la superficie de un determinado espacio geográfico en una serie de celdas o segmentos contiguos que pueden tener un tipo de geometría “cuadrada, rectangulares, triangulares, entre otras”, a las cuales se le asignan identificadores “numéricos o alfanuméricos” únicos que se utilizan con fines de indexación y/o ubicación espacial.

Para este proyecto se creó mediante un software de Sistemas de Información Geográfica (Arc-Map) una rejilla (grilla) ortogonal alfanumérica⁶ de “áreas iguales” de tipo “cuadrada” con indexación “alfanumérica”. El resultado de la rejilla tiene un total de 22 308 segmentos de 10 x 10 kilómetros distribuidos en todo el país, cubriendo una superficie de 100 Km^2 cada uno (mapa 6). Cada segmento de esta rejilla tiene asignado un identificador alfanumérico, que permitió agrupar los parámetros seleccionados por cada segmento como se observa en el ejemplo de la figura 2.

Con esta rejilla de 22 308 segmentos, se obtuvieron los dos marcos de muestreo con los que se extrajo la muestra representativa de 368 segmentos del territorio nacional. Se utilizaron para el primero (300 segmentos), los datos de destrucción histórica de cultivos ilícitos en el país; y para el segundo marco de muestreo extendido (68 segmentos), los datos del análisis de factores determinantes para cultivos ilícitos (riesgo).

Figura 2. Ejemplo de una rejilla (grilla) alfanumérica

#	1	2	3	4	5	6
F	F1	F2	F3	F4	F5	F6
E	E1	E2	E3	E4	E5	E6
D	D1	D2	D3	D4	D5	D6
C	C1	C2	C3	C4	C5	C6
B	B1	B2	B3	B4	B5	B6
A	A1	A2	A3	A4	A5	A6

Fuente: MEXK54

⁶ Un sistema de referencia que permite la designación de la ubicación de un punto o una zona en un mapa, foto, u otro gráfico en términos de números y letras, también conocida como “malla alfanumérica”.

Mapa 6. *Rejilla ortogonal nacional (grilla) de 10 x10 Km (100 Km² por segmento)*



Fuente: Sistema de Monitoreo de Cultivos Ilícitos en el Territorio Mexicano-apoyado por UNODC.
Los límites y los nombres utilizados en este mapa no implican la aceptación oficial por parte de la Naciones Unidas.

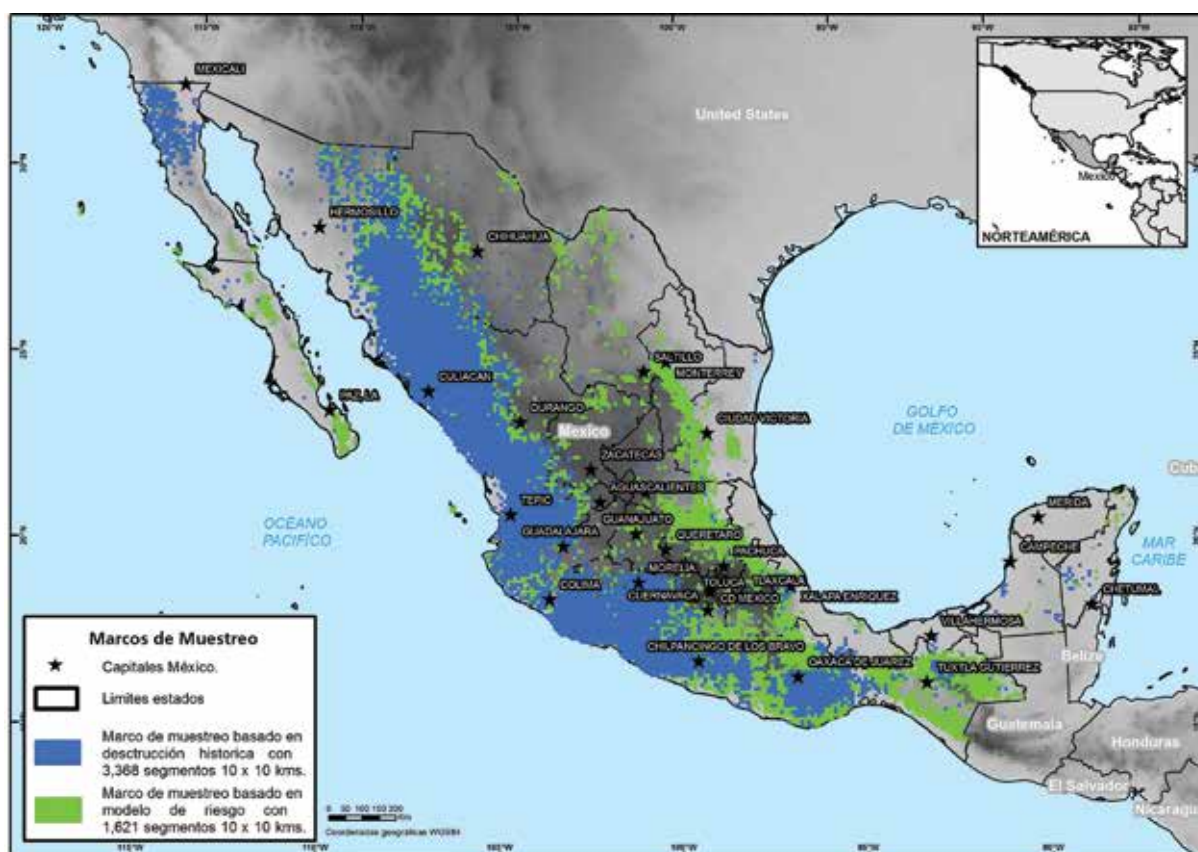
7.2. ZONAS DE MONITOREO

En México, la mayor incidencia de siembra de amapola se encuentra en los estados de Sinaloa, Chihuahua, Durango, Nayarit, Jalisco, Michoacán, Guerrero y Oaxaca. Estos se localizan a lo largo de las costas del Océano Pacífico, sobre la franja territorial conformada por la Sierra Madre Occidental y la Sierra Madre del Sur; de acuerdo con lo que indican las destrucciones realizadas por las Fuerzas Federales en México, estas áreas tienen las condiciones físicas óptimas que son determinantes para el desarrollo fenológico de este cultivo.

El área de estudio fue limitada, usando principalmente datos de destrucción histórica. Con la delimitación del área de estudio, se formó el marco de muestreo, el entorno donde se tomaron las muestras. Los resultados encontrados en las muestras seleccionadas se usaron para estimar el área total del fenómeno (área/bajo cultivo) dentro del marco de muestreo. Esto significa, que los resultados son solamente representativos para la superficie cubierta con el marco de muestreo.

El marco de muestreo inicial del monitoreo fue extendido en la segunda etapa con un estudio de riesgo. De esta manera, se aplicaron dos marcos de muestreo: uno basado en los datos de destrucción histórica, y otro con base en un modelo estadístico de probabilidades por factores determinantes para cultivos ilícitos (riesgo) como se muestra en el mapa 7.

Mapa 7. Los marcos de muestreo (I y II) que formaron la base para estimación del área (ha) para cultivos de amapola



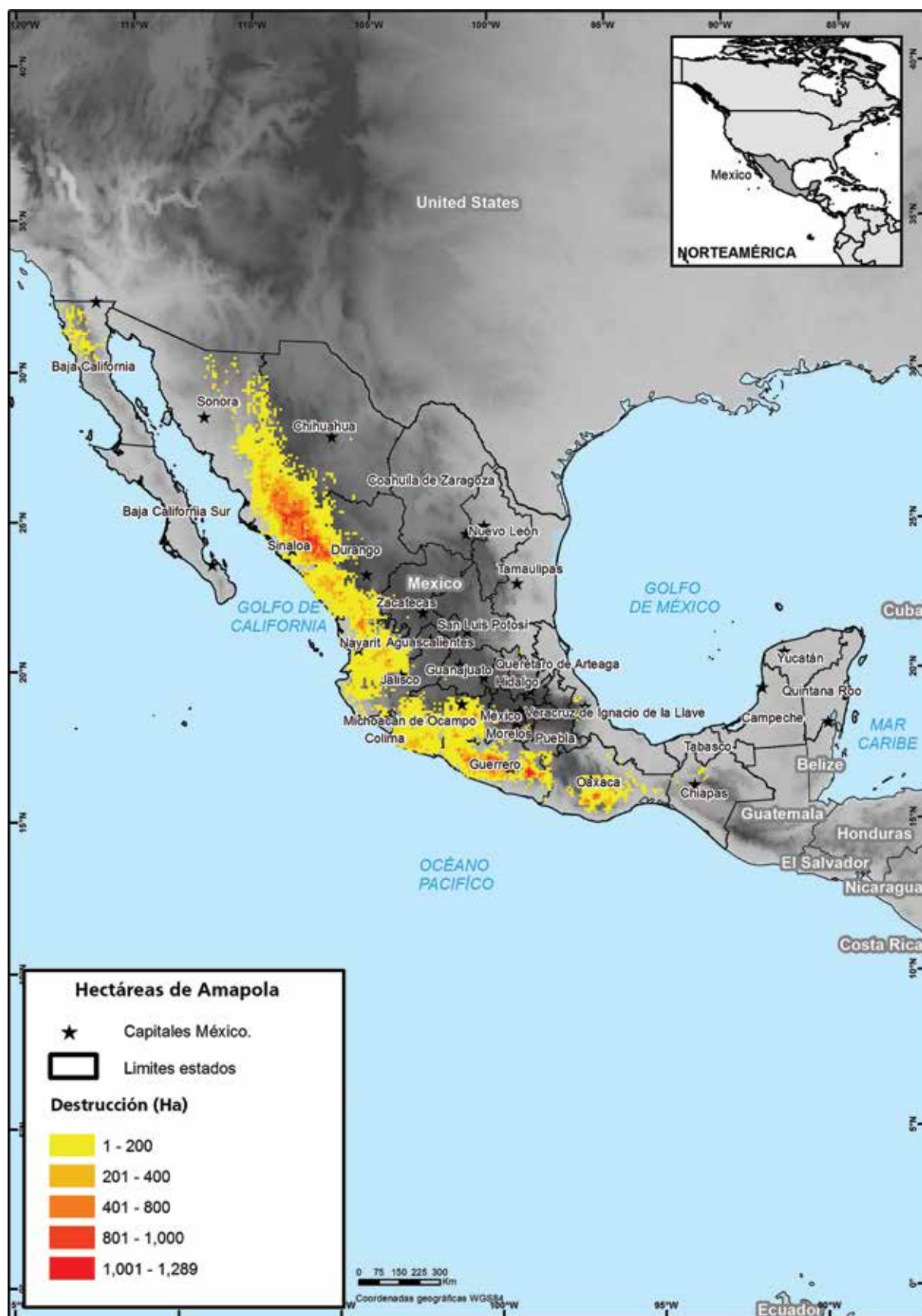
7.3. MARCO DE MUESTREO SOBRE LOS DATOS DE DESTRUCCIÓN HISTÓRICA

En el primer marco de muestreo implementado en el proyecto para el monitoreo, se utilizaron los datos de destrucción histórica de plantíos ilícitos para los años 2007-2009 y 2011⁷ del gobierno federal de México (mapa 8). Una vez establecida la rejilla ortogonal de 10 x 10 Km, se procedió a realizar el análisis inicial de cada uno de los parámetros estimados sobre la rejilla como se muestra en el mapa 8, este proceso fue utilizando el software de SIG (ArcMap) para la integración de los datos de destrucción histórica.

En este análisis se consideraron las celdas con y sin presencia de cultivos ilícitos (amapola y marihuana) representados en los datos de destrucción, ya que fue necesario evaluar todo el contexto del territorio mexicano para entender patrones y procesos de este evento. Si en un segmento hubo la destrucción más de una vez, entonces podría ser seleccionado (una vez significa por lo menos en un año ambos cultivos, o destrucción en dos años diferentes). Las variables elegidas y sus parámetros utilizados se aplicaron en un sistema de información geográfica que permitió agrupar los parámetros seleccionados.

⁷ El año 2010 fue excluido por tener problemas de codificación y georeferencia en los datos.

Mapa 8. Marco de muestreo con datos de destrucción histórica de plantíos ilícitos



Fuente: Sistema de Monitoreo de Cultivos Ilícitos en el Territorio Mexicano-apoyado por UNODC.
Los límites y los nombres utilizados en este mapa no implican la aceptación oficial por parte de la Naciones Unidas.

7.4. MARCO DE MUESTREO SOBRE EL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE PROBABILIDADES PARA CULTIVOS ILÍCITOS POR FACTORES DETERMINANTES

De manera coordinada se trabajó con el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) aplicando una metodología donde se describe la obtención, selección y clasificación de variables y parámetros para realizar un análisis territorial de áreas con probabilidades de cultivos ilícitos en la República Mexicana a partir de un análisis multivariado, bajo un contexto integral donde se correlacionaron variables de tipo socioeconómico-administrativo y físico para determinar cuáles de ellas explican, en gran medida, la probabilidad de presencia de cultivos ilícitos en el país, así como su distribución espacial y las acciones colectivas y del Estado Mexicano dirigidas a la recuperación social e institucional del territorio.

El resultado muestra una primera aproximación a un instrumento geográfico que coadyuvan a las actividades de detección de cultivos ilícitos en el territorio mexicano. Se trata, de un “Mapa Nacional de Probabilidades/Riesgo por Factores Determinantes para Cultivos Ilícitos”, en el cual se clasifica al territorio en 5 tipos de área por su probabilidad desde muy alta, alta, media, baja y muy baja de contener superficies con cultivos de amapola.

Los análisis se realizaron mediante tres modelos estadísticos: con información de los datos de destrucción histórica generados por el gobierno federal; con indicadores calculados a partir de datos socioeconómicos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI); y con datos fisiográficos del acervo del Instituto de Geografía de la UNAM. Todos los análisis para la conformación del modelo se realizaron con el software “R” (<http://www.R-project.org/>).

El análisis está descrito de manera amplia en el Anexo I, en este documento se presentan una serie de mapas descriptivos de las variables utilizadas y representativas del fenómeno de estudio, útiles para todos los análisis realizados, pero se concentra en la metodología y los resultados del “Mapa Nacional de Probabilidades/Riesgo por Factores Determinantes para Cultivos Ilícitos”. Asimismo, de este estudio fueron extraídos los 68 segmentos adicionales a la muestra total para el monitoreo.

Se puede observar que en el área donde existen grandes áreas de destrucción histórica, a lo largo de la Sierra Madre Occidental y en específico en el llamado Triángulo Dorado, así como en Guerrero y Oaxaca, se presenta la mayor probabilidad/riesgo. Llama la atención, el área al norte de la Sierra Madre Oriental donde el mapa muestra alta probabilidad/riesgo, pero donde no ha habido destrucción histórica significativa. Lo mismo sucede en el estado de Chiapas.

Se está realizando un nuevo análisis territorial y actualización de las áreas con probabilidades, para este estudio se tomará como insumo principal a todos los cultivos interpretados por el proyecto de monitoreo desde su inicio hasta la fecha. Con este análisis se podrán determinar áreas más específicas de la posible siembra de estos enervantes y con ello conformar el nuevo “Mapa Nacional de Probabilidades para Cultivos Ilícitos en México” (mapa 9). Estos nuevos resultados deberán verse reflejados en próximos estudios de monitoreo.

Mapa 9. Área nacional de probabilidades/riesgo por factores determinantes para cultivos ilícitos



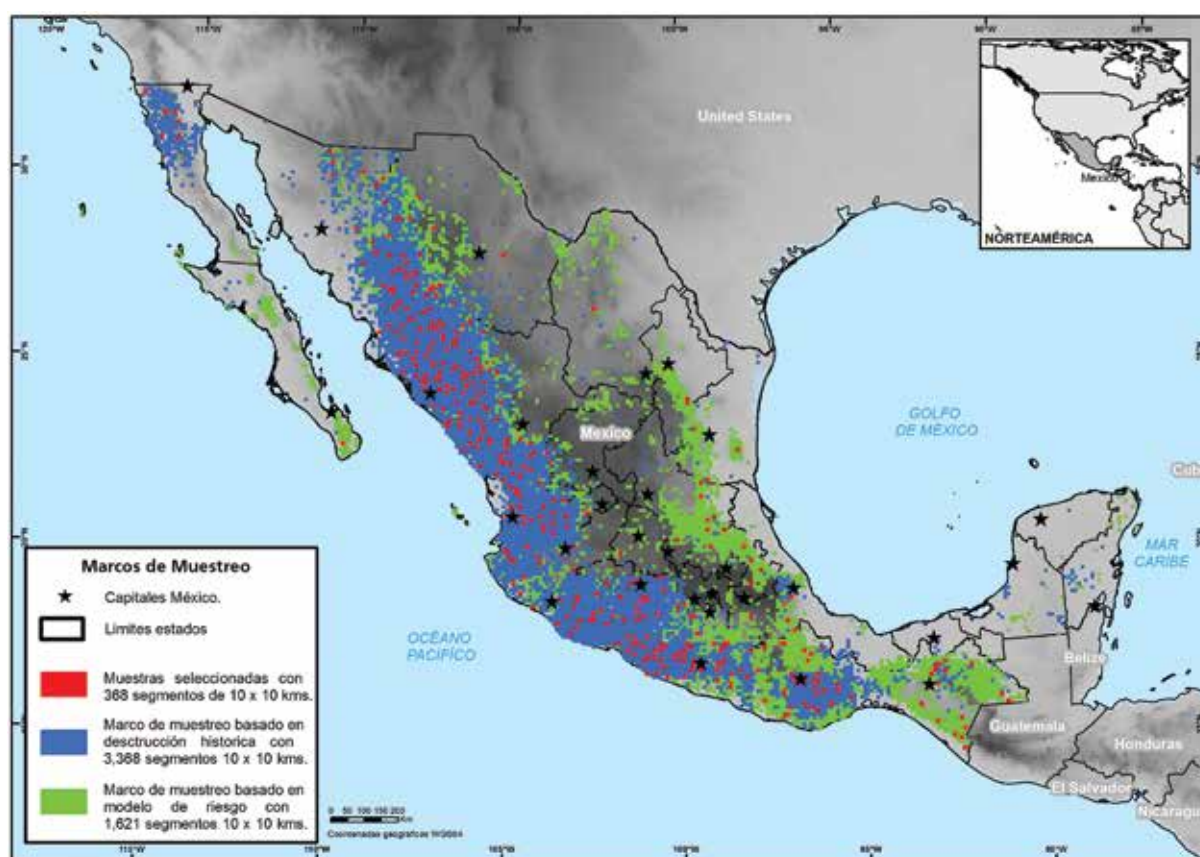
Fuente: Sistema de Monitoreo de Cultivos Ilícitos en el Territorio Mexicano-apoyado por UNODC.
Los límites y los nombres utilizados en este mapa no implican la aceptación oficial por parte de la Naciones Unidas.

7.5. SELECCIÓN DE MUESTRAS PARA EL MONITOREO

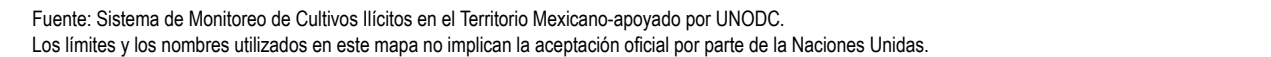
Inicialmente, para la selección de las muestras en el estudio de la fase piloto se aplicó un modelo estadístico aleatorio llamado PPS,⁸ (por sus siglas en inglés). Para la selección de muestras el segundo periodo de estudio 2014-2015, se utilizó un método de muestreo aleatorio aplicando un geostrata o conglomerados geográficos. El marco (todos los segmentos que puedan ser seleccionados en un muestreo) fue dividido en 100 geoestratos (pequeños conglomerados o grupos geográficos) eligiendo una muestra aleatoria simple dentro de cada conglomerado (mapa 11). En cada conglomerado, tres segmentos fueron seleccionados como muestra. El método garantiza una distribución óptima en un territorio desconocido.

Además, con este método es menos complejo el manejo de segmentos faltantes porque no altera los valores en la ponderación de los resultados finales. La muestra total de 368 segmentos fue seleccionada del marco de muestreo combinado y compuesto de 4 989 segmentos. Cada segmento corresponde a un cuadrante de 10 x 10 kilómetros (100 Km²). Se eligieron 300 muestras del marco de muestreo basado en destrucción histórica de plantíos ilícitos, y 68 del marco de muestreo basado en el modelo de probabilidades por factores determinantes/riesgo. La distribución espacial de los segmentos de la muestra es ilustrada en el mapa 10.

Mapa 10. Ubicación de las imágenes satelitales utilizadas en la muestra de 368 segmentos



⁸ Inicialmente (2012-2013) se aplicó un modelo de muestreo llamado enfoque de Probabilidad Proporcional al Tamaño (PPS) el cual que incrementó la oportunidad de seleccionar un segmento en el cual se llevó a cabo mucha destrucción histórica en los últimos años. Este enfoque conduce a una muestra, donde los segmentos con una alta porción de destrucción son seleccionados con mucha mayor frecuencia que los segmentos sin mucha destrucción. En conclusión, este enfoque funciona mejor y tiene un alto grado de validez si la relación “más destrucción en un segmento en años previos significa más cultivos en el año actual”. No obstante, con los resultados del primer periodo, no se encontró una relación significativa. Además se experimentó el problema de observaciones (imágenes) faltantes, segmentos donde no se podían conseguir imágenes y que complicó los cálculos estadísticos posteriores, principalmente por la ponderación y los valores determinados a cada segmento.

[illegible]

7.6. ANÁLISIS DE FECHAS PARA DETERMINAR CALENDARIOS AGRÍCOLAS, UTILIZANDO SERIES TEMPORALES DE IMÁGENES SATELITALES

El proyecto de monitoreo de cultivos ilícitos determinó realizar el presente estudio de calendarios agrícolas, con el objetivo de planear la temporalidad en la adquisición de imágenes tomadas desde diferentes sensores remotos, porque es importante que la fotointerpretación de los cultivos de amapola se realice en su etapa de madurez; es decir, obtener de la información satelital, el momento adecuado en que se podrán identificar los cultivos previos que sean cosechados.

El objetivo principal del estudio es analizar la fenología (etapas de crecimiento) de la amapola para diferentes regiones agro-ecológicas, dicho estudio debería contribuir a entender mejor los ciclos agrícolas y optimizar el tiempo de las adquisiciones para futuros estudios. Este análisis se basa en series temporales de imágenes de satélites de mediana resolución históricas (Landsat 7 y Landsat 8). Para investigar el desarrollo de la vegetación se usaron los Índices de Diferencia de Vegetación Normalizado (NDVI, por sus siglas en inglés), que se refiere a la combinación matemática de la banda roja e infrarroja cercana, siendo el indicador más sensible de la presencia y condición de la vegetación verde (Mattiuzzi et al., 2014).

Los resultados presentados en este estudio de NDVI son preliminares y han sido desarrollados de manera coordinada con la Universidad de Recursos Naturales y Ciencias de la Vida “BOKU” (Austria), utilizando los datos (polígonos) de los cultivos interpretados por los analistas del proyecto en México en diferentes tipos de imágenes satelitales de muy alta resolución VHR como las SPOT-6, GeoEye-1, Ikonos, World View-2 (foto 7) y validados con fotografías aéreas por personal de expertos y analistas del proyecto. Por lo anterior, se seleccionaron tres áreas de prueba a lo largo del territorio nacional.

7.6.1. Áreas de prueba para las 3 regiones con imágenes Landsat

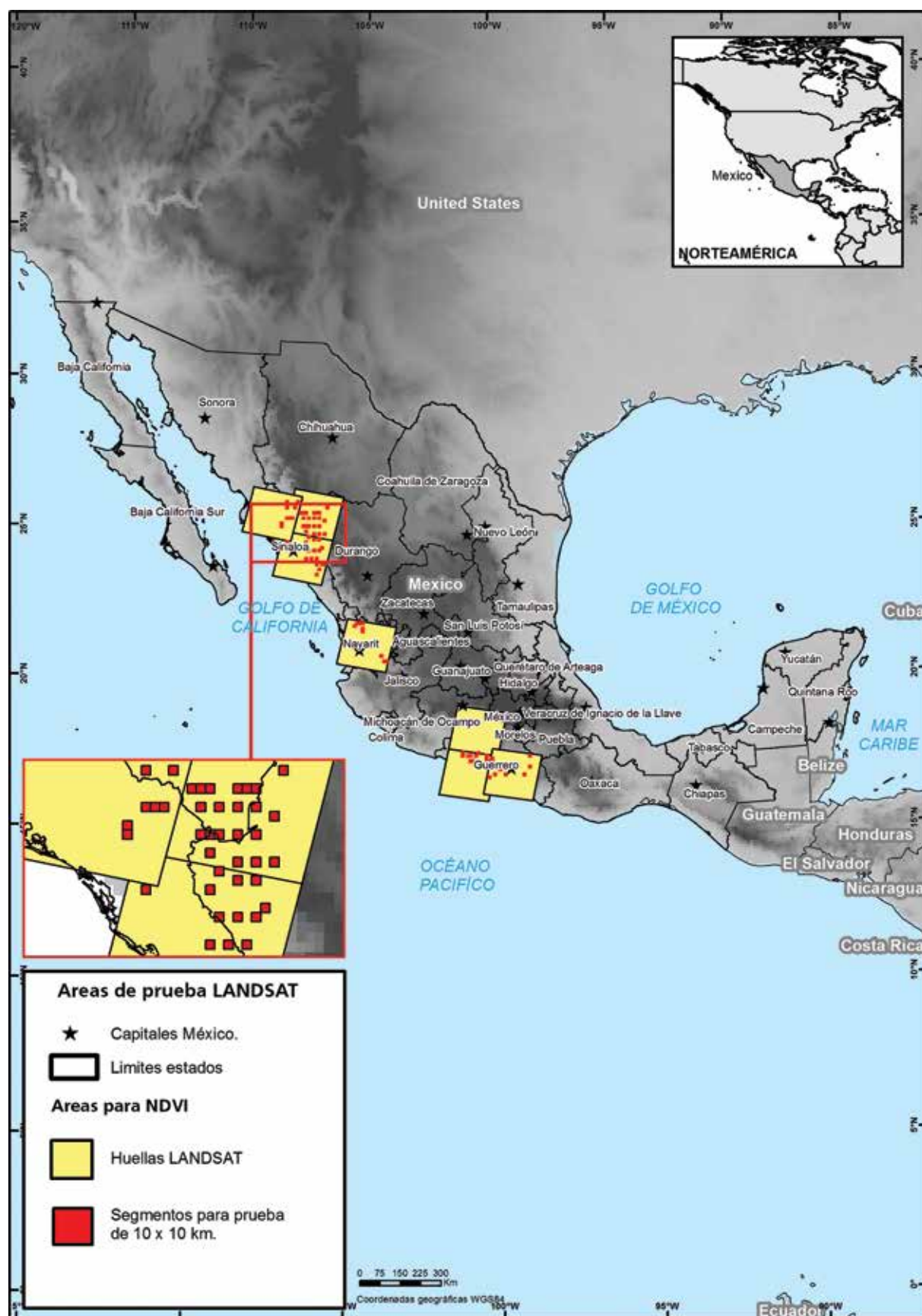
Para estas áreas de prueba se identificaron tres grandes y diferentes regiones agrícolas, donde los ciclos agrícolas preliminares son comparables para las áreas del Norte, Centro y Sur, zonas donde fueron detectados los cultivos ilícitos. Se seleccionaron segmentos para estas tres regiones con imágenes Landsat 7 y Landsat 8 (NASA 2012) adquiridas de octubre de 2012 a marzo de 2014 descargadas con la aplicación USGS Earth Explorer (EARTH EXPLORER 2014), el total disponible de imágenes en el periodo mencionado fue de 37 imágenes de 180 x 180 kilómetros en 7 ubicaciones diferentes como se muestra en el mapa 12.

La adquisición regular de Landsat y disponibilidad en formato libre de imágenes sobre el territorio mexicano permite hacer series temporales de imágenes por lo menos cada 16 días. Adicionalmente, al inicio del estudio se tomaron en cuenta datos de prueba con imágenes de satélite SPOT-4 y SPOT-5, que suministró el proyecto, pero solo se tomaron los resultados como ejemplos ya que la cobertura temporal de las imágenes disponibles era demasiado baja para obtener resultados significativos en los índices de vegetación (NDVI).

Foto 7. Ejemplo de campos de amapola identificados con imagen satelital World View-2



Mapa 12. Ubicación de las áreas de prueba con imágenes satelitales de LANDSAT 7 y 8



Fuente: Sistema nacional de monitoreo apoyado por UNODC-Gobierno de México.

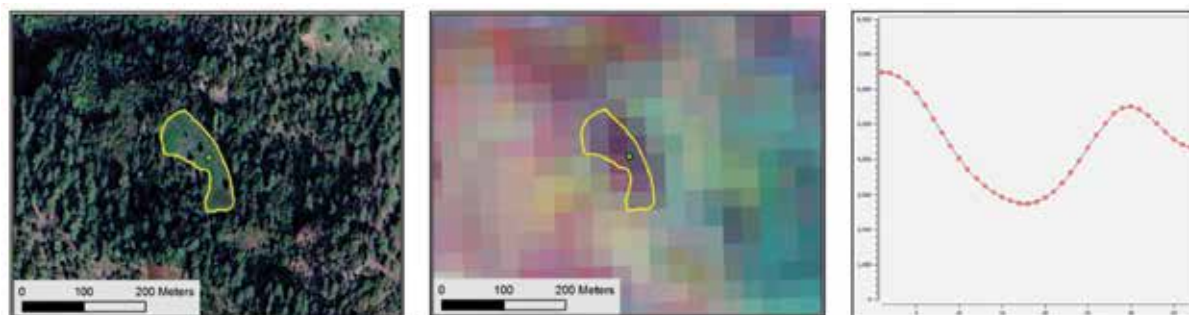
Los límites y los nombres utilizados en este mapa no implican la aceptación oficial por parte de la Naciones Unidas.

Las series de datos de polígonos que hacen la distinción de amapola y que fueron visualmente interpretadas por expertos del proyecto fueron facilitadas para algunos segmentos seleccionados dentro de las tres principales regiones agrícolas. Los cultivos de amapola fueron identificados con imágenes de muy alta resolución o fotografías aéreas. Las imágenes Landsat pasaron por varios procesos de hacer mosaicos, filtración y recortes para ser analizados con una herramienta que fue desarrollada con el software libre QGIS.

7.6.2. Análisis de los datos

En la figura 3 se muestra el ejemplo de la ubicación de un campo de amapola (polígono amarillo) en una imagen satelital VHR (World View-2). Los valores NDVI se destacan de la serie de capas NDVI basada en datos Landsat y la gráfica muestra que en el eje X se ve el número de imágenes satelitales mientras que el eje Y muestra los valores NDVI filtrados correspondientes.

Figura 3. Izquierda: imagen satelital World View-2 y polígonos de amapola. Centro: serie de capas NDVI. Derecha: curva fenológica obtenida de una serie de capas NDVI para la ubicación central de un pixel



Sin embargo, para superar el problema de los píxeles mezclados, se intentó usar solamente el píxel central del polígono e interpolar los valores de los píxeles vecinos. El efecto suavizado era demasiado fuerte en algunos casos, por lo que el análisis siguiente se basó en los valores promedios de píxel dentro de un polígono.

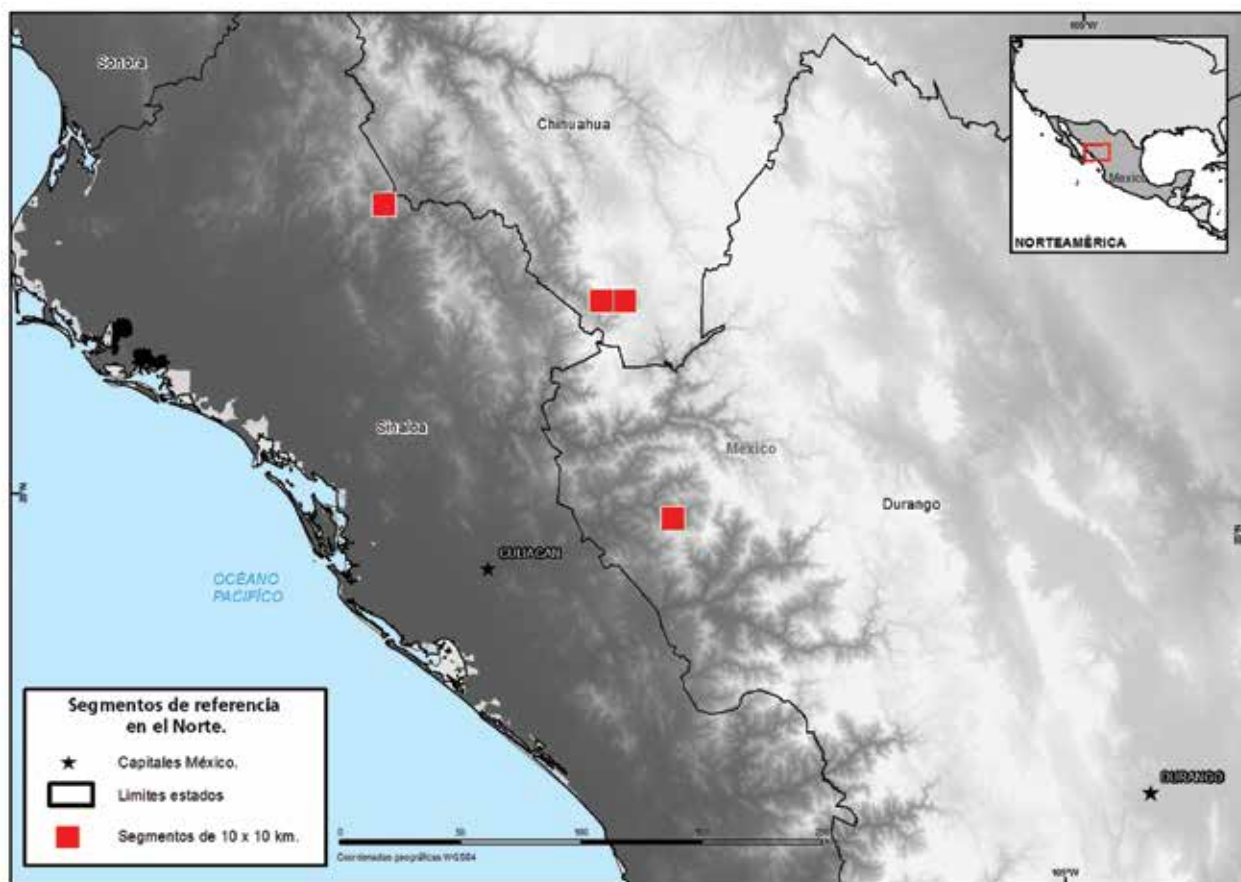
7.6.3. Calendario agrícola durante el año (ciclos de cosecha)

El proyecto inicialmente tomó de base un primer calendario de los ciclos fenológicos de la producción y cosecha de los cultivos ilícitos durante un año calendario, estos se estimaron a partir de los datos de destrucción histórica de cultivos ilícitos que proporcionó el gobierno federal de México. Como resultado de este análisis, se puede establecer que el primer ciclo se presenta en las estaciones climáticas de otoño-invierno (OI) durante los meses de julio-octubre, y el segundo ciclo en invierno-primavera (IP) durante noviembre-febrero.

Por lo anterior, se decidió desarrollar el presente análisis de fechas para determinar los óptimos calendarios agrícolas, utilizando series temporales de imágenes satelitales en las tres grandes regiones del México. A continuación, se describen los resultados obtenidos para el Norte, Centro y Sur.

Para la región Norte de prueba se facilitaron datos de cultivos detectados (polígonos) en los cuatro segmentos como se muestra en la figura 4.

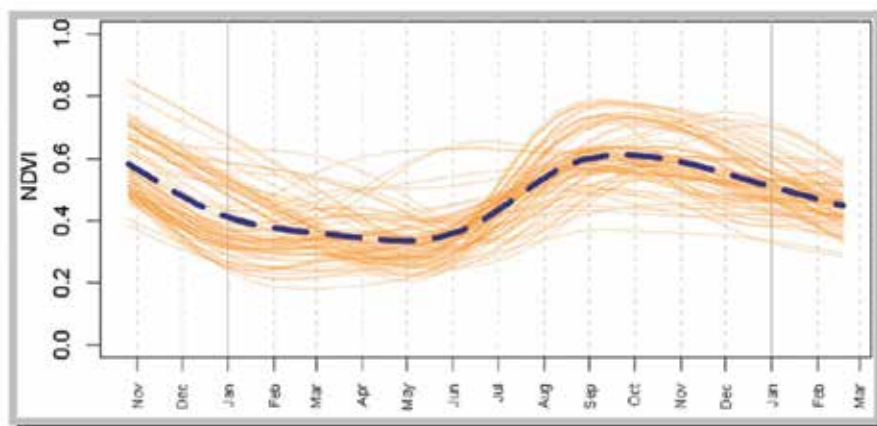
Figura 4. Ubicación de los datos de referencia (segmentos) en la región Norte



Fuente: Sistema de Monitoreo de Cultivos Ilícitos en el Territorio Mexicano-apoyado por UNODC.
Los límites y los nombres utilizados en este mapa no implican la aceptación oficial por parte de la Naciones Unidas.

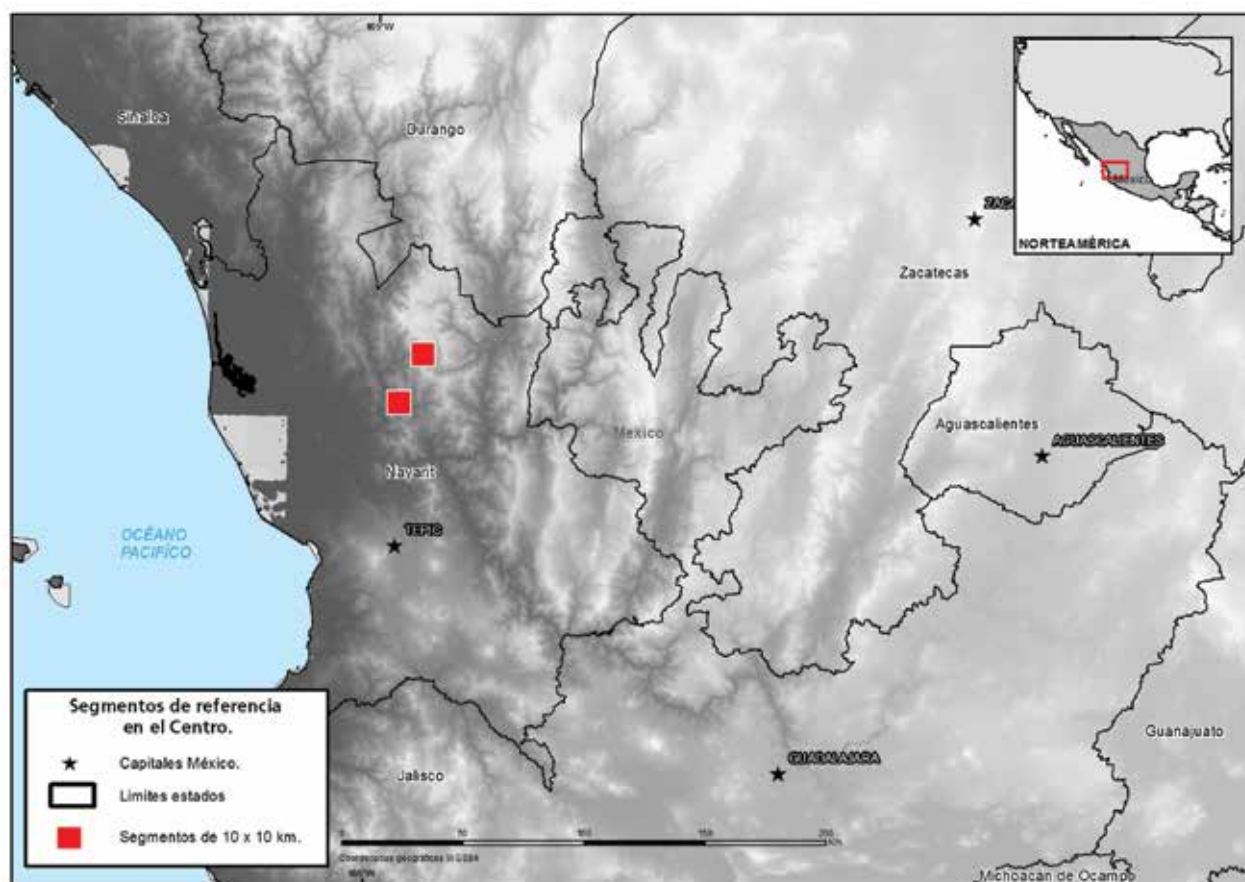
En la gráfica 2 se puede determinar que la amapola es dispersa, pero el promedio (la línea azul) muestra claramente los meses pico entre septiembre y octubre. No se puede identificar un segundo pico, dando la conclusión que en general se sembró la amapola sólo dentro de un área.

Gráfica 2. Curvas fenológicas para la amapola en la región Norte



En la región Centro, se facilitaron datos de pocos cultivos detectados (polígonos) de amapola para cada uno de los dos segmentos seleccionados (figura 5).

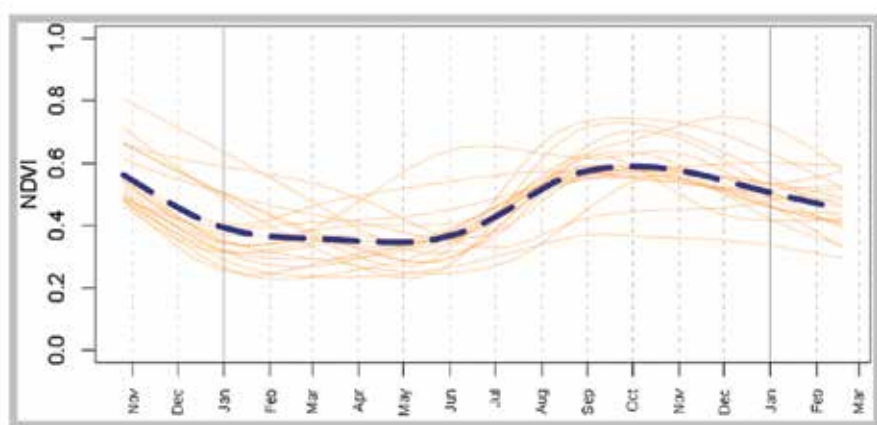
Figura 5. Ubicación de los datos de referencia (segmentos) en la región Centro



Fuente: Sistema de Monitoreo de Cultivos Ilícitos en el Territorio Mexicano-apoyado por UNODC.
Los límites y los nombres utilizados en este mapa no implican la aceptación oficial por parte de la Naciones Unidas.

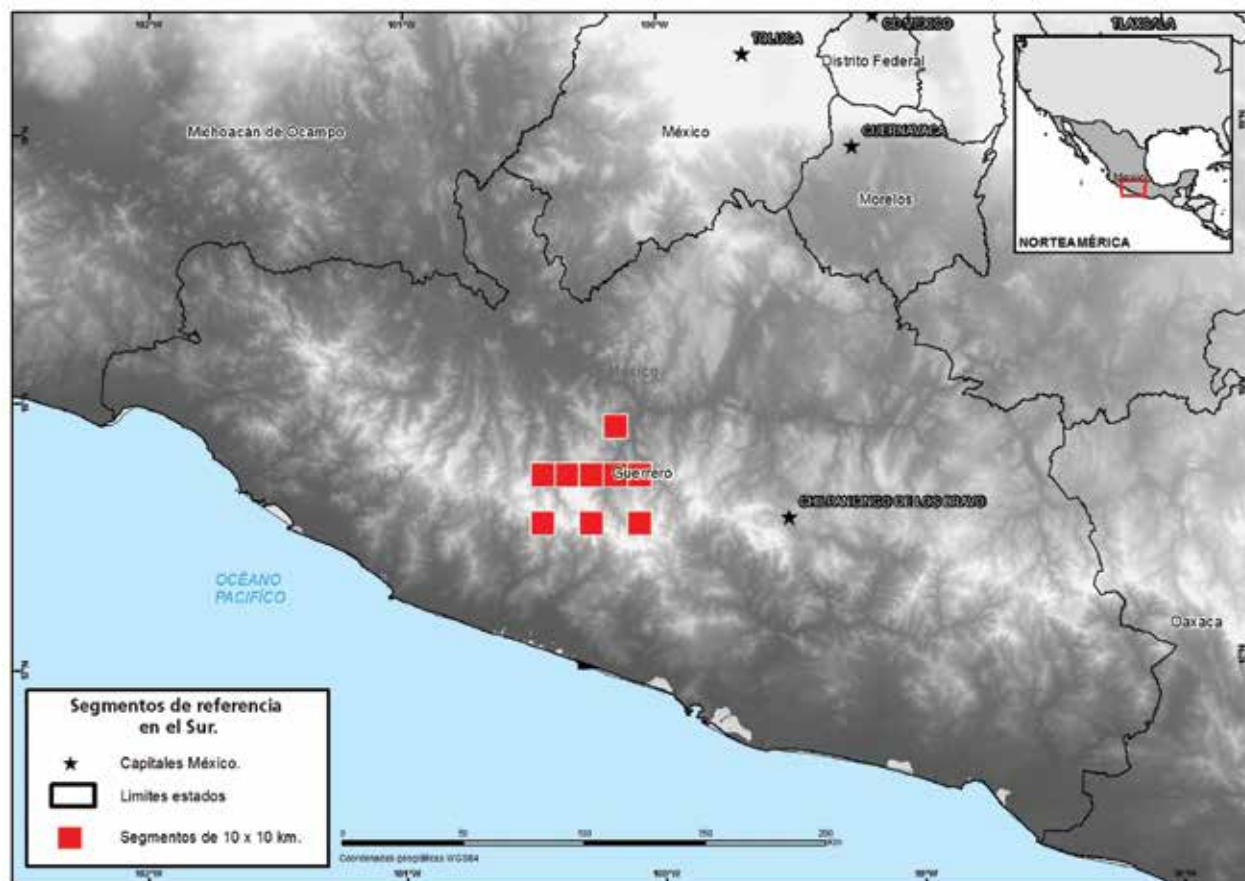
La gráfica 3 muestra los resultados para los campos de amapola, pero el promedio (la línea azul) identifica claramente los meses pico en agosto y septiembre. El segundo pico podría haber correspondido a finales de marzo o abril, en este pico sólo se puede ver en algunos cultivos detectados.

Gráfica 3. Curva fenológica para la amapola en la región Centro



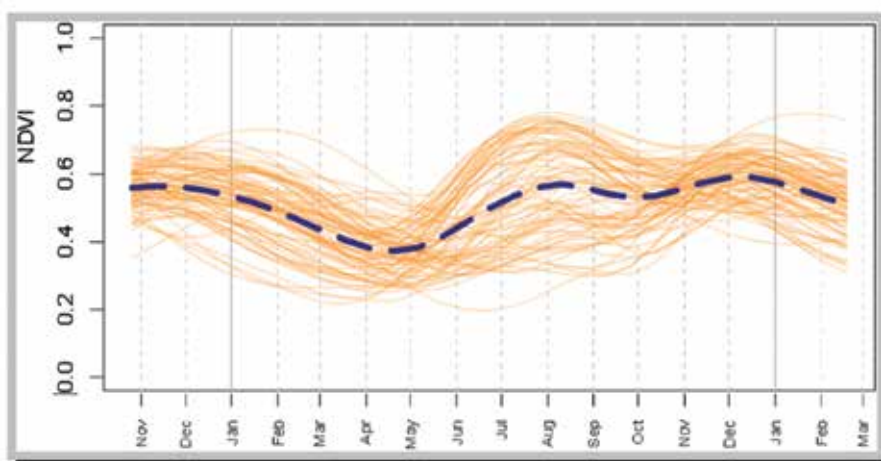
Para el análisis de la región Sur fue donde se facilitaron datos de más cultivos detectados (polígonos) de amapola, donde se abarcan 9 segmentos ubicados al centro del estado de Guerrero (figura 6), esta región en particular cumplió con los requerimientos y la cantidad suficiente de cultivos interpretados para concluir con un análisis completo de NDVI.

Figura 6. Ubicación de los datos de referencia (segmentos) en la región Sur



En la gráfica 4 se puede ver claramente dos periodos de meses picos. El pico más alto tiene lugar alrededor de julio y agosto. Mientras que el segundo pico (promedio) se observa a finales de diciembre, abarcando hasta el mes de enero; sin embargo, los picos en diciembre son muy diversos.

Gráfica 4. Curvas fenológicas para la amapola en la región Sur



7.6.4. Primeros resultados del análisis al calendario agrícola

El primer calendario se obtuvo de los resultados del primer análisis que dieron las gráficas NDVI en el crecimiento de los cultivos ilícitos dentro de las tres grandes regiones seleccionadas, adicionalmente se concluyó con la experiencia de las interpretaciones que se tienen en el monitoreo del proyecto (tabla 5). En varios casos, fue complejo identificar los meses altos dentro de los ciclos agrícolas.

Lo anterior debido a la altitud más baja del sol en invierno, cuando los valores NDVI son más bajos durante este periodo y a veces resultan más difíciles de interpretar. para el caso de verano, los meses altos son más evidentes y de manera más clara solo en la región Sur, los meses altos tienen la misma altura en sus valores, el presente calendario agrícola se muestra en la tabla 5.

Cabe mencionar que para obtener los meses altos en el tercer periodo, de marzo a junio, y conseguir los resultados de estimación en el estudio de monitoreo junio 2014-junio 2015, se tuvieron que promediar los meses altos de este periodo con las fechas de alta incidencia obtenida de los datos de la destrucción histórica de cultivos ilícitos del gobierno federal de México y complementar con las detecciones de los periodos monitoreados anteriores y los datos colectados en los trabajos de campo del proyecto.

Tabla 5. Calendario con los valores NDVI más altos (promedio) por región

Región	Estados	Amapola		
		1er. Periodo julio-octubre 2014	2do. Periodo noviembre 2014-febrero 2015	*3er. Periodo Marzo-junio 2015
Norte	Sinaloa, Chihuahua y Durango	septiembre-octubre	enero-febrero	marzo-abril
Centro	Nayarit y Jalisco	agosto-septiembre	febrero-marzo	abril-mayo
Sur	Guerrero	julio-agosto	diciembre-enero	abril-mayo

*Nota: para este periodo se tiene que realizar un nuevo estudio NDVI puntual, validado con cultivos detectados en el proyecto.

En conclusión, se debe poner especial atención a los píxeles de entrada (input) durante el proceso de la serie (set) de imágenes, con la finalidad de evitar mezclar píxeles durante el análisis, lo cual puede influir de manera negativa en las gráficas obtenidas. Un problema que se presenta en estos estudios radica en los cultivos muy pequeños, ya que dependerá de una mejor resolución para tener gráficas con mejor representatividad. Por lo anterior, el uso de imágenes satelitales con una mayor resolución espacial (entre 5 y 10 metros) mejorará los resultados a obtener, ajustando de mejor manera los periodos altos para el monitoreo.

El proyecto está realizando un nuevo estudio de NDVI con el fin de actualizar el primer resultado del calendario agrícola para el primer y segundo periodo de monitoreo (julio-octubre y noviembre-febrero); así como, determinar con mayor precisión los meses altos del tercer periodo (marzo-junio). Estos nuevos resultados deberán verse reflejados en próximos estudios de monitoreo.

7.7. ETAPAS Y FLUJO DE TRABAJO PARA LA INTERPRETACIÓN DE CULTIVOS ILÍCITOS EN IMÁGENES SATELITALES

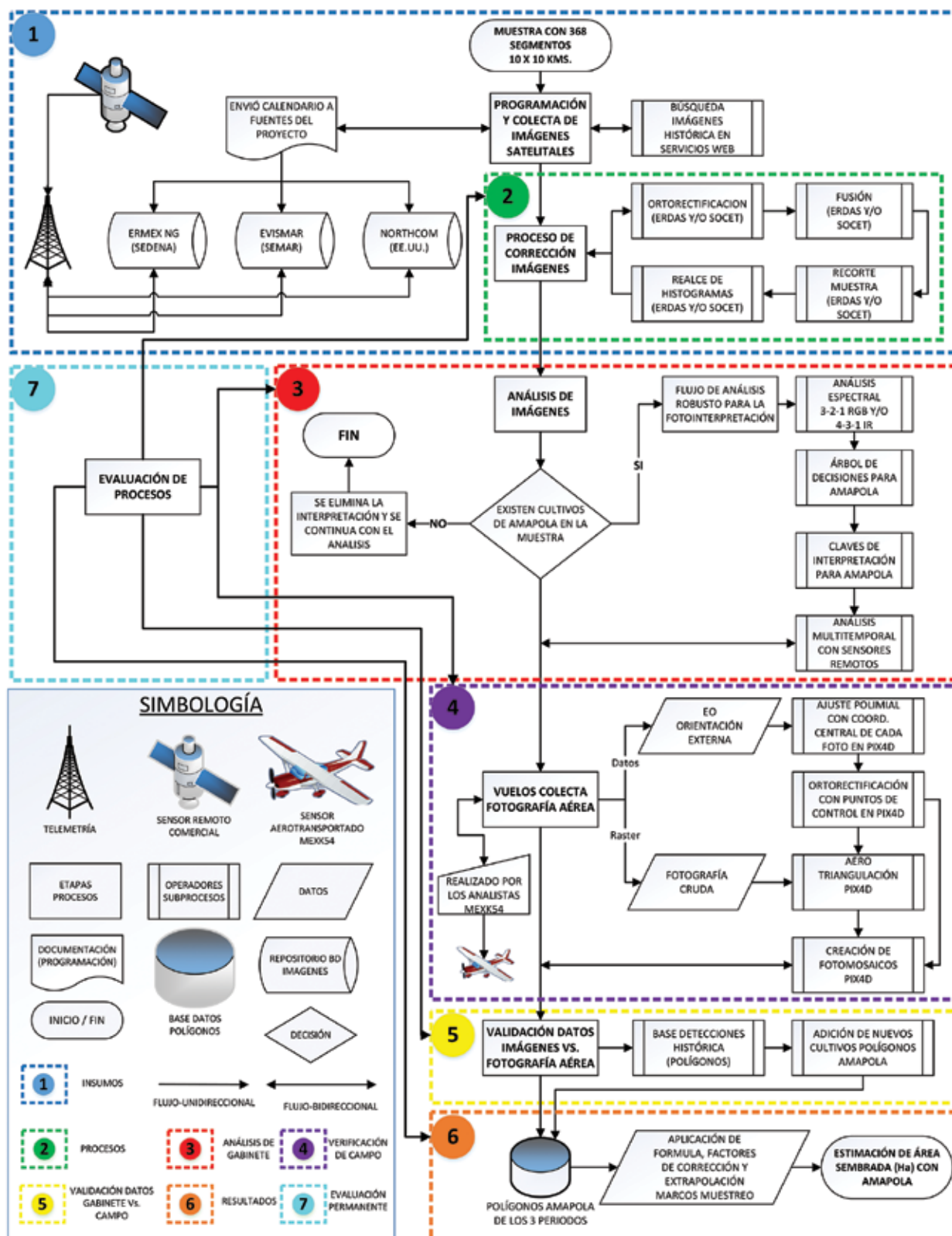
La metodología desarrollada para la interpretación de cultivos de amapola en el proyecto de monitoreo en México se compone principalmente de 7 etapas. La séptima etapa corresponde a una evaluación permanente de todas las etapas anteriores, aquí el grupo de analistas puede llegar a detectar debilidades de acuerdo a las técnicas aplicadas y que se tienen que mejorar en futuros estudios, dicha etapa es apoyada por expertos en el tema o universidades que colaboran en la búsqueda de nuevas tecnologías y/o métodos que coadyuven a la mejora continua de la metodología para el monitoreo actualmente aplicada.

Cada etapa aplicada cuenta con una serie de procesos, y cada una de estas etapas depende de la anterior para continuar con el ciclo del flujo de la metodología. A continuación, se explican los procesos de cada una de las etapas:

1. Insumos: solicitud y recepción de imágenes satelitales, búsqueda histórica de imágenes satelitales faltantes en la muestra, Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM), datos vectoriales (ríos, carreteras, cuerpos de agua, etcétera), muestra nacional de 368 segmentos de 10 x 10 Km.
2. Procesos: corrección a las imágenes satelitales (orto rectificación, fusión, recorte del segmento, realce de histogramas).
3. Análisis de gabinete (oficina): flujo de análisis robusto para la fotointerpretación de cultivos de amapola en imágenes satelitales, análisis espectral, árbol de decisiones para amapola, uso de claves de interpretación para amapola, análisis multitemporal con imágenes de diferentes sensores remotos, delimitación de los polígonos de amapola.
4. Verificación de campo: planes de vuelo en los segmentos seleccionados de (10 x 10 Km), verificación de la calibración de las cámaras digitales, instalación de plataformas metálicas en aeronaves, colecta de foto aérea vertical en los segmentos seleccionados de 10 x 10 Km, creación de fotomosaicos.
5. Validación de datos gabinete/campo: fotomosaicos, base histórica de detecciones, verificación de cultivos de amapola entre la imagen y los fotomosaicos, adición de nuevos polígonos de cultivos de amapola.
6. Resultados: creación de la base de datos (polígonos de amapola), aplicación de la fórmula estadística para la estimación de área (ha), aplicación de factores de corrección, extrapolación sobre los marcos de muestreo para la estimación de superficie sembrada final y cálculo del intervalo de confianza.
7. Evaluación de procesos: búsqueda de nuevas herramientas para la corrección y procesamiento digital a imágenes satelitales, asesoría para implementar nuevos métodos de interpretación (claves de interpretación, etcétera), evaluación de precisión para las fotointerpretaciones y delimitación de los polígonos (cultivos).

La aplicación de todas las etapas de la metodología con sus procesos incluidos se realizan para cada uno de los tres periodos cuatrimestrales del monitoreo. Finalmente, la estimación de superficie sembrada final es para 12 meses de monitoreo, abarcando desde julio 2014 hasta junio 2015. El flujo completo se muestra en la figura 7.

Figura 7. Diagrama de flujo del proyecto de monitoreo para cultivos ilícitos en México



7.8. IMÁGENES UTILIZADAS PARA EL MONITOREO

Para el monitoreo realizado en el estudio de julio 2014-junio 2015, se han utilizado imágenes multiespectrales y pancromáticas de los sensores ópticos: SPOT-6 y 7, World View-2, GeoEye-1, World View-3. Estas imágenes han sido fusionadas (pan-sharpened) para obtener imágenes a color y falso color con resoluciones espaciales que van desde 1.5 metros hasta 0.30 metros (foto 8) con 4 bandas en el espectro visible (VIS): roja, verde, azul e infrarrojo cercano (IRc) (ver anexo II).⁹ Adicionalmente, los cultivos detectados fueron validados con fotografía aérea de 0.25 metros de resolución. Cabe mencionar que la resolución de las imágenes Wordl View 3 y fotografía aérea permiten tener una mejor interpretación visual de los cultivos de amapola. En la tabla 6 se muestra el total de imágenes utilizadas en los análisis en cada periodo.

Foto 8. Tipos de resolución de las imágenes utilizadas para el monitoreo



Imagen SPOT 6 y/o 7



Imagen World View 2



Imagen Geo Eye 1



Imagen World View 3



Imagen Foto Aérea

Tabla 6. Cantidad de imágenes utilizadas por tipo de sensor sobre la muestra de 368 segmentos

Sensor	Resolución por pixel	Periodos analizados			Totales
		julio-octubre 2014	noviembre 2014-febrero 2015	Marzo-junio 2015	
SPOT 6	1.5 m	302	158	209	669
SPOT 7	1.5 m	0	167	156	323
WORLD VIEW 2	0.50 m	57	66	79	202
GEOEYE 1	0.40 m	0	24	2	26
WORLD VIEW 3	0.30 m	0	0	48	48
FOTO AÉREA	0.25 m	22	70	48	140
Totales		381	485	542	1,408

⁹ Anexo II. "Características de imágenes satelitales disponibles utilizadas en el proyecto".

Para poder coleccionar las imágenes satelitales en los periodos óptimos de la muestra en cada periodo de monitoreo que abarcó desde julio 2014 hasta junio 2015, se utilizaron las fechas de los periodos altos¹⁰ obtenidos en el estudio “Análisis de fechas para determinar los calendarios agrícolas (NDVI) utilizando series temporales de imágenes satelitales” para cada segmento y periodo analizado. Asimismo se coleccionaron imágenes de los diferentes sensores a los que el proyecto tiene acceso, con la finalidad de tener en su totalidad la muestra de 368 segmentos de 10 x 10 Km distribuidos sobre el país (tabla 7).

Tabla 7. Calendario para la colecta de imágenes satelitales

Áreas de colecta	Periodos		
	julio-octubre 2014	noviembre 2014-febrero 2015	marzo-junio 2015
Muestra con 368 segmentos de 10 x 10 Km	Picos altos del estudio NDVI		Promedios de los meses altos del análisis realizado al interior del proyecto.
		Picos altos del estudio NDVI	

Con el total de las imágenes satelitales y fotografías aéreas adquiridas para el periodo de julio 2014-junio 2015, solo se cubren las zonas de alta incidencia de cultivos de amapola dentro de los marcos de muestreo, con un área total de 103 100 Km², esta superficie representa 5.22% de la superficie continental total de México.

7.9. PROCESOS DE CORRECCIÓN Y MEJORÍA DE LAS IMÁGENES SATELITALES

El proceso de corrección de las imágenes satelitales utilizadas en la fotointerpretación de los cultivos ilícitos de amapola se compone de varias etapas con el fin de obtener un nivel de exactitud adecuado que permita eliminar el mayor grado de error posible para la ubicación de cualquier punto en tierra.

Para lo anterior, el analista deberá identificar las características y nivel de procesamiento de cómo las imágenes son entregadas por las diferentes fuentes que apoyan al proyecto, como puede ser: el tipo de sensor, el modo espectral, cantidad de bandas espectrales, su resolución espacial y temporal (véase el anexo III).¹¹

Todas las imágenes utilizadas en el proyecto fueron corregidas geométricamente (ortorectificadas) usando el Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) con una resolución vertical de 15 metros, este proceso se realizó con el software ERDAS Imagine v.2013 y/o SOCET GXP v.4x.

El flujo completo para la corrección aplicada a las imágenes satelitales comprende las etapas siguientes: ortorectificación de cada modo espectral (pancromático y multiespectral), fusión de ambos modos espectrales, recorte a la imagen al tamaño de la muestra (10 x10 Km) y arreglo de contrastes e histogramas. Finalmente, para realizar los análisis de fotointerpretación de los cultivos de amapola se usó la interface del software de Sistemas de Información Geográfica ArcGis v.10.2.

¹⁰ Cuando los cultivos de amapola se encuentran en su periodo fenológico óptimo (crecimiento) más alto entre la siembra y cosecha, temporalidad en la que se puede observar e interpretar el cultivo en las imágenes satelitales y/o fotografía aérea.

¹¹ Anexo III. “Descripción del sensor de tipo pasivo y/o satélites ópticos”.

7.9.1. Softwares utilizados para el procesamiento y análisis de las imágenes

El proyecto de monitoreo utiliza varios softwares comerciales para el procesamiento, corrección y análisis de los cultivos ilícitos, cada aplicación es empleada para un proceso específico y que está establecido dentro de la metodología aplicada, estos programas son los siguientes:

- a. **ArcGis:** Software aplicado a los Sistemas de información Geográfica (SIG), utilizado para el análisis de fotointerpretación en imágenes y fotomosaicos; y la creación de los polígonos de los cultivos interpretados para cada periodo de estudio.
- b. **Erdas Imagine:** Software de teledetección, utilizado en el procesamiento, realce de histogramas, y corrección digital (Ortorectificación) de las imágenes satelitales.
- c. **Global Mapper:** Software aplicado a los Sistemas de información Geográfica (SIG), programa utilizado para crear los planes de vuelo, donde se trazan las líneas de vuelo que serán introducidas al GPS aéreo y que se utilizara para la recolección de fotografía aérea en campo.
- d. **Pix4D Mapper:** Software aplicado a la fotogrametría y manejo de datos LIDAR; utilizado para el procesamiento y corrección digital de fotografías aéreas colectadas en trabajos de campo; obteniendo como producto final los fotomosaicos.
- e. **R-Statistics:** Software utilizado para el análisis estadístico y obtención de la superficie sembrada de cultivos ilícitos.
- f. **SOCET GXP:** Software de teledetección y análisis, donde los procesos que se realizan en el programa ERDAS son automatizados, lo que permite eficientar los tiempos en los procesos de corrección y análisis a las imágenes satelitales.

7.9.2. Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM)

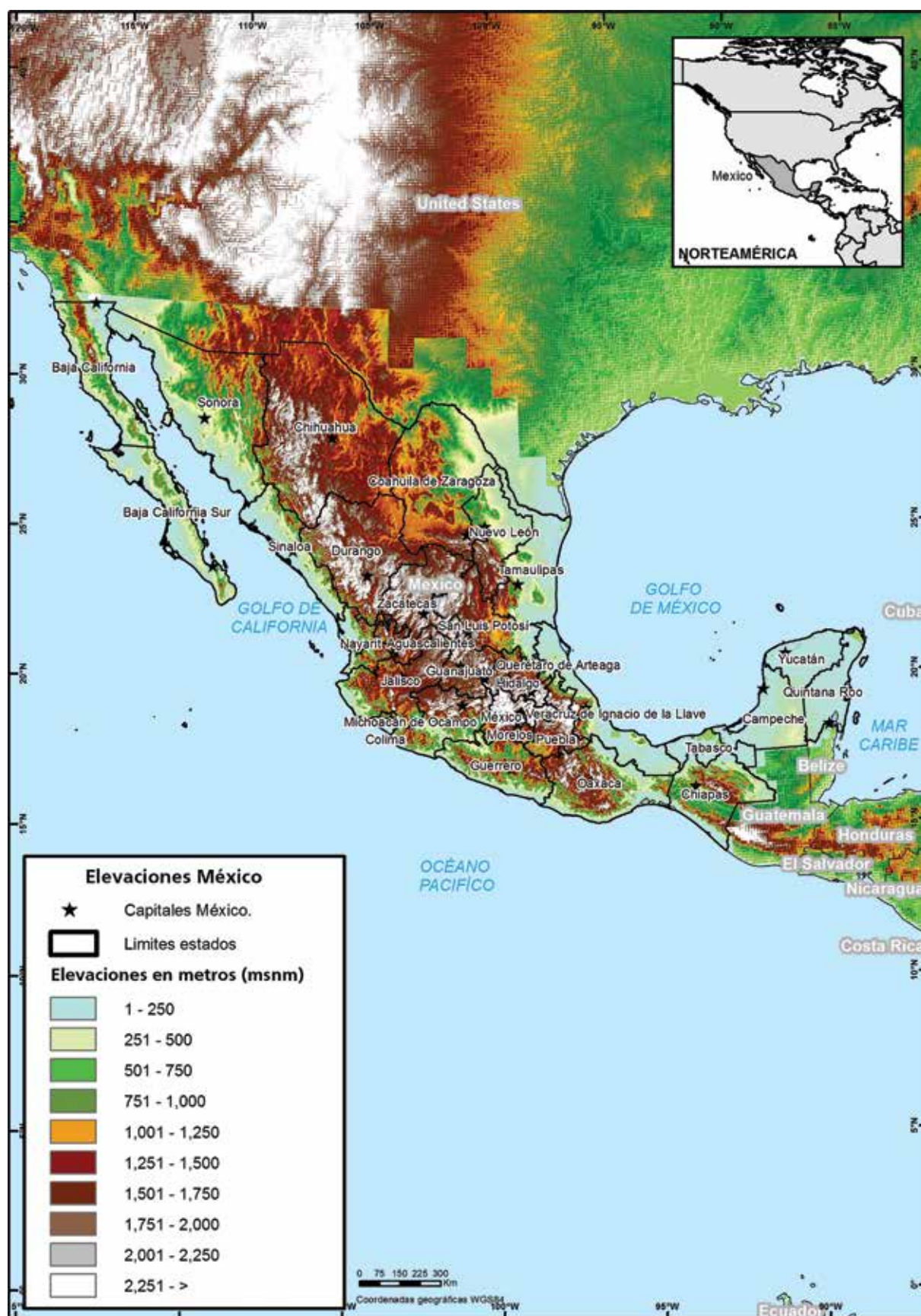
El Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0) fue utilizado para realizar la ortorectificación de las imágenes satelitales, este es un producto generado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) que representa las elevaciones del territorio continental mexicano (mapa 13), mediante valores que indican puntos sobre la superficie del terreno, cuya ubicación geográfica se encuentra definida por coordenadas (X, Y) a las que se le integran valores que representan las elevaciones (Z). Los puntos se encuentran espaciados y distribuidos de modo regular.

En el año 2012 se generó la versión 3.0 del CEM cuya característica principal es la resolución de 15 metros (las versiones anteriores tienen una resolución de 30 metros). Esta característica deriva en un producto con mayor detalle y por consiguiente más confiable para apoyar diversas tareas, esta versión se puso a disposición de los usuarios durante el año 2013 Las características del CEM se describen en la tabla 8.

Tabla 8. Características del CEM utilizado en el proyecto para la corrección de las imágenes satelitales

Características	Descripción
Año de publicación	2013
Resolución	15 m x 15 m
Valores de Z	Enteros positivos y negativos.
Unidades de Z	Metros.
Datos de referencia geodésica	El datum corresponde a ITRF92 época 1988.0, elipsoide GRS80, coordenadas geográficas.
Cobertura geográfica	Territorio continental de los Estados Unidos Mexicanos.
Error medio cuadrático	4.9 m
Medio de distribución	Principalmente por internet mediante el portal del INEGI. Se considera diversas opciones.
Formato de distribución	BIL (Banda entrelazada por línea). Forma Raster, para las descargas total del territorio y por entidad federativa. Formato TIFF (Tagged Image File Format) para las descargas por selección de área y carta respectivamente.
Software utilizado p/su generación	ArcGis 10.1

Mapa 13. Modelo del Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM)

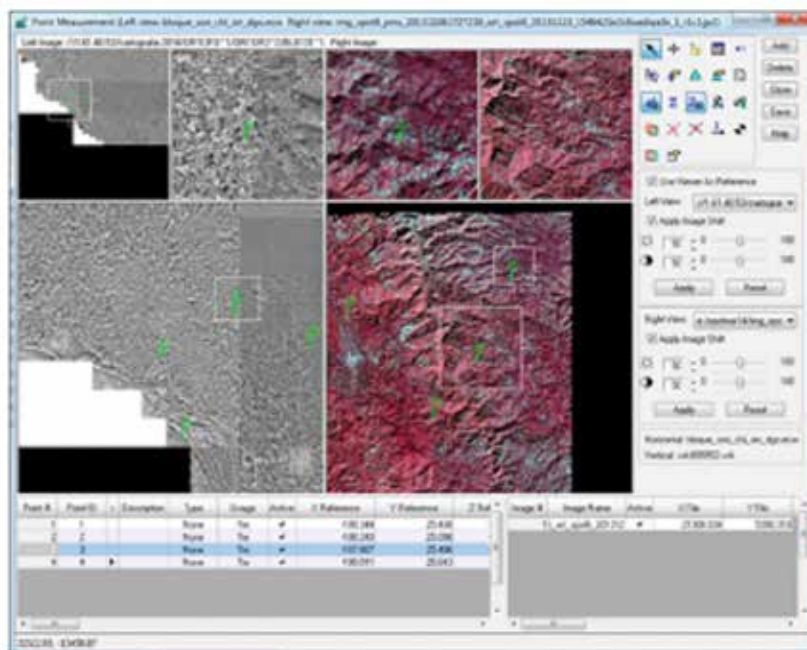


Fuente: Sistema de Monitoreo de Cultivos Ilícitos en el Territorio Mexicano-apoyado por UNODC.
Los límites y los nombres utilizados en este mapa no implican la aceptación oficial por parte de la Naciones Unidas.

7.9.3. Ortorectificación

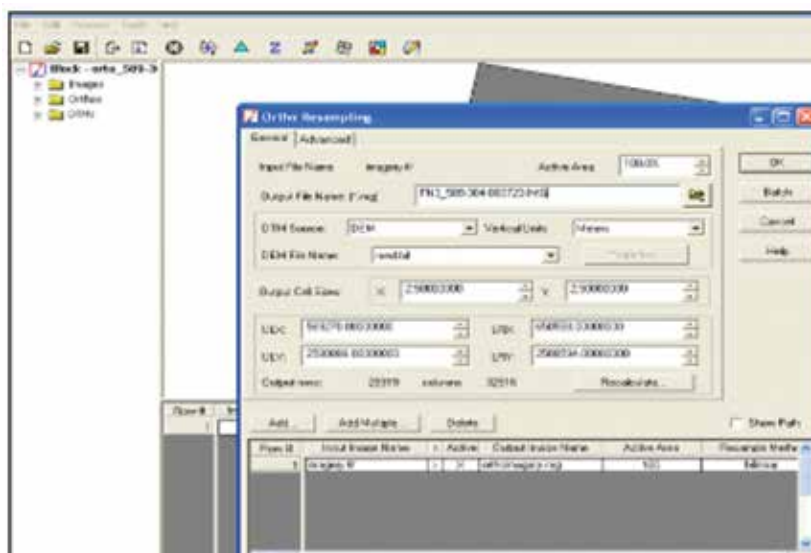
El proceso de ortorectificación se realiza con el software ERDAS Imagine v.2013, utilizando su herramienta LPS Project Manager (figura 8), los insumos de corrección que se utilizan en la imagen satelital son las ortofotos de 2 metros de resolución espacial que ajustarán la posición geográfica en los ejes de X, Y, y el Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) de 15 metros de resolución, para corregir el eje “Z” (altura MSNM), ambos son proporcionados por el INEGI. Se identifican rasgos que se denominan “puntos de control” en la ortofoto de base y se hacen coincidir con los rasgos geográficos de la imagen satelital, y con esto se reajustará toda la imagen que se está procesando.

Figura 8. Interface del software ERDAS Imagine para la ortorectificación



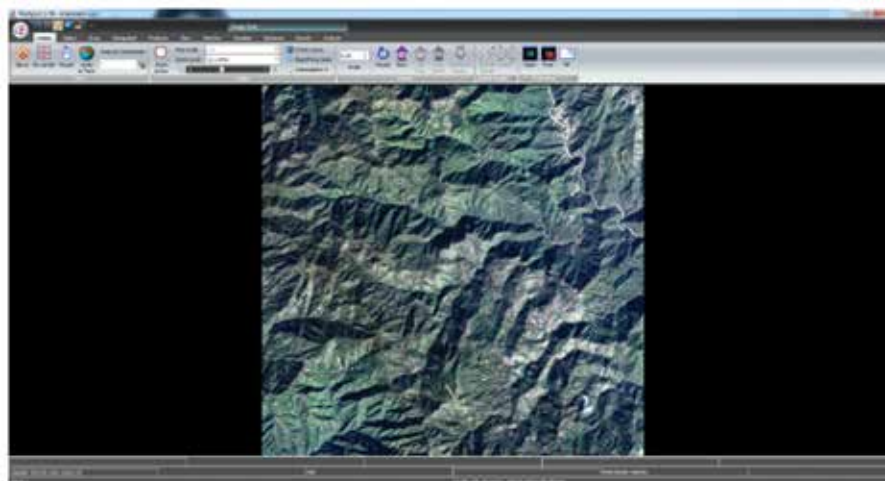
El proceso anterior se debe realizar dos veces, uno para la imagen pancromática (escala de grises) y otro para la imagen multiespectral (color). Finalmente, con el mismo software y con la herramienta Ortho Resampling, se ejecuta la ortocorrección a cada imagen (figura 9), una vez que se ha realizado el proceso de georreferencia anteriormente descrito.

Figura 9. Interface del software ERDAS Imagine para ejecutar la ortorectificación



Otra manera de realizar este proceso de ortorectificación es con el Software Socet GXP ver. 4.x, que permite un resultado final en menor tiempo que con el software ERDAS Imagine, ya que con Socet el proceso es automático y tiene la característica de desplegar desde su librería el CEM; cualquier imagen puede ser desplegada para georreferenciarla en automático y adicionalmente puede ser analizada en su mismo visualizador, como se muestra en la figura 10.

Figura 10. Interface del software Socet GXP para la ortorectificación



En Socet GXP, con la herramienta Orthorectify, se realiza el proceso de ortorectificación, guardando el archivo de la nueva imagen corregida.

7.9.4. Fusión de las imágenes

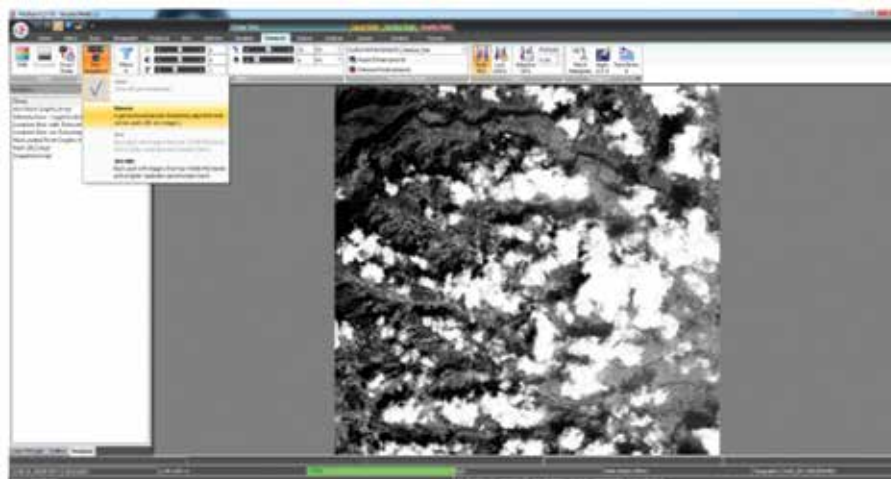
En el proceso de fusión se unen las imágenes pancromáticas y multiespectrales, lo que nos da como resultado una imagen a color con la resolución de la imagen pancromática, que es la imagen con mayor resolución. Se utiliza el software ERDAS Imagine v.2013, con la herramienta Subtractive Resolution Merge, (figura 11) donde se introduce la imagen multiespectral (MS) y la pancromática (Pan) y finalmente se asigna un nuevo nombre y formato de salida de la imagen.

Figura 11. Interface del software ERDAS Imagine para realizar la fusión de las imágenes



Para el proceso de fusión con el software Socet GXP ver. 4.x, se cargan las dos imágenes y con la herramienta Pan Sharpen-Brovey se fusionan ambas imágenes “al vuelo”; es decir, en el visualizador del programa, esto permite analizar la imagen, mientras el proceso de la nueva imagen se guarda de forma independientemente (figura 12).

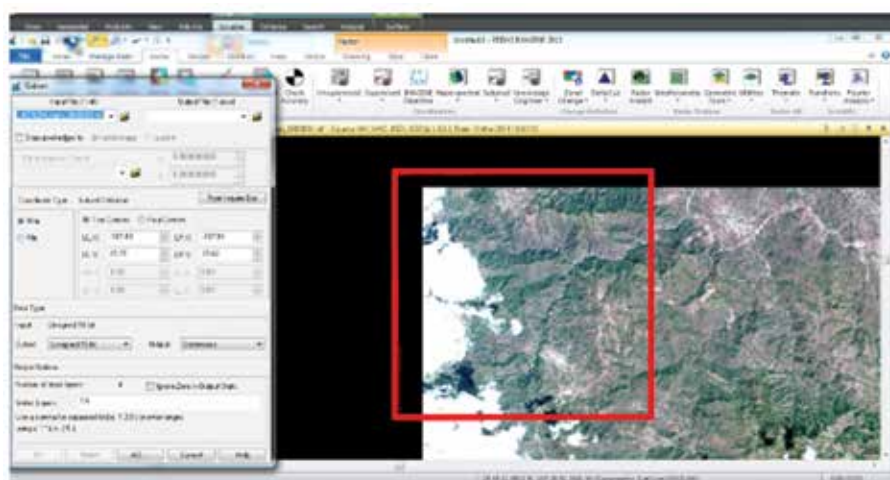
Figura 12. Interface del software Socet GXP para realizar la fusión de las imágenes



7.9.5. Recorte de las imágenes

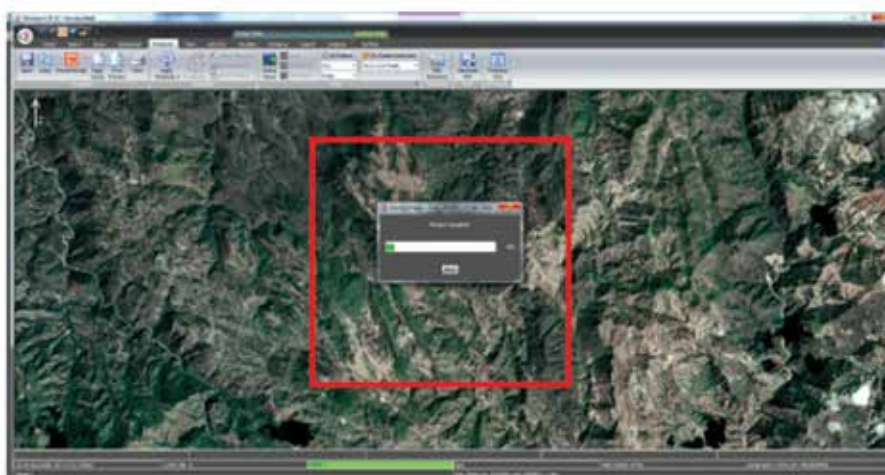
Cuando la imagen está georreferenciada, ortorectificada y fusionada, deberá ser recortada de acuerdo al área de interés únicamente, de acuerdo con los segmentos elegidos de la muestra establecida. En ERDAS Imagine v.2013, se agregará el polígono de la celda elegida sobre la imagen y, mediante la herramienta “Subset”, se indicará el área a la imagen que se desea recortar para obtener la imagen de 10 x 10 Km (figura 13).

Figura 13. Interface del software ERDAS y área de recorte de la imagen para cada segmento



Adicionalmente, con el software Socet GXP ver. 4.x, se puede ahorrar tiempo en estos procesos, ya que al hacer la fusión se puede realizar el recorte guardando la imagen en un archivo nuevo que se procesara tomando en cuenta los dos procesos al mismo tiempo (figura 14).

Figura 14. Interface del software Socet, realizando la fusión y recorte de una imagen al mismo tiempo



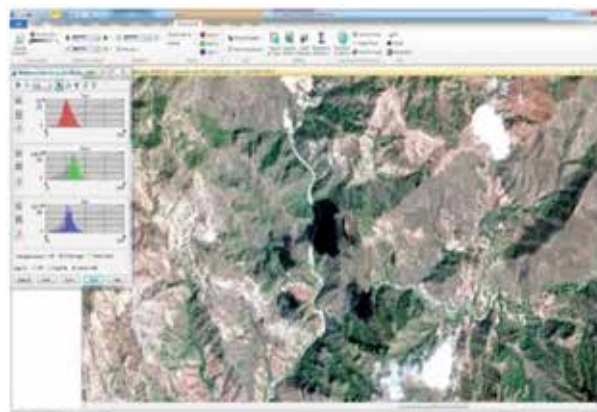
7.9.6. Realce de sus histogramas

Por último, se hace un arreglo de contrastes para una óptima visualización de la imagen evitando brillos y sombras. En ERDAS Imagine v.2013, desde la pestaña multispectral se abre la ventana de los breakpoints y se arreglan las bandas adecuadas al tipo de sensor que se está trabajando, así como el ajuste en los histogramas en RGB de las diferentes bandas que contiene la imagen (figura 15).

Figura 15. Interface del software ERDAS y el realce de los histogramas manual



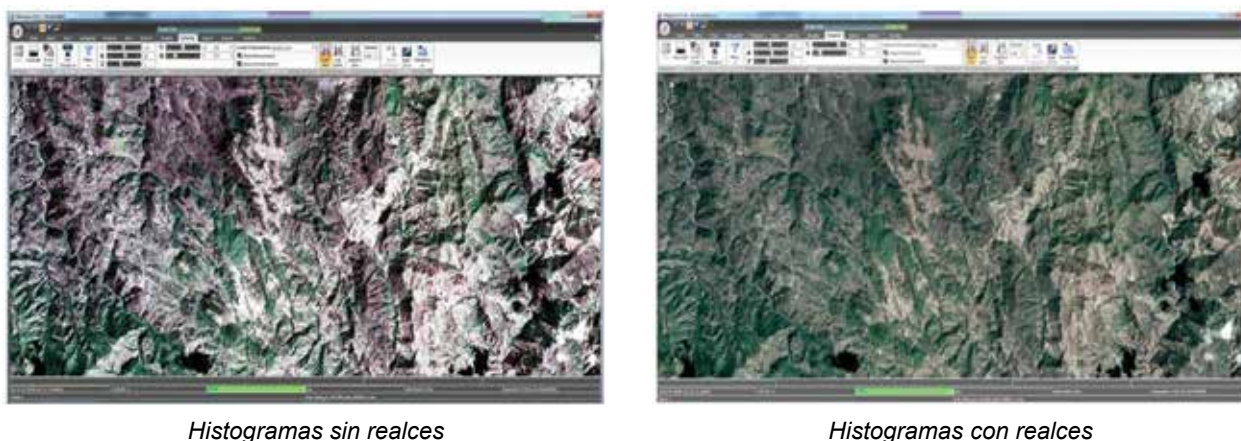
Histogramas sin realces



Histogramas con realces

Con el software SOCET GXP ver. 4.x, se puede realizar un arreglo a los histogramas de forma automática con la herramienta AutoDRA, esto a diferencia del software ERDAS permite ahorrar tiempo en el arreglo de los histogramas y, por ser automático con el algoritmo del mismo programa, ofrece un mejor realce de los objetos y/o cultivos que se perciben en la imagen (figura 16).

Figura 16. Interface del software SOCET y el realce de histogramas automático



Histogramas sin realces

Histogramas con realces

7.10. FOTOINTERPRETACIÓN Y MEDICIÓN DE CULTIVOS DE AMAPOLA CON IMÁGENES SATELITALES

La fotointerpretación consiste en localizar sistemáticamente los sitios ocupados por amapola dentro de los segmentos seleccionados en la muestra, discriminándolos de la vegetación natural, de parcelas que contienen cultivos legales, o de sitios ocupados anteriormente de manera histórica, pero que no han sido sembrados en el momento del muestreo.

La forma más práctica y productiva de llevar a cabo la fotointerpretación de los cultivos es a través de imágenes satelitales, estas permiten identificar o visualizar rasgos geográficos en proceso de cambios que ocurren en el área observada. Adicionalmente, se puede extraer la posición geográfica de los objetos o cultivos de amapola detectados; analizar su relación espacial con el entorno geográfico que existe entre ellos; realizar mediciones de distancias, área de los terrenos y las elevaciones (msnm) a la que se encuentran.

Los resultados de los cultivos de amapola interpretados en las imágenes satelitales deben ser validados con fotografía aérea obtenida mediante trabajos de campo, esto permite verificar la exactitud de la fotointerpretación de las parcelas de amapola en la muestra.

Al realizar los trabajos de campo, la certeza de las detecciones en la imagen satelital sobre los sembrados es muy alta, dado que en la fotografía aérea se observan datos importantes tales como el tipo de plantas presentes, si se trata de un monocultivo o si existen varias especies mezcladas e incluso si el cultivo se encuentra en diferentes etapas fenológicas.

El trabajo de campo también permite identificar la presencia de cierta vegetación debajo de los cultivos formados por arbustos o árboles, estos pueden ocasionar sombras al interior de la parcela de amapola sembrada.

De acuerdo con la experiencia del grupo de técnicos y analistas del proyecto, los cultivos de amapola presentan características importantes para su identificación, como el color del follaje, su textura, la forma de las parcelas y la relación de su ubicación con el entorno geográfico (ríos, acceso limitado, etcétera), lo que hace que su foto interpretación sea más precisa.

Se ha observado que en etapas tempranas o tardías en el desarrollo fenológico del cultivo, se puede provocar confusión con pastizales o con otro tipo de vegetación natural; sin embargo, otros datos importantes son considerados para ayudar en la identificación de estos cultivos, estos indicios de interpretación adicional son adquiridos y proporcionados por la experiencia de los analistas con mayor experiencia que ayudan a identificar los cultivos en las diferentes etapas fenológicas y que a la vez los analistas de menor experiencia empiezan a aprender.

Por lo anterior, una parte importante de los analistas con mayor experiencia es la transferencia de estos conocimientos a los de menor experiencia y que adicionalmente complementan el conocimiento para la fotointerpretación con las visitas en campo a cultivos de amapola que se realizan de manera frecuente.

Cada analista cuenta con una serie de métodos adicionales para fotointerpretar los cultivos de amapola en las imágenes satelitales o fotografías aéreas, como el “Flujo de trabajo robusto para la fotointerpretación de cultivos de amapola en imágenes satelitales, árbol de decisiones para cultivos de amapola y claves de interpretación para cultivos de amapola”, métodos explicados en los próximos capítulos (7.10.1 al 7.10.3).

También la fotointerpretación visual de los cultivos de amapola es realizada en las imágenes satelitales en las dimensiones 2D y 3D, esto permite a los analistas tener una mejor perspectiva sobre la forma, inclinación y orientación de la pendiente y características del entorno geográfico donde se ubica el cultivo, logrando una mayor exactitud la interpretación, aunque esto signifique una mayor cantidad de trabajo y tiempo destinado para el análisis de un imagen satelital o fotografía aérea (foto 9).

Por otra parte, en los análisis de fotointerpretación se ha observado que no todos los sitios se siembran con amapola en cada periodo cuatrimestral y que algunos son abandonados por uno o dos años y que aparecen otros cultivos en nuevas ubicaciones o en algunos de estos no se siembra toda su superficie de la parcela con el enervante.

Foto 9. Análisis de fotointerpretación de amapola en imagen Geo Eye-1 (VHR)



Visualización en 2D

*Visualización en 3D*

En lo correspondiente a la medición, las parcelas que resultan positivas para cultivos de amapola durante la identificación son delimitadas trazando polígonos dentro de un sistema de información geográfica (SIG), arrojando datos inmediatos sobre su fecha de interpretación (toma de imagen), ubicación geográfica, tipo de cultivo, perímetro y superficie (ha). Posteriormente, la información de cada uno de los cultivos será utilizada durante el análisis estadístico para la estimación de superficie sembrada en el contexto nacional.

Cabe mencionar que para la delimitación de los cultivos existen criterios estandarizados entre los analistas y técnicos, lo anterior con el fin de evitar que pudiera presentarse una sobrestimación o subestimación durante el cálculo de estimación de área final de la superficie sembrada por los cultivos. La estandarización de estos criterios son utilizados de manera constante como parte de la metodología. Existen imágenes donde se detectan cultivos que presentan un porcentaje de ocultamiento por presencia de nubes, sombras, o cultivos que solamente tienen una parte de la parcela sembrada, para esto se utilizan diferentes imágenes con diferentes fechas de adquisición para tener una correcta fotointerpretación de los cultivos.

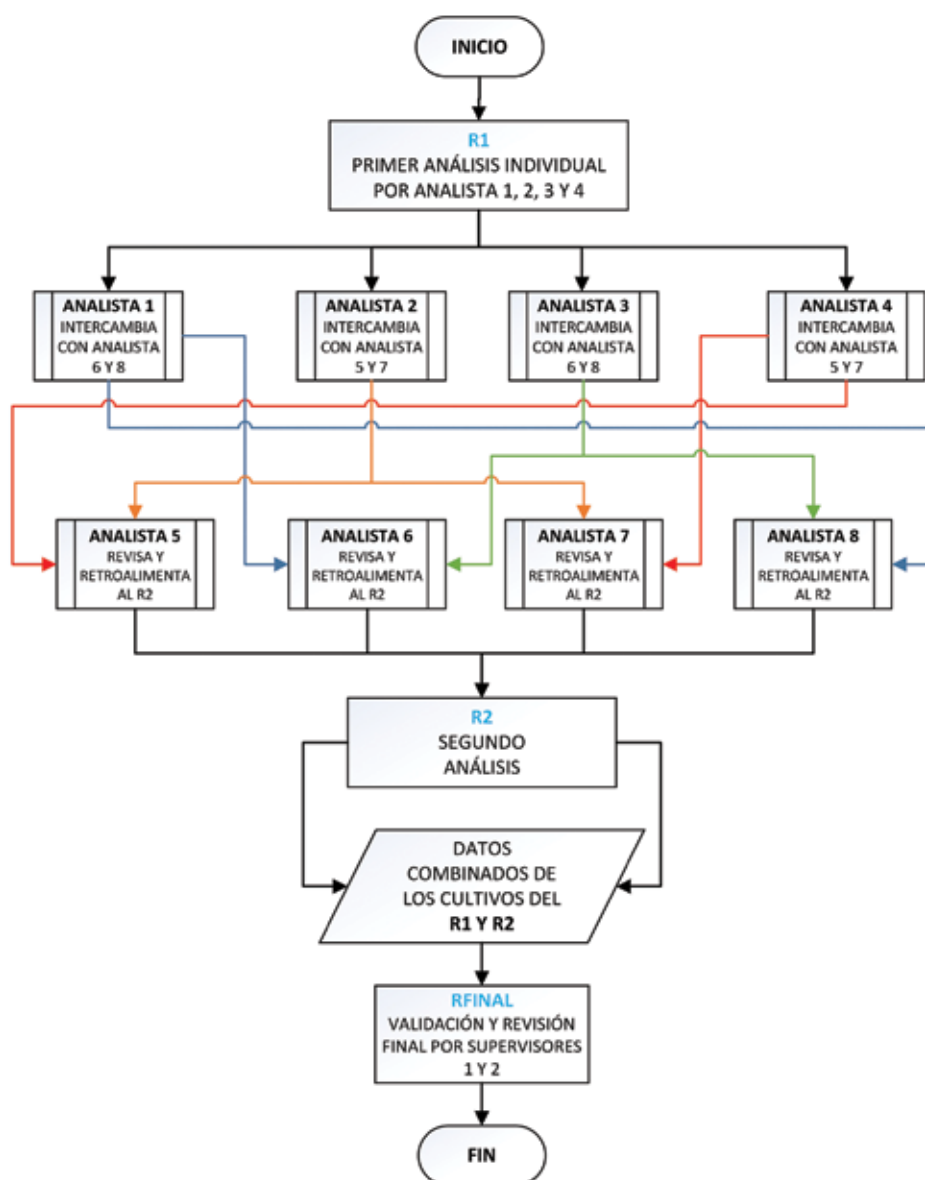
7.10.1. Flujo de trabajo robusto para la fotointerpretación de cultivos de amapola en imágenes satelitales

El grupo conformado por los diez analistas implementó un flujo de trabajo robusto y de intercambio de las imágenes analizadas para la fotointerpretación de los cultivos de amapola (figura 17). Este flujo robusto disminuye la subjetividad que puede presentarse en cada analista al momento de realizar los análisis en la fotointerpretación (detección) de cultivos de amapola.

El grupo de analistas para cumplir con el flujo robusto establecido, considera lo siguiente:

1. Se realiza una primera revisión denominada “R1” a las imágenes disponibles por el primer grupo de cuatro analistas (1, 2, 3 y 4).
2. Los resultados del R1 se intercambian con el segundo grupo de analistas (5, 6, 7 y 8) y se efectúa una segunda revisión denominada “R2” tomando como base los cultivos interpretados en el R1.
3. Con los datos de los cultivos combinados R1 + R2, se realiza una revisión final a la que se le llamo “RFINAL” por los supervisores (1 y 2) quienes son el filtro final por ser los más expertos del grupo.

Figura 17. Flujo de trabajo robusto para la fotointerpretación de imágenes satelitales



7.10.2. Análisis espectral mediante la combinación de bandas en las imágenes satelitales

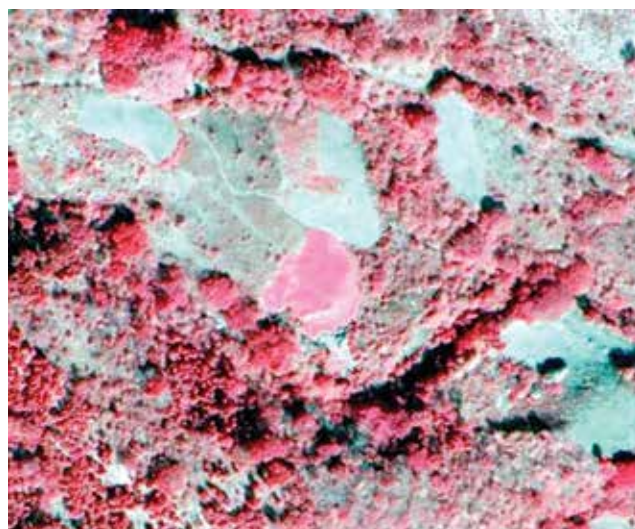
Un video RGB representa las imágenes a través de la composición de tres señales rojo (R=red), verde (G=green) y azul (B=blue). Las imágenes satelitales multiespectrales pueden ser reproducidas por video asociando arbitrariamente cualquiera de sus bandas a las tres señales de una pantalla RGB. Si se utilizan las bandas con las mismas longitudes de onda de los colores de la pantalla se obtienen imágenes en color natural. De contrario, si a las señales RGB de la pantalla se le asocian bandas diferentes, por ejemplo con la longitud de onda del infrarrojo, se obtienen las imágenes en color falso (en el caso del ejemplo también llamadas imágenes en color infrarrojo). Un método común de reproducir las imágenes multiespectrales para identificar la vegetación durante la interpretación visual consiste en asociar la banda del infrarrojo cercano (IRc) a la señal rojo (R) de la pantalla y la banda del rojo a la señal verde (G).

Con lo anterior, la interpretación de los cultivos de amapola se realiza mediante un análisis espectral de combinación de bandas a las imágenes satelitales, con el objetivo de discriminar los rasgos geográficos u otros tipos de vegetación circundante a los cultivos de amapola, estas características se pueden obtener utilizando las combinaciones espectrales en RGB y IRc como se observa en la foto 10.

Foto 10. Cultivo de amapola detectado en imagen VHR, con combinación de bandas en RGB e IRc



Color natural (RGB)



Color infrarrojo (IRc)

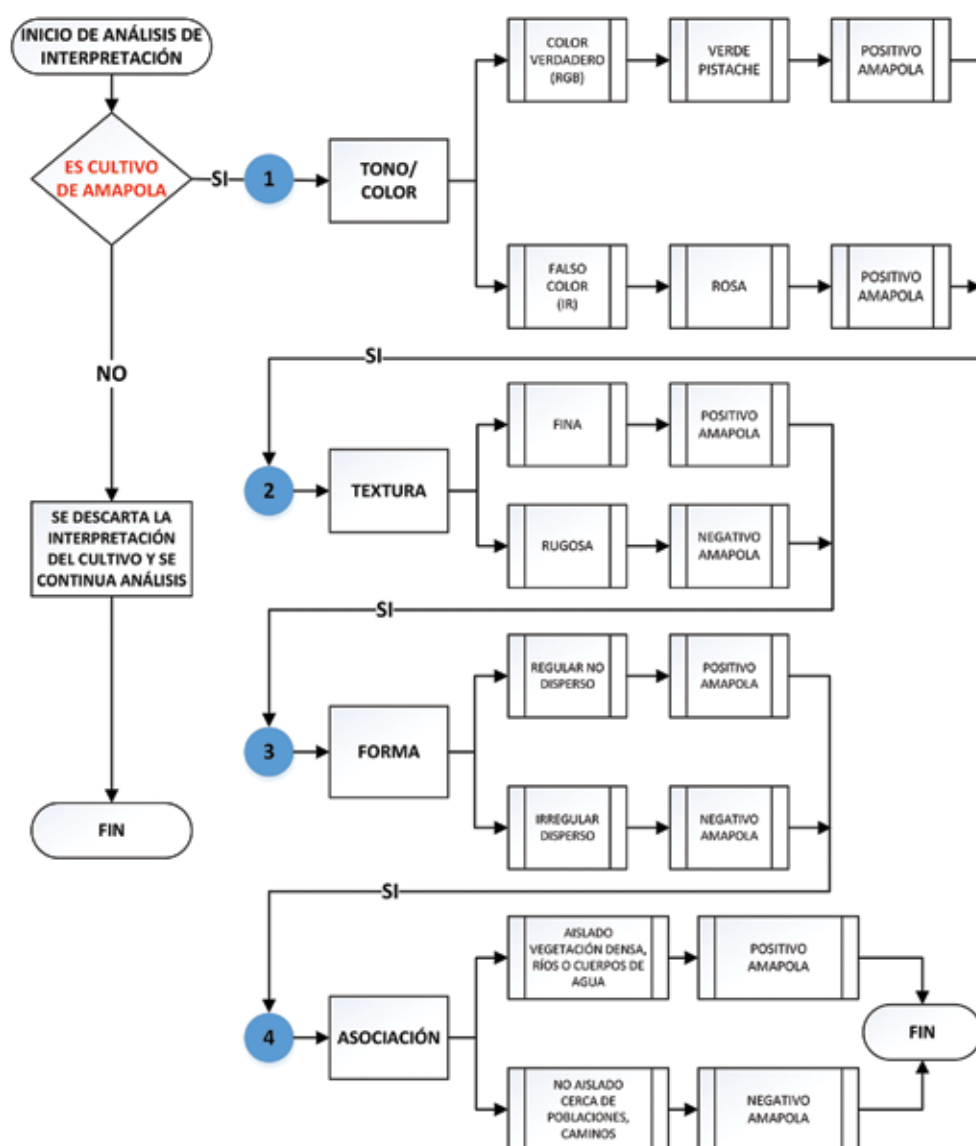
7.10.3. Árbol de decisiones para cultivos de amapola

Dentro de los métodos y criterios que utiliza el grupo de analistas del proyecto se encuentra un “Árbol de decisiones para cultivos de amapola”, con el objetivo que dentro del proceso de foto-interpretación se cumpla con cuatro principales criterios, que establecen “**Sí/No**” es cultivo de amapola, estos criterios utilizados son:

1. tono/color,
2. textura,
3. forma
4. asociación del entorno geográfico donde se ubica el cultivo

El proceso de análisis ha sido estandarizado por el grupo de analistas con base en la experiencia que han obtenido mediante los trabajos de oficina y campo, de esta manera se determinan las detecciones de los cultivos de amapola existentes en las imágenes satelitales y/o fotografías aéreas (figura 18). Los cultivos y sus características obtenidas son insumos utilizados en la creación de las claves de interpretación (explicación en el próximo capítulo), estas claves se encuentran dentro de una biblioteca organizada para las tres grandes regiones del país (Norte, Centro y Sur).

Figura 18. Flujograma del árbol de decisión para determinar los cultivos de amapola

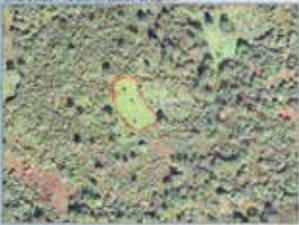





7.10.4. Claves de Interpretación y su uso en cultivos de amapola

El objetivo principal de la elaboración de las “Claves de Interpretación” es hacer que la fotointerpretación de los cultivos de amapola obtenidos mediante la percepción remota sea la más objetiva y transparente posible, estandarizando el conocimiento y la experiencia del grupo de analistas al utilizar un sistema lógico que homogeniza los resultados de las interpretaciones. Cabe mencionar que estas claves son apoyadas con la información obtenida del “Árbol de decisiones para plantíos de amapola”; sin embargo, las claves contienen información más detallada de otros aspectos como: región, estado, municipio, localidad, coordenada geográfica central del cultivo, forma del cultivo, sensor utilizado, superficie en hectárea, etapa fenológica, observaciones, entre otros datos; dichos aspectos ayudan a reforzar todas las categorías posibles de los cultivos a interpretar, adicionalmente se incluyen rasgos característicos de las imágenes satelitales y de la fotografía de campo a diferentes escalas de visualización (figura 19).

Las “Claves de interpretación” son una herramienta importante para los análisis de cultivos ilícitos y de la región a la que pertenecen, utilizando imágenes de satélite y fotografías aéreas como el insumo principal para su creación. Las claves son guías útiles para la identificación y descripción de los objetos interpretados de manera homogénea por los analistas del grupo. El estudio de monitoreo ha creado y utilizado estas claves para los cultivos de amapola.

Figura 19. Ejemplo de una clave de interpretación para cultivos de amapola

CLAVE DE INTERPRETACIÓN				
ID_IMAGEN	FQ174 JK 121120 po 10 08210 200		ID	AM0002IKRS
REGIÓN	SUR		SENSOR	IKONOS
ESTADO	GUERRERO		LATITUD	17°44'44.00"N
MUNICIPIO	AJUCHITLAN DEL PROGRESO		LONGITUD	100°38'28.28"W
LOCALIDAD	CHILACAYOTE		ALTITUD (msnm)	1860
RASGOS DE INTERPRETACIÓN				
TIPO	AMAPOLA		FECHA IMAGEN	20-11-2012
FORMA	RECTANGULAR		SUPERFICIE (HA)	0.35
TAMAÑO	MEDIANO		DENSIDAD	ALTA
TONO/COLOR			ETAPA	MADURO-JOVEN
TEXTURA	INTERMEDIA		FENOLOGÍA	BOTON
ASOCIACIÓN	VEREDA + VEGETACIÓN DENSA		INTERPRETE	TODOS
OBSERVACIÓN GABINETE	SE DETECTO CULTIVO DE AMAPOLA			
OBSERVACIÓN CAMPO	SE OBSERVO EL CULTIVO EN FOTO DE CAMPO EN ETAPA DE MADURACION DE CAPSULA EL 13-01-2013			
IMAGEN A ESCALA: 1:1,500				
				
IMAGEN A ESCALA: 1:5,000				
				
FOTOGRAFIA CAMPO				
				
UBICACIÓN CULTIVO				
				
FECHA DE ELABORACIÓN: 26/02/2013				

Fuente: MEXK54

7.10.5. Análisis multitemporal con sensores remotos

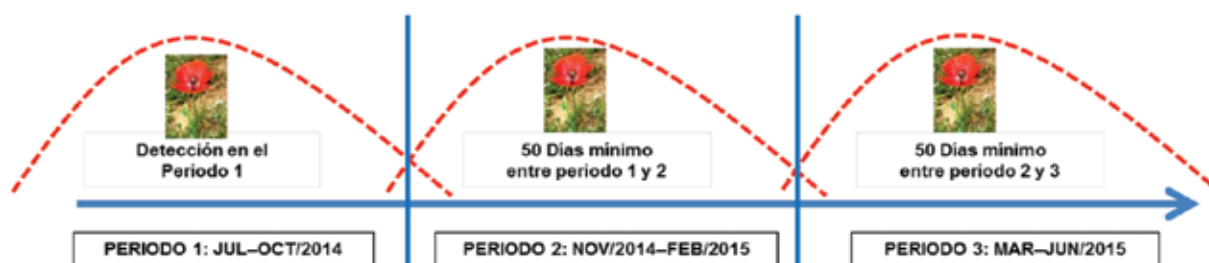
Para cada periodo en las áreas de monitoreo se pueden tener imágenes satelitales de los segmentos de la muestra establecida con diferentes fechas de adquisición y tipo de sensor, de igual forma se adquieren fotografías aéreas verticales de los mismos segmentos.

Estas imágenes son los insumos utilizados para llevar a cabo un análisis multitemporal que se refiere a la revisión/detección de los cultivos de amapola en las imágenes de diferente fecha de adquisición, lo que permite una comparación y discriminación precisa de cultivos repetidos entre las imágenes satelitales y/o fotografía aérea.

Para realizar este tipo de análisis entre los tres periodos de estudio y no detectar los mismos cultivos de amapola ubicados sobre un mismo terreno y posible etapa de crecimiento, el grupo de intérpretes tiene establecido un criterio de “temporalidad” entre los periodos analizados (cultivos detectados), con una diferencia de 50 días como mínimo entre la fecha de colecta de las imágenes disponibles (figura 20), considerando la siguiente información para este tipo de análisis:

- Para analizar el periodo 1: julio-octubre 2014, se utilizó la base de datos de detección histórica del proyecto del periodo septiembre 2012-febrero 2013.
- Para analizar el periodo 2: noviembre 2014-febrero 2015, se consideraron las detecciones obtenidas en el periodo 1.
- Para analizar el periodo 3: marzo-junio 2015, se consideró las detecciones obtenidas en el periodo 2.

Figura 20. Esquema de la temporalidad utilizada entre los periodos de análisis



Fuente: MEXK54

Los cultivos de amapola pueden estar presentes o no de un periodo a otro, también en este tipo de análisis se ha observado que pudieran estar sembrados en periodos contiguos y existir un cambio en sus dimensiones sembradas como se muestra el ejemplo de la foto 11.

Foto 11. Ejemplo de cultivos de amapola interpretados en diferente periodo de análisis



Periodo 1: julio-octubre de 2014.



Periodo 2: noviembre 2014-febrero de 2015



Periodo 2: noviembre 2014-febrero de 2015



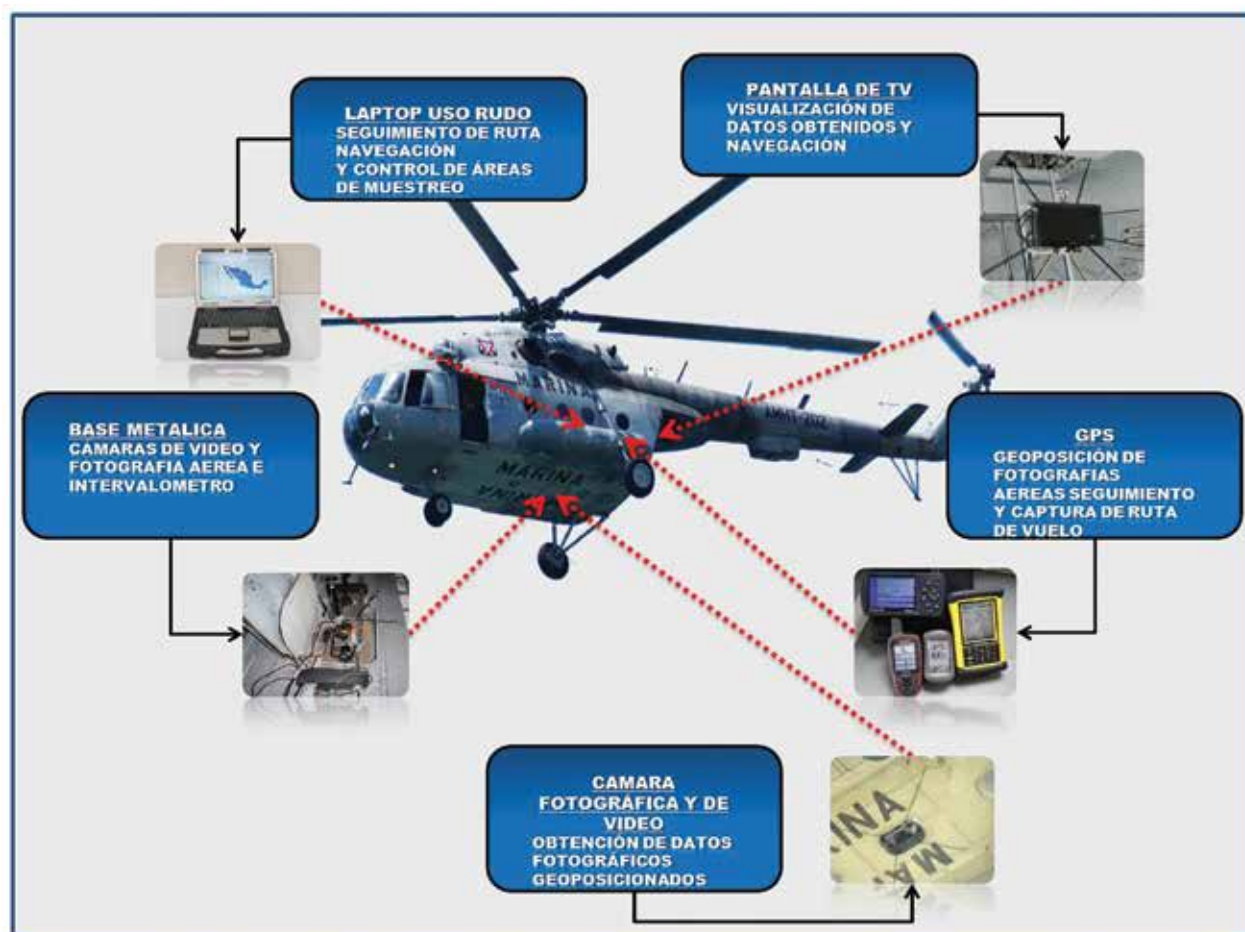
Periodo 3: marzo-junio de 2015

7.11. VUELOS DE VALIDACIÓN CON FOTOS AÉREAS (TRABAJOS DE CAMPO)

El proyecto cuenta con datos de campo que permiten evaluar y validar la información obtenida de los análisis de oficina, con esta información se compara el margen de error en la medición de área y el trazado de los polígonos de cada cultivo. La información de fotografía aérea obtenida en trabajos de campo permite adquirir información en las celdas de muestreo donde no se cuenta con imágenes satelitales ya que en ocasiones los satélites no pueden coleccionar la información por condiciones de nubosidad u órbita fuera del área de interés.

Se han establecido dentro del flujo de trabajo el procesamiento, la interpretación y el aprovechamiento en esquemas de muestreo, como son: validación (verificación de campo) para evaluar la precisión de la interpretación de imágenes satelitales de muy alta resolución; realización de los muestreos en forma de cuadrantes a una determinada medida, transectos o búsquedas dirigidas para obtener de manera directa estimaciones de la densidad y tipo de cultivos que tengan validez dentro de zonas específicas; monitoreo y revisita de áreas previamente identificadas, que no solo permita validar la superficie de los cultivos a través de imágenes satelitales, si no también entender la dinámica natural y social del uso del suelo y las etapas de desarrollo de los cultivos.

Figura 21. Ejemplo de la distribución de los equipos utilizados en helicóptero para trabajos de campo



Fuente: MEXK54

7.11.1. Cámaras digitales de formato pequeño con sensor visible e infrarrojo utilizadas en los vuelos de fotografía aérea

Los levantamientos de fotografía aérea vertical son obtenidos con cámaras digitales réflex de formato pequeño, con una resolución de 36.8 millones de píxeles en el espectro visible (VIS) con un rango de espectro de 400 a 750 nm, y para el espectro infrarrojo cercano (IRc) con un rango del espectro de los 800 a 1 100 nm, esta última cámara tiene una conversión completa en su sensor a infrarrojo para obtener imágenes con las mismas características que la visible.

La modificación del sensor también da como resultado que su sensibilidad se extienda hacia el ultravioleta, este tipo de espectro pudiera ser aprovechado para fines forenses, ya que removiendo el filtro del infrarrojo como producto de la modificación, la cámara capta todo el espectro desde el ultravioleta hasta la zona del IRc mencionada en el párrafo anterior. Aunque el objetivo para el cual el sensor de la cámara fue modificada es la toma de imágenes aéreas para la identificación de algunos cultivos en el espectro infrarrojo cercano.

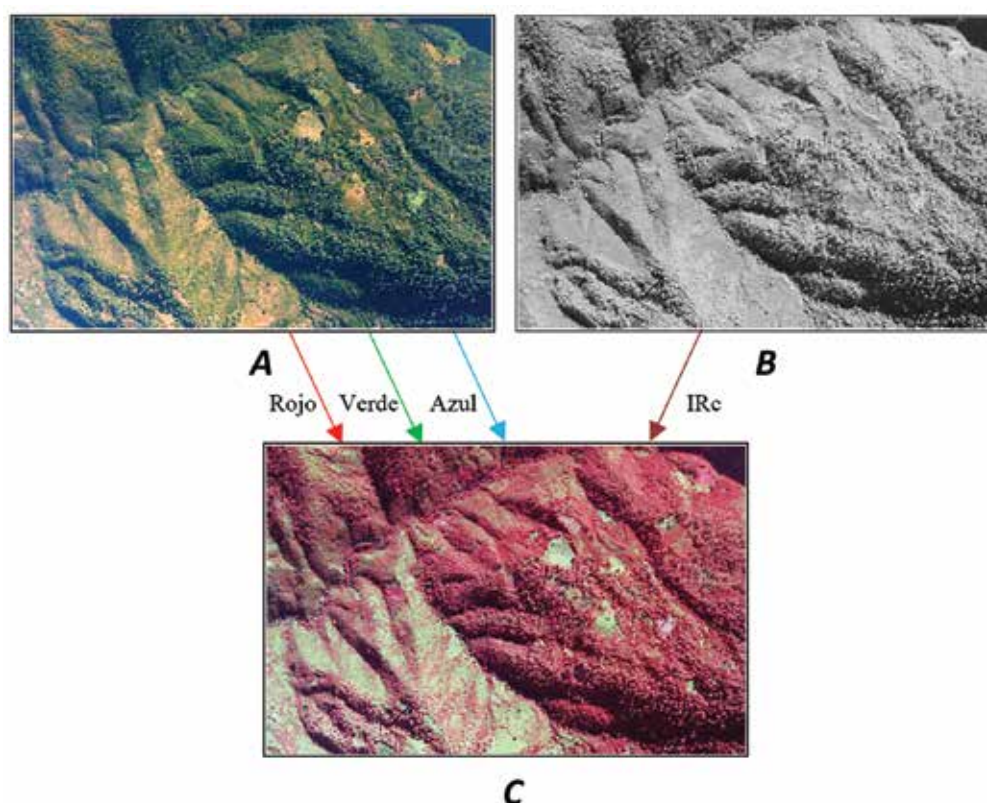
Adicionalmente, se coloca frente al lente de 35 mm, utilizado en la cámara un filtro que elimina completamente los espectros visible y ultravioleta. Las especificaciones técnicas de la cámara se muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Características de la cámara digital réflex

Descripción	Característica
Profundidad del color	Color 36 bits
Tipo de sensor	CMOS
Total de píxeles	36.8 millones de píxeles totales
Resolución eficaz del sensor	36.3 millones de píxeles
Tamaño del sensor	35.9 mm x 24 mm
Factor de recorte de campo de visión (respecto de un negativo de 35mm)	1.0 Tamaño completo
Sensibilidad a la luz	ISO 100 -6400 Lo-1 (ISO 50) Hi-1 (ISO 12 800) Hi-2 (ISO 25 600)
Procesador de imágenes	EXPEED 3
Efectos especiales	Neutro, Vivo, monocromo
Velocidad máxima del obturador	1/8000 seg.
Velocidad mínima del disparador	30 seg.
GPS	Unidad GPS GP-1.

Las fotografías adquiridas por ambas cámaras (VIS e IRc) se toman de manera simultánea para que las imágenes visibles obtenidas coincidan con las infrarrojas. De esta manera se facilita la unión o fusión de las bandas del espectro visible e infrarrojo cercano en un solo archivo de imagen donde coinciden pixel a pixel con esto es posible realizar operaciones de clasificación de los diferentes tipos de vegetación en la imagen. También se puede visualizar la fotografía aérea en falso color o hacer distintas combinaciones en función de los rasgos geográficos de interés que apoya a la fotointerpretación de cultivos de amapola (foto 12).

Foto 12. A) Imagen visible (RGB). B) imagen en el infrarrojo cercano (IRc) y C) imagen compuesta en falso color, integrada por una combinación de las bandas visibles y la infrarroja cercana



7.11.2. Calibración del sensor de la cámara digital

La calibración del sensor de las cámaras digitales permiten realizar tomas fotográficas aprovechando todas las capacidades técnicas de la cámara a las altitudes que se realizan los vuelos fotogramétricos, citados sensores electrónicos son muy estables y no cambian significativamente su geometría frente a cambios de temperatura y vibración.

Generalmente, estos sensores están instalados de manera firme durante su fabricación, por lo que no se requiere que queden colocados con una precisión micrométrica en el cuerpo de la cámara. Por otro lado, se debe tener cuidado que para fines fotogramétricos, el desplazamiento de algunos píxeles tiene un efecto notable en la calidad de su ortocorrección y esto ocasionaría mediciones erróneas realizadas sobre los fotomosaicos.

Si consideramos que un píxel tiene una dimensión física de alrededor de 5 micras por lado, resulta evidente que cambios mínimos en la posición del sensor tienen un efecto importante en la calidad final. Sin embargo, es posible determinar su posición respecto del eje óptico del lente bajo un modelo matemático que permite tener un resultado óptimo y de muy alta precisión. Al proceso anterior se le conoce como calibración del sensor de la cámara.

Las cámaras digitales en general son susceptibles a perder esta calibración en su sensor debido a que se utilizan lentes intercambiables o que el montaje del sensor no es rígido, por lo que la configuración geométrica del sistema electro-óptico, puede variar entre las posiciones del lente y del sensor, esto puede ser causado por cambios de temperatura, vibración, desgaste de las bridas de montaje de los lentes (roscados o de bayoneta) y otros factores.

Entonces, es de gran importancia revisar la calidad visual de las fotografías antes de cada trabajo de campo para mantener o hacer las re-calibraciones necesarias para tener un buen resultado final. En la siguiente fotografía 13 se muestra un ejemplo de una imagen con su sensor sin calibración y con calibración.

Foto 13. Comparación del sensor con ajustes de calibración



Sensor sin calibración (imagen pixelada)



Sensor con calibración (imagen suave)

Por otra parte, las cámaras construidas específicamente para uso aerofotogramétrico utilizan los mismos sensores que las comerciales, generalmente de entre 30 y 60 millones de píxeles, pero están instalados en cuerpos más rígidos maquinados con gran precisión; en algunas de ellas se utilizan arreglos de varios sensores, o grupos de dos o más cámaras individuales cuyas imágenes son fusionadas digitalmente. Estos sensores se consideran equipos de alta precisión y el fabricante incluye un certificado de calibración, cuya renovación requiere devolver periódicamente el equipo para reajustarlo y recalibrarlo, a diferencia de las cámaras digitales utilizadas en el proyecto que no incluyen este tipo de certificado.

El uso de sensores aerofotogramétrico es para cumplir con tareas o productos específicos como el catastro, trazos de carreteras o líneas de energía y algunos casos para cartografía oficial de alta precisión. Para obtener una alta calidad en los productos mencionados anteriormente, se utilizan los parámetros determinados en el certificado de calibración, donde se describe la orientación interior de la cámara, incluyendo:

- La distancia focal del lente
- El punto principal de la cámara (posición del eje óptico en el sensor)
- La distorsión radial del lente

Para el caso del sensor de las cámaras digitales utilizadas en el presente trabajo, la calibración puede lograrse midiendo las diferencias entre la proyección de la imagen a cualquier objeto lejano enfocado, estos detalles pueden ser identificables y medidos en las tres dimensiones, y la posición de esos mismos píxeles en la matriz de la imagen digital resultante. Adicionalmente, se puede utilizar fotografías aéreas de las zonas a fotografiar para las cuales se conoce exactamente la posición geográfica de los píxeles en X, Y y Z de los rasgos del terreno. Con lo anterior, podemos determinar las diferencias y deformaciones debidas al desplazamiento del eje óptico y a la distorsión radial del lente utilizado.

7.11.3. Funcionalidad del intervalómetro

El intervalómetro es un equipo que permite llevar a cabo el disparo de una o más cámaras digitales, en un tiempo determinado, usualmente el intervalo es de algunos segundos (foto 14). En este caso, el uso principal de este equipo es para la colecta de fotografía aérea en los trabajos de campo. Las cámaras deben apuntarse hacia debajo de manera vertical en la estructura previamente conformada para la colocación de las cámaras utilizadas y de manera sincronizada mencionadas cámaras son controladas por el intervalómetro, obteniendo fotografías tomadas de manera sucesiva, las cuales tendrán una sobreposición entre cada foto tomadas dependiendo el intervalo de tiempo que se esté utilizando.

Foto 14. Intervalómetro utilizado en los trabajos de campo



La sobreposición es factor importante a considerar, ya que con esto se obtiene una correcta aerofototriangulación, la cual da origen a las ortofotos o fotomosaicos y a modelos de elevación. El proyecto utiliza el programa denominado Pix4D Mapper, este software requiere contar con un mínimo de 60% de sobreposición entre fotos; sin embargo, si las fotografías cuentan con una sobreposición de 80% los resultados serán más exactos. Por lo anterior, es importante utilizar el intervalo de disparo calculado antes del vuelo, y se requiere ajustarlo en función de la velocidad de la aeronave sobre el terreno.

El intervalómetro utilizado por el proyecto de monitoreo, se basa en un diseño propio del Instituto de Geografía de la UNAM el cual cuenta con un circuito integrado que puede entregar un pulso electrónico con características de salida, utilizado como referencia en el momento que se disparan las cámaras digitales, se adquiere el dato de coordenada del receptor GPS aéreo, sincronizando así la localización geográfica de la fotografía tomada. El uso del intervalómetro permite colocar con su reóstato¹² integrado un valor de intervalo de tiempo inicial y hacer ajustes posteriores que permitan mantener la sobreposición de las fotografías deseada. Cabe mencionar, que al existir viento a favor o en contra, es necesario familiarizarse con la posición de este reóstato y su relación con el tiempo de disparo, aproximadamente por cada vuelta se aumentan 4 segundos, como se muestra en la tabla 10.

Tabla 10. Relación del número de vueltas y cantidad de disparos por segundo

Numero de vueltas (reóstato)	Cantidad de segundos aproximado
0	1
1	5
2	9
3	13
4	17
5	21
6	25
7	29
8	33
9	37
y hasta 10	41

7.11.4. Geolocalización de la fotografía aérea digital

Conocer la geolocalización de las fotografías aéreas es importante para el análisis de los cultivos de amapola; es decir, la posición de la cámara y aeronave en el espacio en el momento de la toma, esta geolocalización es definida por sus coordenadas geográficas horizontales (x, y) y su altitud (z), y se requieren para llevar a cabo varias funciones indispensables posteriores al vuelo. Por mencionar algunas, permite rápidamente obtener su geolocalización, verificar cuál es el cubrimiento del levantamiento de todas las fotografías aéreas colectadas y crear una foto-índice digital como referencia de las áreas que están en el análisis.

La georreferencia se obtiene de receptores GPS aéreos que registran internamente los metadatos completos del recorrido de la aeronave y además envían estos datos en formato NMEA-0183 a las cámaras.

¹² Componente eléctrico para regular la intensidad de la corriente sin necesidad de abrir el circuito y que consiste en una resistencia eléctrica con pulsos electrónicos que pueden variarse a voluntad.

Los metadatos son grabados en el encabezado de cada fotografía de manera interna en el momento de la toma, estos datos son la latitud, longitud, altitud y parámetros determinados en la cámara como: el ISO, velocidad del obturador, calidad y tipo de archivo de la fotografía (JPEG, RAW o TIF), entre otras.

El registro almacenado en la memoria interna del GPS contiene todas sus efemérides como: las coordenadas, la elevación y la hora de cada posición registrada durante el vuelo, que son determinados a intervalos seleccionables por el usuario y que pueden ir desde un intervalo de 1 segundo (1 hz) hasta varias horas. También se guarda información de velocidad, rumbo del desplazamiento y distancia recorrida entre posición geográfica del intervalo registrado.

En el caso de la geolocalización de fotografías aéreas se recomienda registrar a cada segundo. Este registro interno sirve como un respaldo para el caso de que la posición grabada en las cámaras presente inconsistencias o fallas del registro de los datos, de otra manera puede utilizarse cualquier software que permita etiquetar las fotografías con su geolocalización utilizando los datos del recorrido del GPS, haciendo coincidir la hora del registro del GPS y la hora del reloj de la cámara. Estos GPS también son utilizados para la navegación durante el vuelo, ya que permiten visualizar las líneas del plan de vuelo y el recorrido realizado (figura 22).

Los GPS aéreos utilizados para el presente trabajo introducen directamente los datos de posición geográfica del GPS en las cámaras digitales, enviándolos a baja velocidad y por medio de su puerto USB a alta velocidad; sin embargo, este tipo de puerto no fue compatible con el adaptador utilizado en el sistema desarrollado para el proyecto, es por ello que no se cuenta con el adaptador capaz de transferir a la cámara los datos de geolocalización provenientes del GPS a través del puerto USB.

Por lo anterior, como una opción alterna fue la conexión directamente de la señal del GPS a las cámaras, con la limitante de falta de robustez, sensibilidad, la necesidad de utilizar antenas externas, no tener la visualización de mapas, líneas de vuelo y registro del recorrido, como el desempeño de un GPS aéreo. En consecuencia, se realizó una configuración especial de cables para la comunicación de los GPS aéreos a las cámaras digitales, logrando la geolocalización de cada fotografía aérea tomada, además de tener la capacidad de control los disparos de desde el intervalómetro, lo que asegura que la señal introducida en las cámaras por los puertos del GPS aéreos sean datos a 4 800 bits/segundo, estos son de alta precisión en la geolocalización enviada a través de la preparación del cableado antes mencionado.

Los datos de la geolocalización central contenida en cada fotografía son necesarios para que el programa Pix4D Mapper pueda llevar a cabo la aerotriangulación, la producción de ortomosaicos y de modelos digitales de elevación y/o superficie. Para mejorar la exactitud de la geolocalización de cada fotografía que conformaron los fotomosaicos, fue conveniente incorporar al software utilizado al menos 5 puntos de control terrestre obtenidos de ortofotos corregidas. Este software puede también incorporar puntos de control determinados en campo con receptores GPS con corrección diferencial.

Figura 22. Ejemplo de navegación del GPS aéreo



7.11.5. Uso de plataformas metálicas con especificaciones aéreas

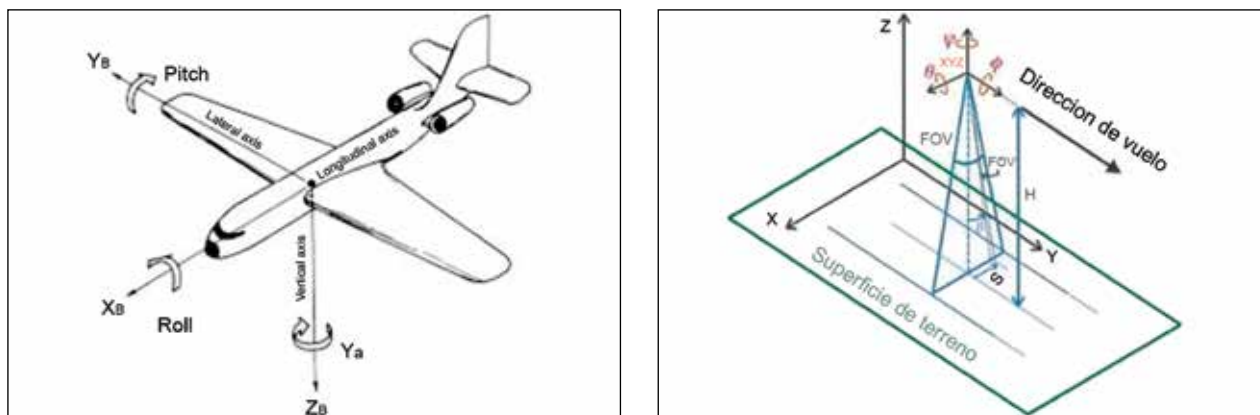
La función principal de las plataformas metálicas es el soporte de todos los equipos necesarios para la obtención de las fotografías aéreas; sin embargo, no solamente sirve para la fijación de las cámaras u otros dispositivos en la aeronave ala fija o móvil, el equipo instalado puede ser dirigido en la dirección deseada, que generalmente es hacia el nadir.

El resto de los componentes del sistema, tales como el intervalómetro y las interconexiones con receptores GPS aéreos, tienen el propósito de automatizar la toma de fotografías con su geolocalización, garantizando que los levantamientos fotográficos sean consistentes, completos y que los datos obtenidos sean susceptibles de ser procesados en fotomosaicos de manera rápida y precisa.

Una fotografía aérea vertical consta de nueve elementos de orientación, seis corresponden a la orientación externa y tres a la interna. Los elementos de orientación externa se dividen en transversales y rotacionales, estos son ocasionados por la misma aeronave; los primeros son del plano, x , y , z , que corresponden a la latitud, longitud y altitud; los segundos, ϕ , ω , κ , corresponden a los movimientos de cabeceo, alabeo, guiñada o deriva respectivamente como se muestra en la figura 23.

Estos movimientos de la aeronave deben minimizarse, ya sea a través de un vuelo “estable y nivelado” o por medio de mecanismos incluidos en las plataformas metálicas para lograr una correcta orientación y estabilización de las cámaras. Los movimientos son conocidos como elementos de orientación interna, los cuales tienen que ver con el manejo de las cámaras, por lo tanto es más fácil tener conocimiento y control de ellos; estos son: la distancia principal o focal calibrada de la cámara y el punto principal que se desplaza en el plano x , y . Estos últimos corresponden a los coeficientes de deformación radial por el tipo de lente que es utilizado. Sin embargo, el uso de plataformas metálicas aerotransportadas y estabilizadas reduce las desviaciones de los tres primeros (x , y , z) de la orientación externa.

Figura 23. Elementos de la orientación exterior de la cámara; esta está definida por el ángulo en los tres ejes de giro y por su posición x , y , z en una proyección cartográfica y un datum de referencia



Otra desviación es la deriva o giro de la imagen sobre el eje vertical, producida cuando el eje de la aeronave no está alineado con la dirección del vuelo ocasionado por los vientos cruzados; aun cuando no se apliquen métodos fotogramétricos, corregirla durante el vuelo facilita el trabajo posterior en tareas como la construcción de los fotomosaicos.

Existen otras funciones que deben cumplir las plataformas metálicas aerotransportadas; por ejemplo, la reducción de la vibración de la aeronave y la protección de las cámaras contra condiciones ambientales extremas de temperatura, humedad, lluvia, polvo e impactos. Para minimizar estos factores, se han desarrollado, dentro del Instituto de Geografía de la UNAM, varias formas de instalación de las cámaras, así como la fabricación de plataformas inicialmente especializadas que han evolucionado con base en la experiencia, con una facilidad de construcción, transporte, instalación y control.

En cuanto a la instalación de las cámaras se ha aprovechado la existencia de registros o herrajes presentes en algunas aeronaves para ubicar en ellos cámaras de formato pequeño, permitiendo la utilización de aviones y helicópteros no especializados (ver figuras 17 y 18); aunque es muy importante no interferir con los sistemas de navegación y electrónica de la aeronave, ni alterar su aerodinámica.

Algunos aviones pequeños y la mayoría de los helicópteros no especializados están certificados para volar sin una o más puertas, facilitando así la instalación de las plataformas metálicas. A pesar de la apariencia sencilla de estas instalaciones, estas permiten obtener imágenes de alta calidad y productos métricos con una exactitud aceptable, si el vuelo se realiza adecuadamente. Otra opción para evitar el alabeo y las desviaciones internas y externas a lo largo de las líneas de vuelo, es contar un dispositivo llamado “unidad de medición inercial”, que registra todas las efemérides (movimiento de orientación interna y externa) aun cuando el uso de la plataforma sea manual, con estos datos se puede compensar la deriva y demás desplazamientos en la fotografía aérea colectada.

Uno de los esquemas utilizados en las plataformas metálicas del proyecto fue el de permitir el control de las cámaras digitales utilizadas durante el vuelo, ya que es importante mantener el acceso a sus controles y opciones que permitan adecuar la velocidad de disparo del obturador, ajuste sobre el ISO que permite tener fotografías más claras u oscuras del terreno fotografiado, entre otros ajustes que se requieran.

Por otra parte, la mayoría de las cámaras digitales actuales permiten tener este control y ajustes desde la computadora; así como la transferencia directa de las imágenes colectadas al disco duro. Además, en la computadora utilizada se pueden desplegar mediante un SIG los datos GPS aéreo para la navegación. La pantalla del GPS puede ser utilizada para la navegación del piloto y con su memoria interna guardar el recorrido del vuelo. Del mismo modo, es posible monitorear las fotografías de la cámara desde una pantalla portátil (TV) y realizar ajustes de sobreposición en las fotografías al realizar los disparos por medio del intervalómetro electrónico.

También se han construido plataformas metálicas de tipo cápsula que pueden ser utilizadas al exterior de un helicóptero, estas permiten también la instalación de dos cámaras digitales tipo réflex, con o sin estabilización. Este tipo de plataforma que sostiene a las cámaras cuenta con amortiguación con resortes y material viscoelástico, y la orientación puede lograrse remotamente por medio de actuadores eléctricos; y además, es posible acoplarla a un sistema inercial para estabilizarla automáticamente. Para hacer reversible esta plataforma y reducir el arrastre ocasionado por los vientos, se usaron perfiles aerodinámicos idénticos tanto adelante, como atrás y fijada de manera manual con ligas elásticas tipo “bungee” (foto 15).

Foto 15. Plataforma con adaptación exterior para aeronave ala móvil (helicóptero) tipo cápsula



7.11.6. Diseño, características e instalación de las plataformas metálicas, e integración de un sistema aerotransportado para la adquisición de fotografía aérea digital para el proyecto

El presente proyecto de monitoreo en México tuvo la necesidad de utilizar plataformas metálicas sobre un registro al interior de las plataformas aéreas (fuselaje), donde se adaptara una cámara visible y/o un par visible e infrarroja en una placa metálica común con su zapata de acoplamiento para garantizar que los dos lentes siempre apunten en la misma dirección, aun cuando las cámaras se desmonten en repetidas ocasiones. Esta placa se instala también en los contenedores externos junto con una articulación esférica multidireccional.

En este sentido, se diseñaron y se integraron dos sistemas aerotransportados independientes para la adquisición de fotografía aérea vertical con la capacidad de adquirir fotografías en el espectro visible (VIS) e infrarrojo cercano (IRc), cada fotografía tomada contiene integrado el atributo de la coordenada central (geolocalización), el sistema cuenta adicionalmente con capacidad para capturar video oblicuo en cualquier dirección, esto le permite al proyecto aumentar la eficiencia en trabajos de campo en paralelo incrementando la capacidad de cubrimiento de las áreas de monitoreo.

La condición más importante en el diseño de estas plataformas es la verticalidad del eje de toma o del eje óptico del sistema, pues es un requisito indispensable para aplicar el método de aerotriangulación. Para que el material sea aceptable, la fotografía tomada no debe tener un ángulo de inclinación mayor a 5°; pero en general, con estos sistemas se pueden obtener imágenes con sólo 3° o menos de ángulo de inclinación.

La versión que fue construida en un inicio para el proyecto de monitoreo de cultivos ilícitos sirve para instalar dos cámaras (visible e infrarroja) en una aeronave de ala móvil (helicóptero MI-17), tiene un perfil aerodinámico simétrico de bajo arrastre y control de orientación en tres ejes por medio de una sola palanca, con un solo punto de apoyo basado en una articulación esférica (fotos 16 y 17).

En versiones previas se utilizaron sistemas de varias palancas para corregir alabeo, cabeceo y deriva desde el interior de la aeronave, pero eran pesados y mecánicamente complicados, por lo que se remplazaron con este sistema, que permite corregir los tres ejes con una sola palanca que se diseñó para ser instalada rápidamente y de forma segura en aeronaves no especializadas sin necesidad de hacer modificaciones estructurales a la aeronave.

El control de las cámaras y el almacenamiento de datos se hacen desde el interior de la aeronave. Las placas que contienen las cabezas para el apuntamiento en tres ejes pueden montarse en diversas configuraciones de estructura, con o sin amortiguadores de neopreno, por lo que adaptarlas a otras aeronaves es un proceso rápido y sencillo.

También se construyó una segunda estructura, para la adaptación de la plataforma en aviones de ala fija específicamente para los aviones Pilatus PC-6 PORTER (fotos 16 y 18), que cuentan con una escotilla de gran tamaño en su fuselaje (piso), con dos compuertas con las que puede mantenerse cerrado o puede abrirse durante el vuelo; asimismo, esta estructura puede ser adaptada de manera muy sencilla en aeronaves de tipo CESSNA, entre otras.

Los criterios utilizados para su diseño y construcción fueron, entre otros:

1. Colocar las cámaras en dirección nadir, permitiendo movimientos angulares en los tres ejes para apuntarlas y compensar los movimientos de alabeo, guiñada y deriva de la aeronave.
2. Mantener unidas y apuntando en la misma dirección dos cámaras; por ejemplo, una visible y otra infrarroja, formando un paquete compacto.
3. Facilitar el acceso a los controles y menús de configuración de las cámaras antes y durante el vuelo, así como hacer las conexiones, revisarlas y resolver fallas.
4. Facilidad de construcción y replicación.
5. Modularidad y facilidad de intercambiar componentes.
6. Seguridad en la sujeción y en la integridad de los componentes, redundancia en los dispositivos de fijación.
7. Independencia de los sistemas de la aeronave para no afectar sus características aeronáuticas, operativas y de seguridad.
8. Reducción de la vibración y de impactos durante el despegue/aterrizaje.
9. Uso mínimo de herramientas para su instalación.
10. Practicidad de transporte e instalación fácil e intuitiva.

Para diseñar las plataformas metálicas utilizadas en el proyecto, se tomaron las dimensiones de las escotillas disponibles de las aeronaves a utilizar y se simularon algunas configuraciones posibles mediante un software de diseño gráfico y se dimensionaron los componentes y los sistemas de sujeción como se muestra en la figura 24.

En la medida de lo posible, se aprovecharon los anclajes y herrajes de sujeción presentes en las aeronaves. En la construcción se utilizaron ángulos y soleras de aluminio estructural para uso aeronáutico, así como tornillería aeronáutica protegida contra corrosión y de acero inoxidable (foto 16). Como ya se había mencionado anteriormente, las plataformas metálicas pueden instalarse en aeronaves de ala móvil y fija, como se observa en las fotos 17, 18. Así como de manera sencilla la instalación de las cámaras digitales utilizadas (foto 19).

Figura 24. Modelado digital de la plataforma sobre en la escotilla para determinar sus dimensiones y posición de los largueros, travesaños y demás componentes para ser instalada en aeronaves de ala móvil y fija

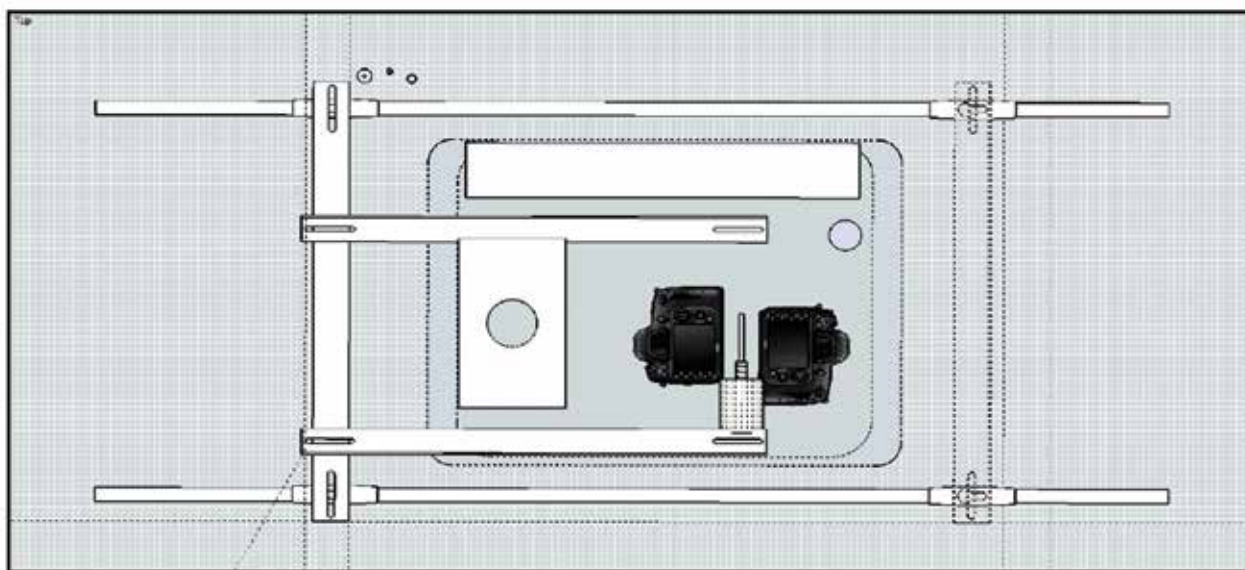


Foto 16. Plataformas metálicas construidas para aeronaves de ala móvil y ala fija



Plataforma para ala móvil (MI-17)

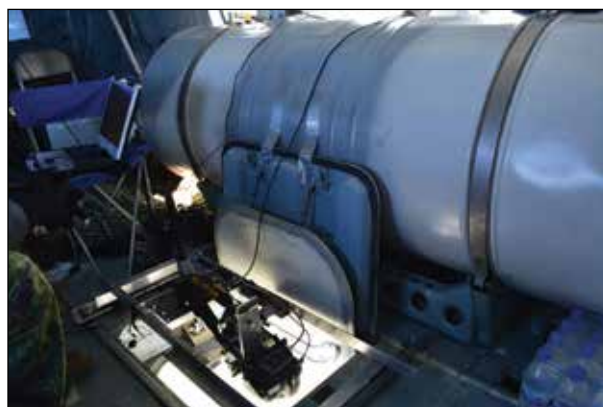


Plataforma para ala fija (Pilatus)

Foto 17. Aeronave de ala móvil, con escotilla en el piso que permite la colocación de la plataforma metálica



Helicóptero MI-17



Plataforma instalada en escotilla interior MI-17

Foto 18. Aeronave ala fija, con escotilla en el piso para la instalación de la base metálica y cámaras

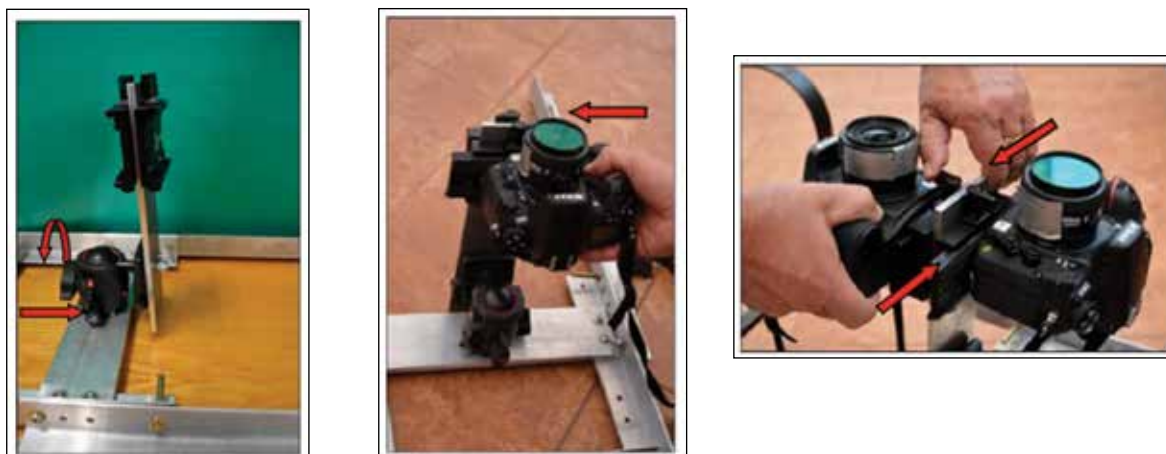


Avión Pilatus PC-6 PORTER



Plataforma instalada en escotilla Porter PC-6

Foto 19. Ejemplo de la instalación de las cámaras visible (VIS) e infrarroja (IRc) en las plataformas metálicas para ala móvil o fija



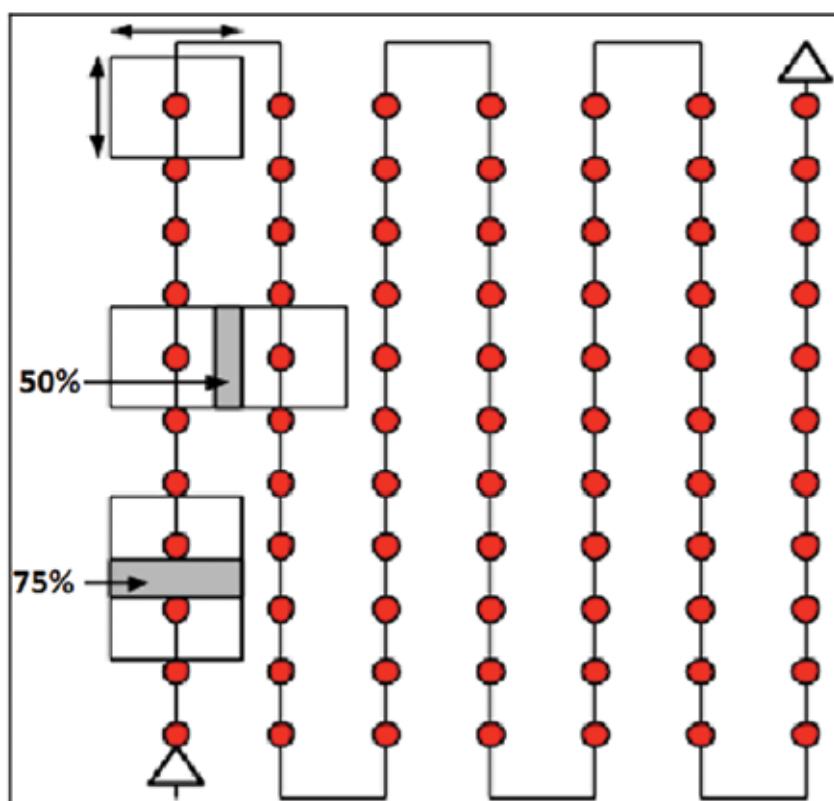
Barra con el arreglo de zapatas hacia arriba para acoplar las cámaras.

Acoplamiento de cámaras al plato rápido.

7.12. PLANEACIÓN DE VUELO PARA LA COLECTA DE FOTOGRAFÍA AÉREA

El plan de vuelo para la adquisición de fotografía aérea en el proyecto requiere de una buena calidad y precisión para tener los resultados esperados; en ese sentido, esta calidad depende de la identificación del tipo de terreno, la altitud de la aeronave y los parámetros que se utilicen en la cámara digital al momento de realizar el barrido del área a colectar y, lo más importante a considerar es la sobreposición recomendada para la mayoría de los casos con 75% frontal (dirección de vuelo) y como mínimo de 50% entre líneas de vuelo (figura 25).

Figura 25. Líneas de vuelo con la sobreposición recomendada



Para el cálculo del plan de vuelo adecuado y cubrimiento fotogramétrico de las áreas de los segmentos de 10 x 10 Km, se emplean los parámetros y características de las cámaras y lentes utilizados. Se ingresan los datos necesarios de topografía del terreno, cubrimiento y resolución de las fotografías, entre otras como se muestra en la figura 26.

Figura 26. Hoja del cálculo y parámetros de las líneas de vuelo

Levantamiento				Avión	
Res	Sobrep_lat	Elevación	Wi	Lg	Vel (kt)
0.25	0.4	1210	10000	10000	80
Alt (ft)	0	Alt (m)	0	Res calc	-0.16
ElevMin	520	SobreMax	1412.20	ResMin	0.34
ElevMax	1900	SobreMin	59.80	ResMax	0.16
Par					
H	1877.55 m	Alt	3088	10127	
Ater	1840.00 m	Lineas	10.00	ln	
Hter	1228.00 m	Fotos/lin	28.00	30.00	
Res	0.25 m	Fotos	280.00	300.00	
Interlin	1104.00 m	Vel (m/s)	41.11	m/s	
Av	368.40 m	Intervalo	8.96	s	
Obturador	2000.00	%IFOV	8.22	%	
% Sob. long	70	Dist	110	km	
		T vuelo	1.58	h	
			95	min	
		Datum	WGS84		
Azmut	0	UTM	16Q	Ext	500
	X0	Y0	dx	dy	
	2068233	1343261	1104.00	0.00	
	Xb	Yb	Xa	Ya	
L1B	2068233	1342761	L1A	2068233	1353761
L2B	2069337	1342761	L2A	2069337	1353761
L3B	2070441	1342761	L3A	2070441	1353761
L4B	2071545	1342761	L4A	2071545	1353761
L5B	2072649	1342761	L5A	2072649	1353761
L6B	2073753	1342761	L6A	2073753	1353761
L7B	2074857	1342761	L7A	2074857	1353761
L8B	2075961	1342761	L8A	2075961	1353761
L9B	2077065	1342761	L9A	2077065	1353761
L10B	2078169	1342761	L10A	2078169	1353761

Parámetros generales: resolución, sobreposición lateral, elevación, superficie de cubrimiento y velocidad promedio.

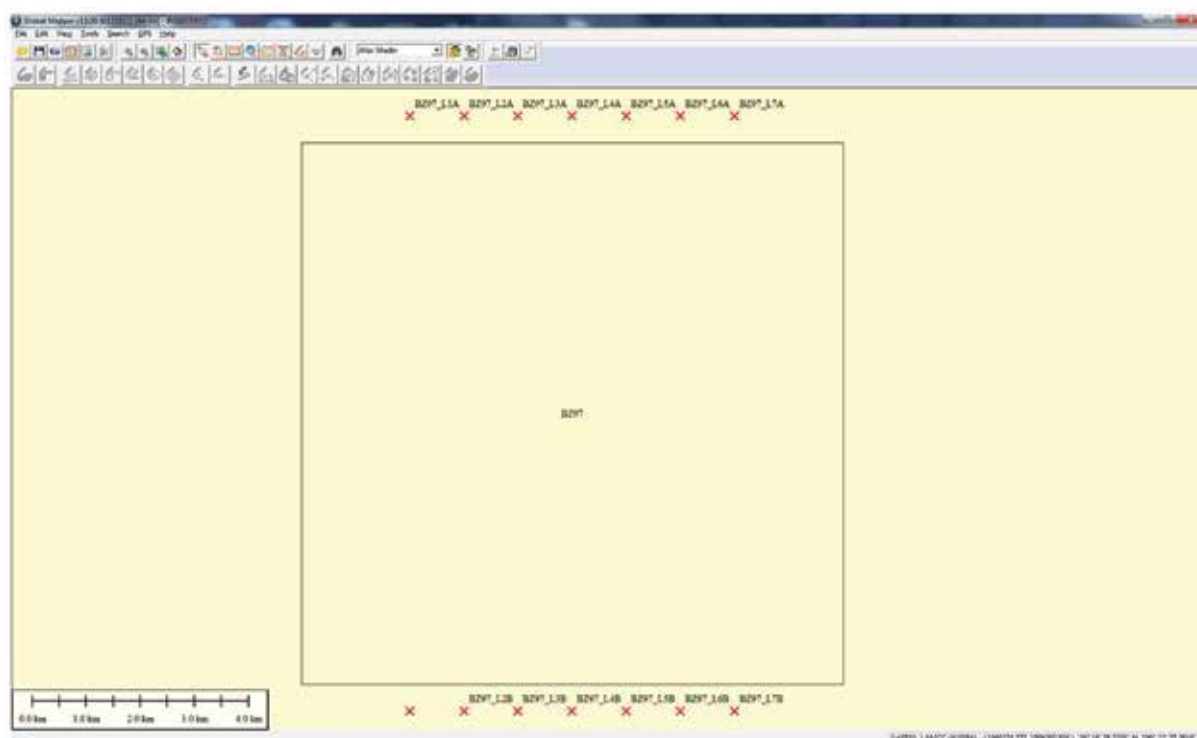
Parámetros de la distancias entre líneas de vuelo, cantidad de fotografías por línea e intervalo de disparo de la cámara.

Resultado de los vértices con coordenadas.

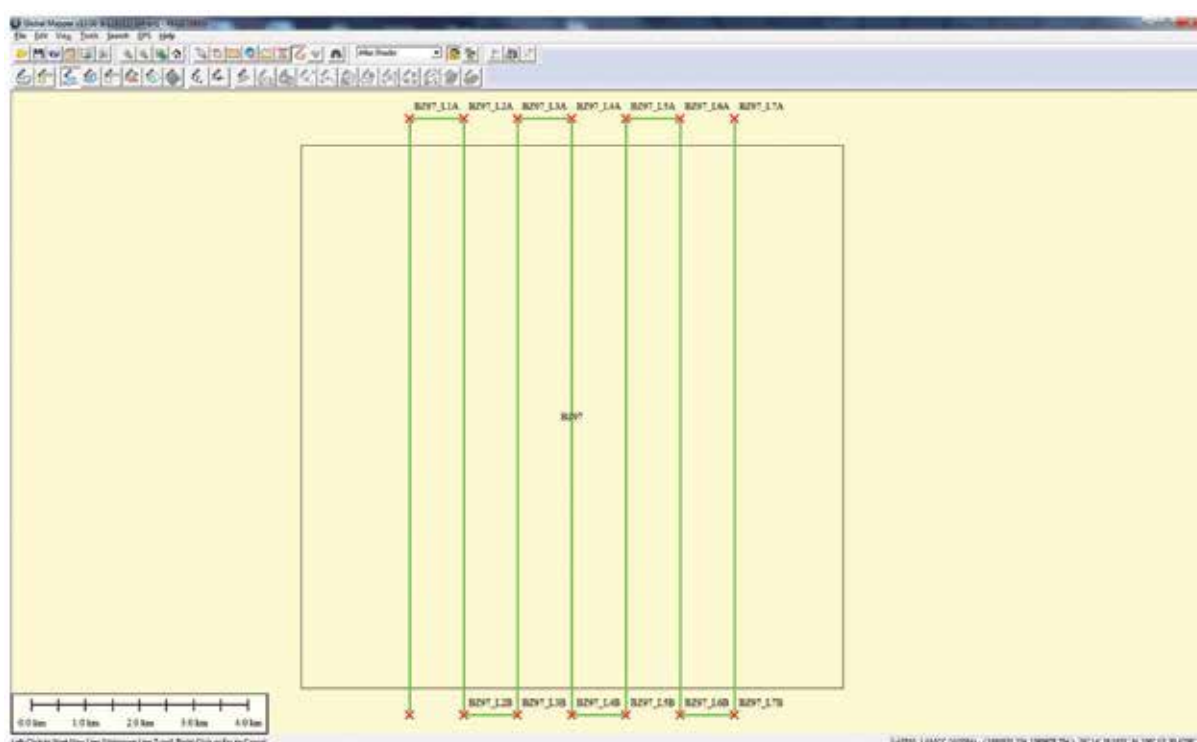
En el plan de vuelo se utilizan los datos obtenidos de la hoja de cálculo como: la sobreposición lateral entre las líneas de vuelo en porcentaje; la resolución mínima y máxima de pixel en centímetros que necesitamos en las fotografías, esta va en función de la precisión requerida en el proyecto; la elevación promedio sobre el terreno a ser fotografiado extraído del CEM proporcionado por el INEGI; la altitud a la cual se debe volar en metros y en pies; el número de líneas de vuelo y el número de fotos por línea de vuelo; la velocidad en m/s, distancia a volar en millas, la superficie del área a cubrir en metros cuadrados, y el tiempo estimado de vuelo. Estos últimos datos son proporcionarlos al piloto para que pueda calcular el combustible necesario.

El total de líneas de vuelo son siete con 10 kilómetros de longitud cada una, suficientes para obtener un cubrimiento total de 100 Km². Se trazan utilizando un software de SIG para cada segmento de 10 x 10 Km de la muestra. Estas líneas serán las que deberá seguir el avión durante el vuelo como se muestra en la figura 27.

Figura 27. Interface del software utilizado para la creación de las líneas de vuelo



Integración de los vértices para cada línea de vuelo

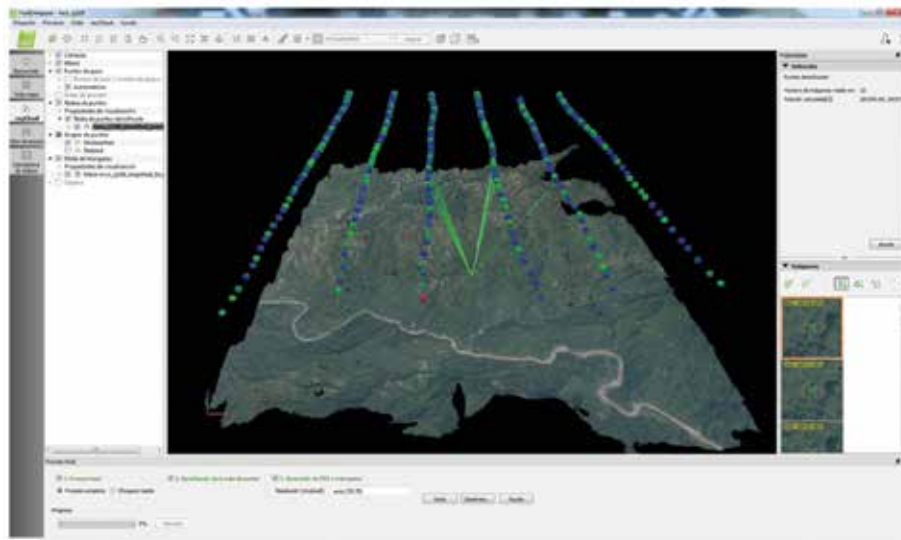


Trazo de las líneas de vuelo

7.13. PROCESO PARA CREACIÓN DE FOTOMOSAICOS

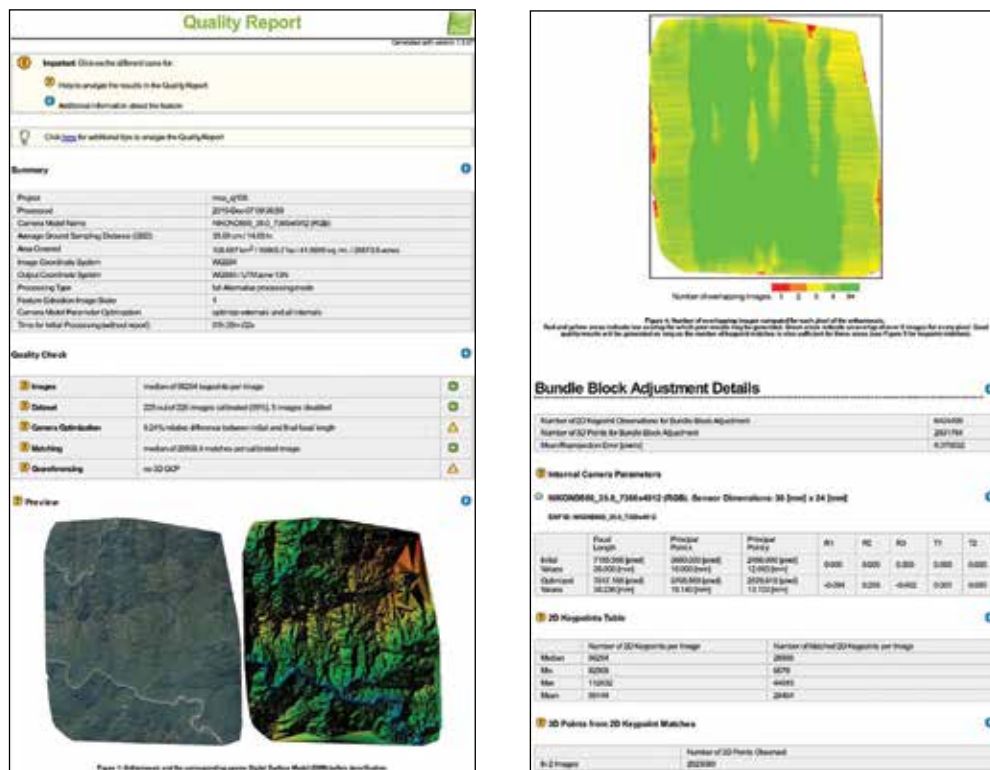
El proyecto utiliza un software comercial denominado Pix4D Mapper, con el que se procesan de manera automática las fotografías aéreas colectadas en campo en fotomosaicos georreferenciados tomadas con las cámaras digitales réflex. El resultado son mapas 2D de alta precisión, georreferenciados y modelos de superficie en 3D, tal y como se puede apreciar en la figura 28 de la interface del programa.

Figura 28. Interface del software Pix4D mapper



Este software proporciona un reporte de calidad (figura 29) en el procesamiento de los datos, la información que proporciona sirven para poder realizar diferentes calibraciones a los fotomosaicos finales en donde pudiera existir algún error. Finalmente, con los fotomosaicos terminados se realiza un análisis de validación a los cultivos que fueron interpretados en las imágenes satelitales.

Figura 29. Reporte de calidad generado por el software Pix4D Mapper



Resultados y vista previa mosaico

Ajuste de bloques y sobreposición fotos

7.14. FÓRMULA APLICADA A LA ESTIMACIÓN ESTADÍSTICA A CADA MARCO DE MUESTREO

Las estimaciones estadísticas se hicieron usando como base los resultados de las interpretaciones de cada segmento por cada periodo cuatrimestral. Para un porcentaje alto de los segmentos seleccionados se obtuvo información parcial, debido a que las nubes cubrieron parte de las imágenes las que no pudieron ser interpretadas. Por lo tanto, para hacer las estimaciones, se dividió la superficie promedio de amapola estimada por segmento por la superficie promedio observable (no cubierto por nubes) estimada por segmento. Luego, se multiplicó este ratio por la superficie total del área de estudio para obtener una estimación de la superficie total de amapola en hectáreas (ha):

$$\hat{t}(y) = \frac{\sum_{h=1}^H w_h \hat{y}_h}{\sum_{h=1}^H w_h \hat{x}_h} A = \hat{b} A$$

Donde H = el número de estratos ($H=100$), w_h = la ponderación del estrato, ($w_h = N_h/N$), \hat{y}_h = el promedio estimado por segmento con amapola en el estrato, \hat{x}_h = el promedio estimado de la superficie observable por segmento en el estrato h y A = la superficie total del área cubierta por el marco de muestreo (I) basado en datos de destrucción histórica (tabla 11).

La varianza muestral del total estimado fue determinada, primero calculando los errores residuales (residuos) $e_i = y_i - b x_i, i = 1 \dots n$ para los segmentos seleccionados (x_i es la superficie observada (no cubierto por las nubes) en el segmento i). La varianza muestral del promedio estimado de los residuos en un estrato h fue calculada mediante la fórmula:

$$\hat{V}(\hat{e}_h) = \frac{\widehat{S}_h^2(e)}{n_h},$$

Donde $\widehat{S}_h^2(e)$ es la varianza espacial estimada de los residuos en el estrato h :

$$\widehat{S}_h^2(e) = \frac{1}{(n_h - 1)} \sum_{i=1}^n e_{hi}^2$$

Después, la varianza muestral del promedio estimado de los residuos en el área cubierta por el marco de muestreo basado en datos de destrucción histórica, se estimó mediante la fórmula:

$$\hat{V}(\hat{e}) = \sum_{h=1}^H w_h^2 \hat{V}(\hat{e}_h)$$

La varianza del ratio estimado, fue calculada mediante:

$$\hat{V}(\hat{b}) = \frac{1}{\hat{x}^2} \hat{V}(\hat{e})$$

Donde \hat{x} es el promedio estimado de la superficie observable por segmento, determinado como el promedio ponderado del estrato promedio estimado de la superficie observable por segmento:

$$\hat{x} = \sum_{h=1}^H w_h \hat{x}_h$$

Por último, la varianza muestral de la superficie total de amapola estimada, fue calculada mediante la fórmula:

$$\widehat{V}(\hat{t}(y)) = A^2 \widehat{V}(\hat{b})$$

La varianza muestral de la superficie de amapola estimada en el área cubierta por el marco de muestreo (II) basado en el análisis de riesgo fue estimada de forma similar. En este caso, sólo se muestreó un estrato, por lo que se asumió que la superficie de amapola en el estrato no muestreado, es igual a cero. El estimador se obtuvo mediante el establecimiento de H en las fórmulas arriba mencionadas igual a 1.

La varianza de la superficie de amapola estimada en el área cubierta por ambos marcos de muestreo, fue calculada mediante la suma simple de las varianzas estimadas por área.

Tabla 11: Estimaciones de área de amapola para el marco de muestreo (I), basado en la destrucción histórica de cultivos.

Periodos analizados	Área (ha) (punto bajo)	Área (ha) (punto medio)	Área (ha) (punto alto)
Julio-octubre 2014	6,470	7,570	8,670
Noviembre 2014-febrero 2015	6,190	9,370	12,540
Marzo-junio 2015	3,470	6,490	9,510
Totales	18,910	23,430	27,950

Las estimaciones para el marco de muestreo basado en el análisis de riesgo. Las estimaciones se hicieron en la misma manera, aplicando solamente un conglomerado/estrato k y por lo tanto con pesos iguales para todas las muestras (tabla 12).

Tabla 12: Estimaciones de área de amapola para el marco de muestreo (II), basado en análisis de factores determinantes/riesgo.

Periodos analizados	Area (ha) (punto bajo)	Area (ha) (punto medio)	Area (ha) (punto alto)
julio-octubre 2014	60	940	1,810
noviembre 2014-febrero 2015	130	880	1,630
marzo-junio 2015	110	820	1,530
Totales	1,300	2,600	4,000

El resultado de la estimación de superficie sembrada de amapola, es la suma del área cubierta por ambos marcos de muestreo (I y II). En la siguiente tabla 13 se muestra el rango¹³ de la superficie total de amapola sembrada en el área total de los marcos de muestreo para el periodo de estudio 2014 - 2015.

Tabla 13: Área total estimada con cultivos de amapola (ha) para el periodo del 2014 -2015.

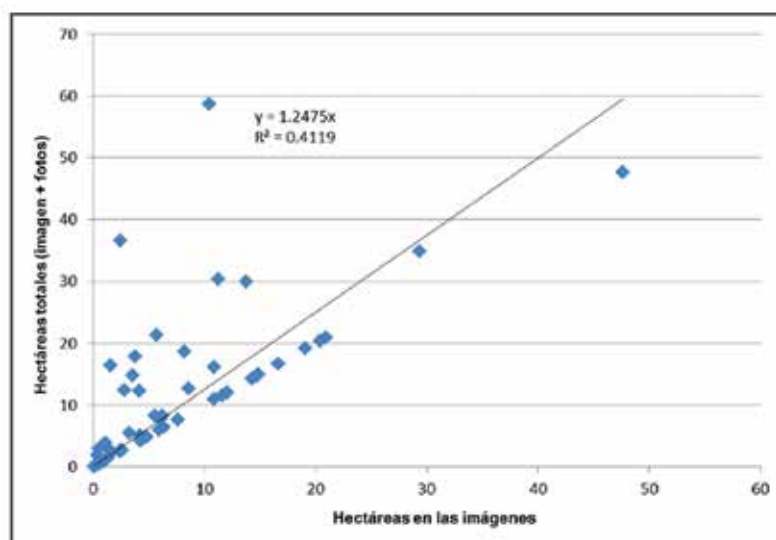
Periodo analizado	Área (ha) (punto bajo)	Área (ha) (punto medio)	Área (ha) (punto alto)
julio 2014-junio 2015	21,800	26,100	30,400

7.15. FACTOR DE AJUSTE APLICADO A LA ESTIMACIÓN DE SUPERFICIE POR TIPO DE RESOLUCIÓN ESPACIAL

Durante los tres periodos cuatrimestrales de monitoreo, se realizaron campañas de trabajos de campo donde se colectó un total de 137 segmentos con fotografía aérea como se muestra en el mapa 14. Los datos se utilizaron para aplicar el factor de ajuste a solo 112 segmentos colectados de la muestra que a la vez tenían imágenes satelitales y cultivos detectados para la misma área, el análisis anterior reveló que las imágenes satelitales tenían una tendencia de capturar menos parcelas que las fotos aéreas, principalmente por diferencias en los detalles por la resolución más fina de las fotos aéreas (0.25 metros por pixel). Esto significa que las imágenes satelitales suelen subestimar las áreas con cultivos de amapola, especialmente las parcelas pequeñas. Por lo tanto, se aplicó el factor de corrección a las áreas de las imágenes satelitales donde se encontraron cultivos de amapola, pero donde no había fotos aéreas.

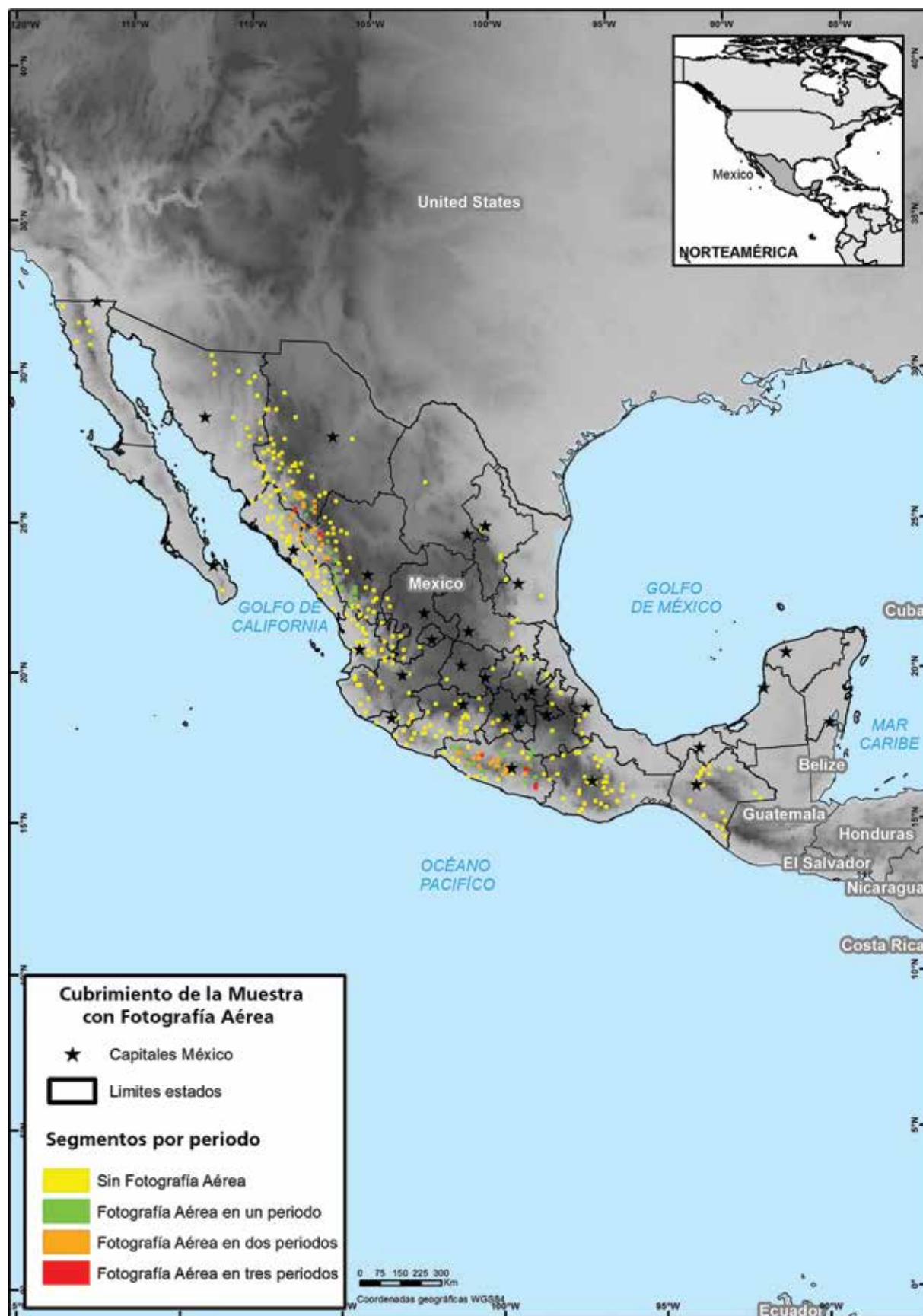
El factor de corrección fue establecido con una relación lineal entre el área (ha) únicamente encontrada en la imagen satelital y el área (ha) encontrada después de las interpretaciones con las fotos aéreas incluida, la relación se puede observar en la gráfica 5. El resultado para el factor de ajuste fue del 24.8% adicional al área y se aplicó antes de procesar los resultados finales para estimación de superficie total.

Grafica 5: Cálculo lineal de las hectáreas en imágenes y fotos aéreas utilizadas.



¹³ El rango es el intervalo entre el valor máximo y mínimo del método estadístico utilizado en la toma de muestras. El rango no incluye errores no muestrales, como lo son errores susceptibles de cometerse en la fotointerpretación de las imágenes satelitales y fotos aéreas.

Mapa 14. Cantidad de segmentos de la muestra (10 x 10 km) con fotografías aéreas colectadas en las campañas de trabajos campo.



Fuente: Sistema de Monitoreo de Cultivos Ilícitos en el Territorio Mexicano - apoyado por UNODC.
Los límites y los nombres utilizados en este mapa no implican la aceptación oficial por parte de la Naciones Unidas.

ANEXO I. MAPA NACIONAL DE PROBABILIDADES PARA CULTIVOS ILÍCITOS POR FACTORES DETERMINANTES/RIESGO

El propósito del mapa nacional es la de indicar la probabilidad de existencia de cultivos ilícitos en las diferentes regiones que componen al país. El principal insumo para dicho análisis fueron los datos históricos de cultivos ilícitos del gobierno federal.

El análisis pretende conocer cuáles son las características físicas y socioeconómicas que favorecen la existencia de cultivos ilícitos, los lugares en los que estas características se replican y se hayan realizado actividades de erradicación o no.

El resultado es un mapa de probabilidades producto de un análisis estadístico conocido como análisis logístico binomial. Este análisis estima la importancia de cada una de una serie de variables independientes en la probabilidad de que un evento, representado por una variable dependiente, suceda o no. En este caso, el evento al que se refiere la variable dependiente es, por supuesto, la existencia o no de cultivos ilícitos.

Para realizar dicho análisis fue necesario construir una base nacional que indicara en un mismo nivel de agregación información de distintas fuentes que ayudara a calcular el riesgo de la existencia de cultivos ilícitos. Se recopilaban más de 80 variables que se supuso podían ser útiles en la predicción de dicho riesgo. De estas, finalmente se utilizaron sólo diez, que produjeron el mejor modelo estadístico.

A continuación se presenta la metodología empleada y los resultados del análisis.

Construcción de la base datos

La construcción de una base de datos a nivel nacional con variables de fuentes distintas, implicó la combinación de diferentes escalas espaciales y de distintos niveles de agregación. Por lo tanto, era importante seleccionar una sola unidad territorial que supusiera un nivel de agregación que, sujeto a las restricciones que la propia información imponía, fuera suficientemente pequeño para representar escalas locales, pero que además fuese apropiado para llevar a cabo el análisis en un país con una extensión de más de 2 000 000 de kilómetros cuadrados.

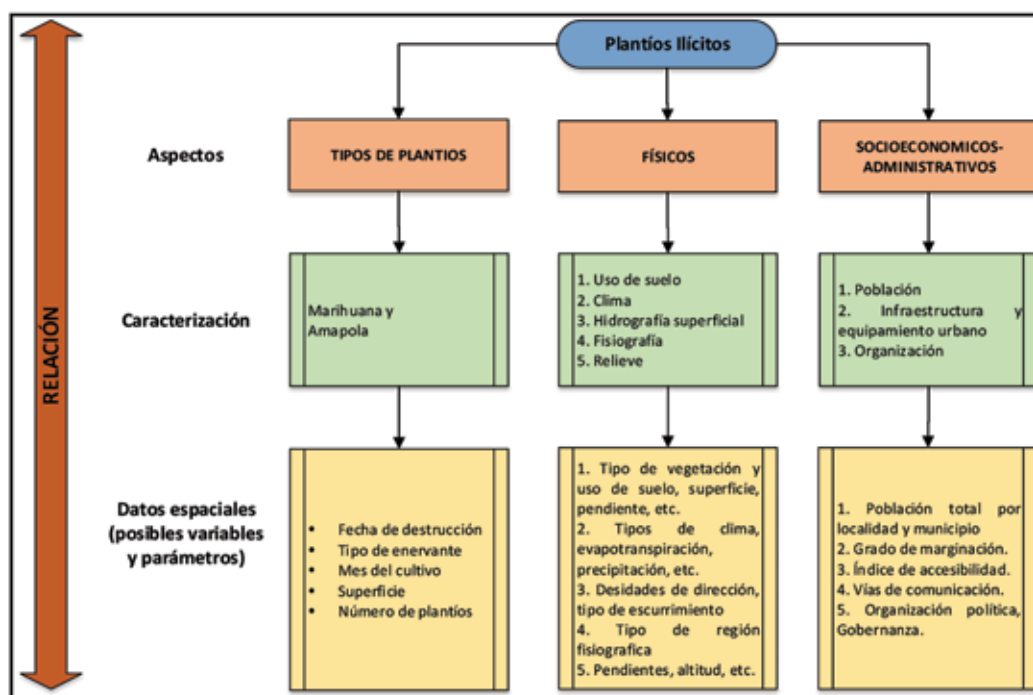
Tras la observación de las distintas fuentes de datos, se decidió utilizar la rejilla nacional alfanumérica que implementó el proyecto con unidades territoriales (celdas) de 100 Km². La base de datos incluyó más de 80 variables, tanto físicas como socioeconómicas. En el caso de los datos socioeconómicos, se utilizaron datos de 2010, la temporalidad de las fuentes de información de corte físico fue más variable; sin embargo, este tipo de datos es mucho más consistente a través del tiempo.

Selección y clasificación de las variables

Para la identificación de los posibles elementos o variables que interactúan, de forma directa e indirecta, con la presencia de estos cultivos ilícitos, se procedió a realizar un diagrama de relaciones, considerando los aspectos socioeconómicos-administrativos y físicos, con base en su caracterización y representación espacial.

En este sentido, la caracterización en el diagrama considera a los elementos que se relacionan con este fenómeno, tales como: uso de suelo y vegetación, clima, hidrografía superficial, relieve, población, infraestructura y equipamiento urbano, organización gubernamental, entre otros. A partir de la caracterización se procedió a la identificación y representación de datos espaciales, es decir, a la selección de variables y sus parámetros, como se observa en la figura 30.

Figura 30. Diagrama de relaciones



Cabe mencionar que existen limitantes en el momento de seleccionar algunas variables. Una de ellas es la impuesta con la calidad-cantidad de información adecuada y disponible; otra limitante es la escala de medición en la que se reporta la información de base (cualitativa o cuantitativa) y la escala geográfica seleccionada. Por tal motivo y para efectos de este estudio, se establecieron diferentes tipos de escalas de trabajo, que se describen a continuación:

1. Escala operacional, considera dos niveles de abstracción:
 - Nivel regional, escala 1:250 000, 1:1 000 000 y 1:4 000 000: cartas de uso de suelo, clima, provincias fisiográficas, red hidrográfica, precipitación media anual, evapotranspiración y servicios e infraestructura vial.
 - Nivel local, escala 1:50 000: carta topográfica, tipología de vivienda, aspectos socioeconómicos por localidad, aspectos demográficos y económicos y relieve.
2. Escala cartográfica a través de una red ortogonal de 10 Km² para representar: promedio de la población; índice de accesibilidad, índice de marginación, entre otros.
3. Cartografía de temporalidad para la detección de plantíos ilícitos tanto de amapola y marihuana: fechas de erradicación, mes de cultivo, mes de inicio y finalización.
4. Cartografía temática para tener un diagnóstico prospectivo del lugar, tales como: clima, hidrografía, relieve, uso de suelo y vegetación, evapotranspiración, precipitación, entre otros.

Tipo de variables

Las variables cualitativas fueron categorizadas a partir del tema en cuestión; es decir, se asignó un valor numérico por tipo de la variable según su caso y así correlacionarlos con las variables cuantitativas (tabla 14 de las variables utilizadas).

Para la evaluación de las variables se utilizaron distintos parámetros, expresados en promedios, varianzas, desviaciones estándar, índices y superficies, dependiendo la naturaleza de los datos que se analizaron.

Tabla 14. Total de las variables utilizadas en el estudio

Variables	Parámetros
Vialidades	Longitud mínima de caminos (brecha, vereda, terracería, pavimentada), Longitud máxima de caminos (brecha, vereda, terracería, pavimentada), Promedio de longitud de caminos (brecha, vereda, terracería, pavimentada), Total de longitud de caminos (brecha, vereda, terracería, pavimentada), Desviación estándar de caminos (brecha, vereda, terracería, pavimentada), Varianza de caminos (brecha, vereda, terracería, pavimentada), Densidad de caminos (brecha, vereda, terracería, pavimentada), Longitud mínima de caminos pavimentados, Longitud máxima de caminos pavimentados, Promedio de longitud de caminos pavimentados, Total de longitud de caminos pavimentados, Desviación estándar de caminos pavimentados, Varianza de caminos pavimentados, Densidad de caminos pavimentados, Distancia mínima de caminos (brecha, vereda, terracería, pavimentada) al centroide del grid, Distancia mínima de caminos pavimentados al centroide del grid.
Pendiente	Pendiente mínima, Pendiente máxima, Rango en el que se encuentra la pendiente, Promedio de la pendiente, Desviación estándar de la pendiente, Total de la pendiente por grid.
Altitud	Altitud mínima, Altitud máxima, Promedio de la altitud, Desviación estándar de la altitud, Varianza de la altitud
Uso de suelo y vegetación	Tipo de uso de suelo y vegetación, Tipo de uso de suelo y vegetación agrupado, Superficie máxima por grid del uso de suelo y vegetación, Promedio de la superficie máxima del uso de suelo y vegetación, Desviación estándar de la superficie del uso de suelo y vegetación, Varianza de la superficie del uso de suelo y vegetación, Vegetación densa.
Clima	Tipo de clima.
Temperatura	Temperatura media anual.
Evapotranspiración	Evapotranspiración por rango.
Precipitación	Rango de precipitación media anual.
Red hidrográfica	Tipo de escurrimiento (ríos), Longitud de ríos, Longitud total de ríos por grid.
Regiones fisiográficas	Superficie máxima de regiones fisiográficas por grid, Tipo de Provincia fisiográfica.
Población y vivienda	Promedio de la población por localidad, Población total por localidad, Viviendas totales por localidad, Viviendas habitadas por localidad, Promedio (ponderado por grid) del Índice de Marginación por localidad, Grado de marginación por localidad, Índice de accesibilidad mínima por localidad, Índice de accesibilidad máxima por localidad, Media del Índice de accesibilidad por localidad, Índice de accesibilidad por localidad, Desviación estándar del Índice de accesibilidad por localidad, Varianza del Índice accesibilidad por localidad.
Cultivos ilícitos destruidos	Fecha de destrucción, Lugar destrucción, etcétera.
Gobernanza	Gobernanza por municipio, Promedio de gobernanza por municipio

Análisis de los datos

El análisis empleado para elaborar el mapa de riesgo para cultivos ilícitos es una técnica estadística conocida como análisis logístico binomial. En este tipo de análisis, existe una variable dependiente dicotómica; es decir, una variable que puede adquirir uno de dos valores: 0 y 1. En este análisis, esta variable dependiente es predicha por una o más variables independientes que pueden ser de naturaleza dicotómica o numérica. La fórmula general para un análisis logístico binomial es la siguiente:

$$\hat{Y} = \frac{e^{B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_nX_n}}{1 + e^{B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_nX_n}}$$

Donde:

\hat{Y} = Estimación de la variable dependiente en la unidad territorial.

B_i = Coeficiente para cada variable independiente, siendo B_0 una constante (ordenada al origen).

X_i = Valor de la variable independiente i en la unidad territorial.

Una vez obtenidos los resultados del análisis, se utilizaron los valores de los coeficientes del modelo para predecir el riesgo de presencia de cultivos ilícitos (en términos de probabilidad) para cada una de los segmentos 10 x 10 km. de la rejilla nacional (grilla). Los resultados se expresaron en 5 categorías como se observa en el mapa anexo núm. 25: desde muy bajo riesgo, bajo, medio, alto y hasta muy alto riesgo. La categorización se realizó mediante el método de estratificación de Jenks, conocido comúnmente en la paquetería de SIG como Natural Breaks. Todos los análisis estadísticos se realizaron en el software R v.3.02 (R Core Team, 2014).

Tabla 15. Variables independientes seleccionadas para el modelo logístico binomial (CONAPO, 2010; INEGI, 2010).

Alias	Descripción	Fuente
1. Pendiente	Promedio de la pendiente en la celda.	Calculado a partir del Modelo Digital de Terreno obtenido mediante la interpolación de las curvas de nivel a cada 20 metros de INEGI.
2. Pendientesd	Desviación estándar de la pendiente en la celda.	
3. Altitud	Altitud promedio en la celda	
4. Lnpob	Logaritmo natural de la población total en localidades dentro de la celda.	Cálculo a partir de información por localidad de INEGI
5. Marginación	Promedio ponderado por población del Índice de Marginación de las localidades de la celda.	Cálculo a partir del índice calculado por la CONAPO.
6. Vegdens	Vegetación densa 1=Sí, 0 = No	INEGI
7. Vegotros	Otros tipos de vegetación.	
8. Vegselva	Vegetación: selva	
9. Veg sec	Vegetación secundaria arbustiva.	Reclasificación a partir de INEGI, versión III, 2008. Categoría latente: Bosques.
10. Disttrans	Distancia del centroide de la celda al camino pavimentado más cercano.	
		Cálculo con información de la red carretera de INEGI

Resultados de las variables utilizadas

Los mapas anexos del 15 al 25 muestran la distribución espacial de las variables utilizadas en el análisis. Los mapas 15 y 16 muestran la información de la destrucción histórica de los cultivos y su distribución para el año de 2010. Existe claramente un patrón espacial que aglomera a ambos cultivos hacia los estados de la costa pacífico con una alta densidad en los estados de Chihuahua, Durango, Sinaloa, sur de Nayarit, norte de Jalisco y al sur del mismo estado en su frontera con Michoacán que además presenta actividad hacia su frontera con Guerrero. Este último, en conjunto con Oaxaca, presenta la mayor actividad al sur del país. En cuanto al tipo de cultivos, la marihuana está presente en todas las áreas, aunque en menor cantidad en los estados del sur, mientras que la amapola se concentra en Guerrero, Oaxaca, y en el área de frontera entre Sinaloa, Durango y Chihuahua, mejor conocida como el Triángulo Dorado.

El resto de los mapas muestran las variables seleccionadas en el estudio. La observación de estos mapas, sugiere que los cultivos ilícitos se hallan en regiones de terreno rugoso a juzgar de los mapas de pendiente y de desviación estándar de la pendiente. Al mismo tiempo, sugieren que en áreas de destrucción de enervantes la vegetación es densa y que predominan los bosques y selvas. Finalmente, los mapas parecen indicar que las áreas de destrucción son poco pobladas, tienen poco acceso a transporte carretero y cuentan con altos grados de marginación.

Estimación nacional de probabilidades para cultivos ilícitos

El modelo logístico empleado tuvo los resultados que se muestran en la tabla 16. El ajuste del modelo según la Pseudo R² de McFadden es de R²=0.33 y de R²=0.39 de acuerdo a la de Nagelkerke, lo que lo convierte en un modelo con un buen ajuste, considerando el tipo de análisis (Pebesma y Bivand, 2005); psc1 (Jackman 2012); rms (Harrell 2014) y maptools (Bivand et al. 2014).

Los resultados sugieren que las variables más importantes en la producción de cultivos ilícitos son las características de la población y de la vegetación. Respecto a las celdas en las que la población es menor a 2 500 habitantes, tendrían un aumento de probabilidad de cultivos de 280% cada vez que la población se duplica, pero a medida que la población aumenta, la importancia de la variable comienza a disminuir. Esto sugiere que se requiere de áreas pobladas para que existan cultivos, pero poco pobladas preferentemente.

Por su parte, el modelo muestra que las áreas con población marginada tienen mayor probabilidad de tener cultivos ilícitos. A medida que se duplica la marginación se produce un incremento de 12% en la probabilidad de cultivos ilícitos.

En términos de vegetación, en las áreas de vegetación densa, se reduce la probabilidad de cultivos ilícitos en 30%. Este resultado parece ser contraintuitivo con lo que se observa en los mapas; sin embargo, la dirección negativa de la variable puede deberse a algún efecto de interacción con el resto de las variables incluidas en el modelo. Respecto a las áreas de bosque, las selvas tienen 13% mayor probabilidad de tener cultivos ilícitos, mientras que las áreas de vegetación secundaria arbustiva muestran 53% menor probabilidad. En áreas con otros tipos de vegetación la probabilidad de tener cultivos ilícitos es aún menor, 77% menos que en los bosques. En términos del relieve, la altitud, muestra un coeficiente negativo muy bajo.

La siguiente tabla, muestra los valores predichos del modelo logístico binomial; es decir, las probabilidades de existencia de cultivos ilícitos y que puede ser interpretado como un mapa de probabilidades para cultivos ilícitos/riesgo que fue estratificado en 5 rangos.

Se puede observar que en el área donde existen grandes áreas de destrucción histórica, a lo largo de la Sierra Madre Occidental y en específico en el llamado Triángulo Dorado, así como en Guerrero y Oaxaca, se presenta la mayor probabilidad/riesgo. Llama la atención, el área al norte de la Sierra Madre Oriental donde el mapa muestra alta probabilidad/riesgo, pero donde no ha habido destrucción histórica significativa. Lo mismo sucede en el estado de Chiapas.

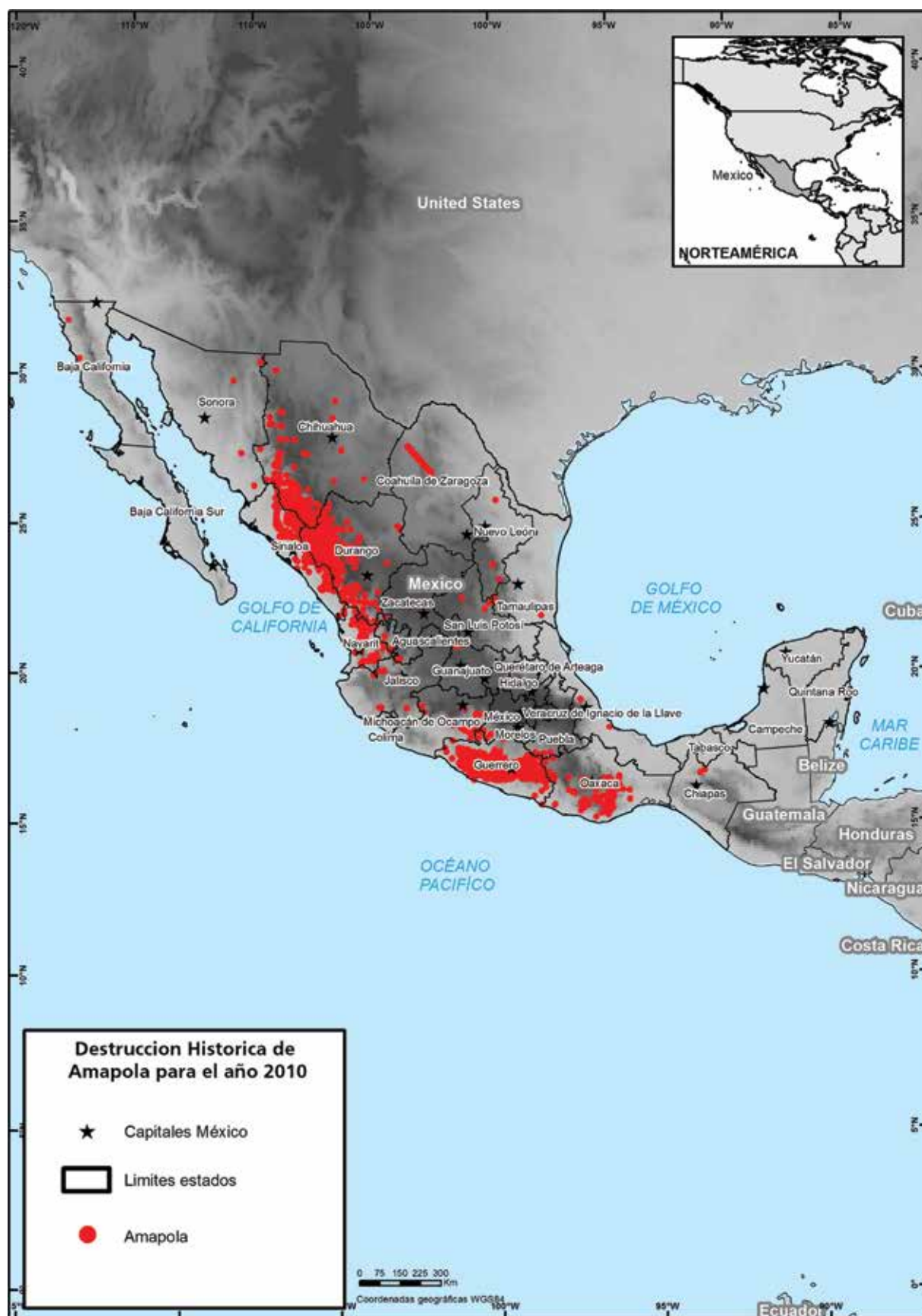
Tabla 16. Modelo logístico binomial: probabilidad de cultivos ilícitos

Variable	Coefficiente	Error estándar	Odds-Ratio
(Constante)	-3.86	0.12	0.02
Variables físicas			
Pendiente (Promedio)	0.14	0.01	1.15
Pendiente (Desviación estándar)	0.06	0.02	1.06
Altitud (m)	-1.481E-04	4.361E-05	9.999E-01
Vegetación densa (Sí = 1)	-0.36	0.07	0.70
Vegetación. Categoría latente: bosques			
Otros tipos de vegetación (Sí =1)	-1.49	0.09	0.23
Selva (Sí =1)	0.12	0.10	1.13
Secundaria arbustiva (Sí =1)	-0.75	0.08	0.47
Variables socioeconómicas			
Distancia a transporte (Km)	2.07E-03	1.81E-04	1.002E+00
Población. Categoría latente: sin población			
1 – 2 500 habitantes	1.35	0.09	3.87
2 500 -15 000 habitantes	1.00	0.11	2.73
Mayor a 15 000 habitantes	0.73	0.23	2.07
Índice de marginación	0.11	0.04	1.12

N= 22306; McFadden R² = 0.33; Nagelkerke R²=0.39

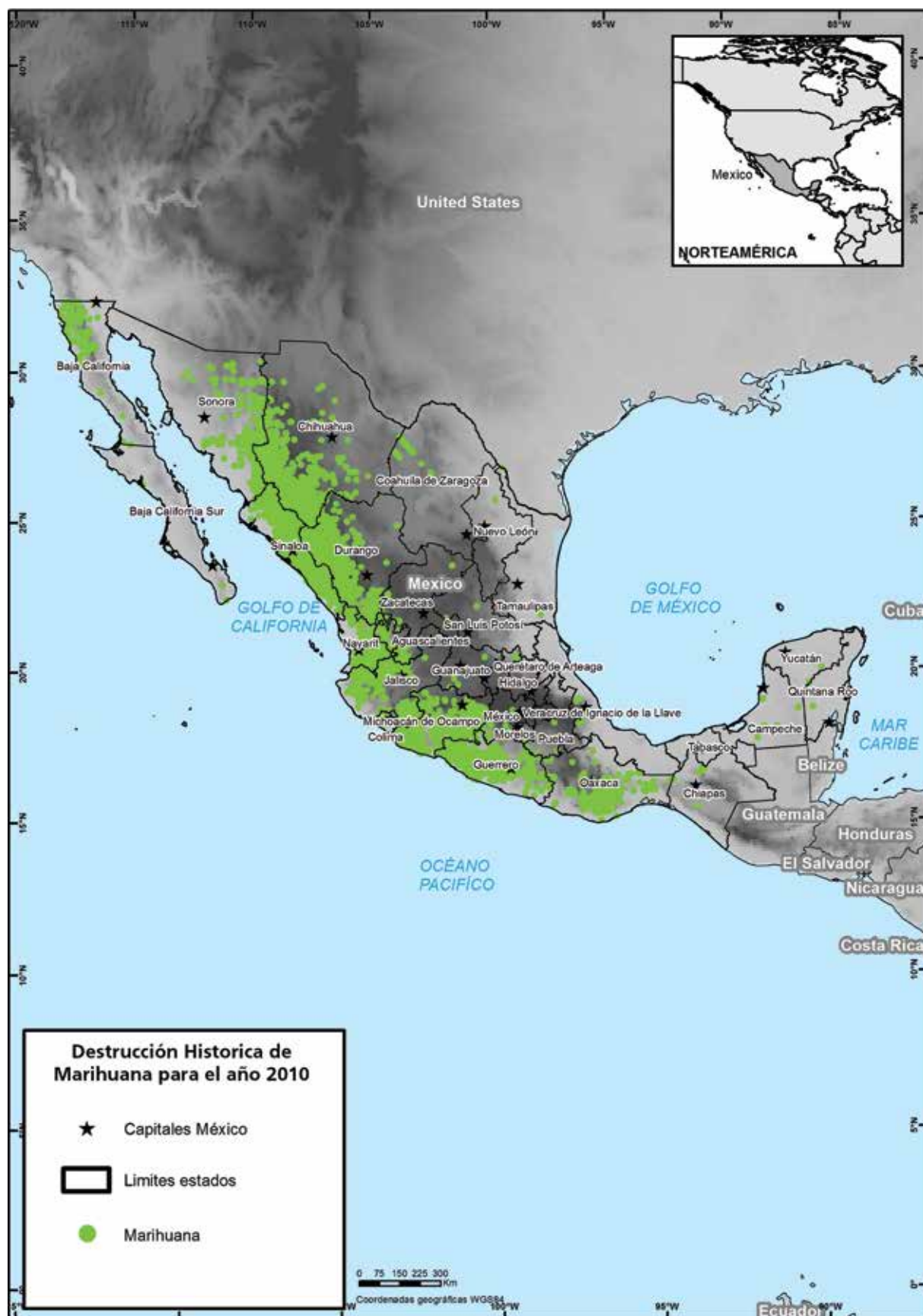
Log-l (Modelo completo) = -4356.9; Log-l (Sólo Constante) = -6532.1

Mapa 15. Información histórica de cultivos de amapola en 2010



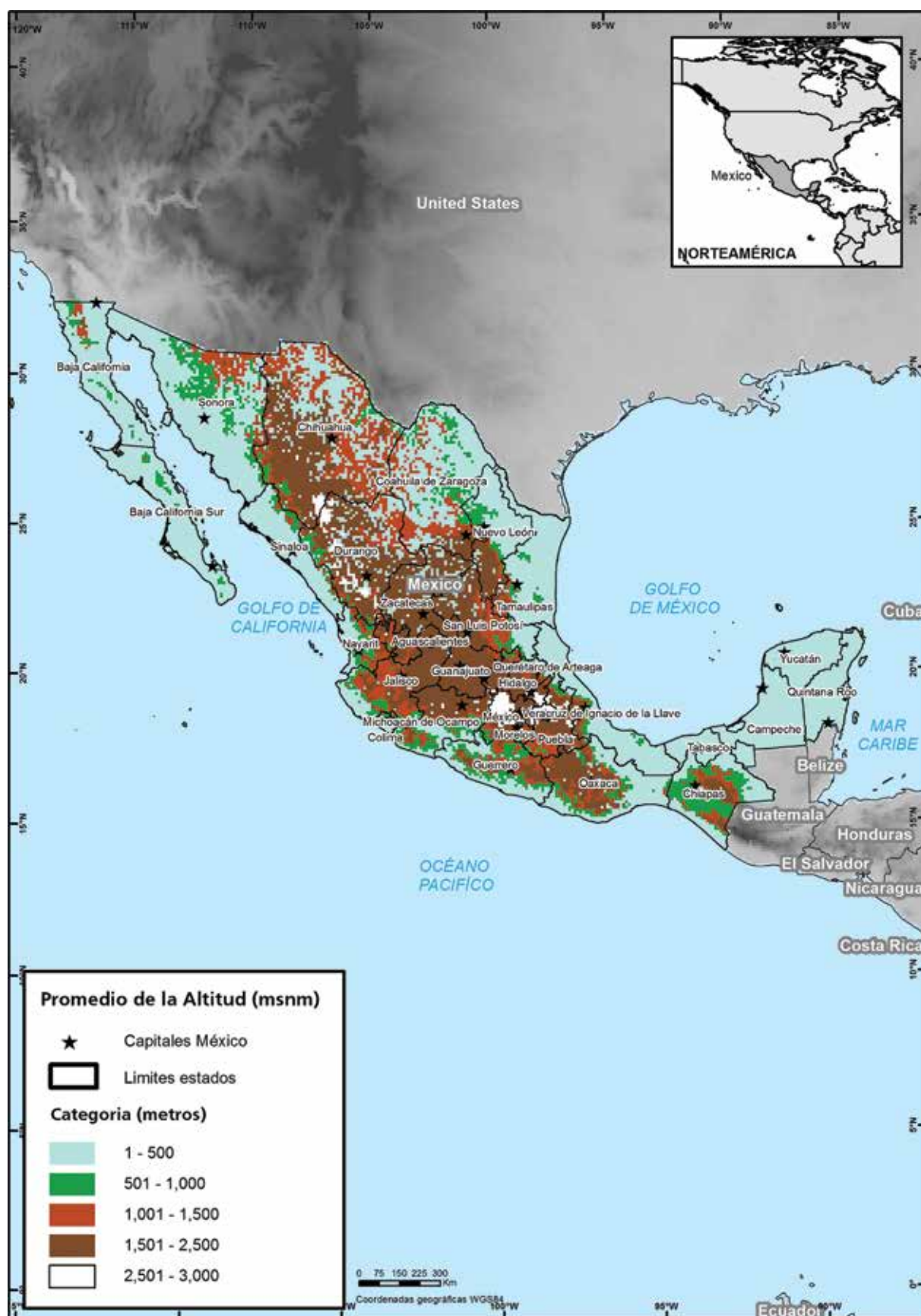
Fuente: Sistema de Monitoreo de Cultivos Ilícitos en el Territorio Mexicano-apoyado por UNODC.
Los límites y los nombres utilizados en este mapa no implican la aceptación oficial por parte de la Naciones Unidas.

Mapa 16. Información histórica de cultivos de marihuana para el año 2010



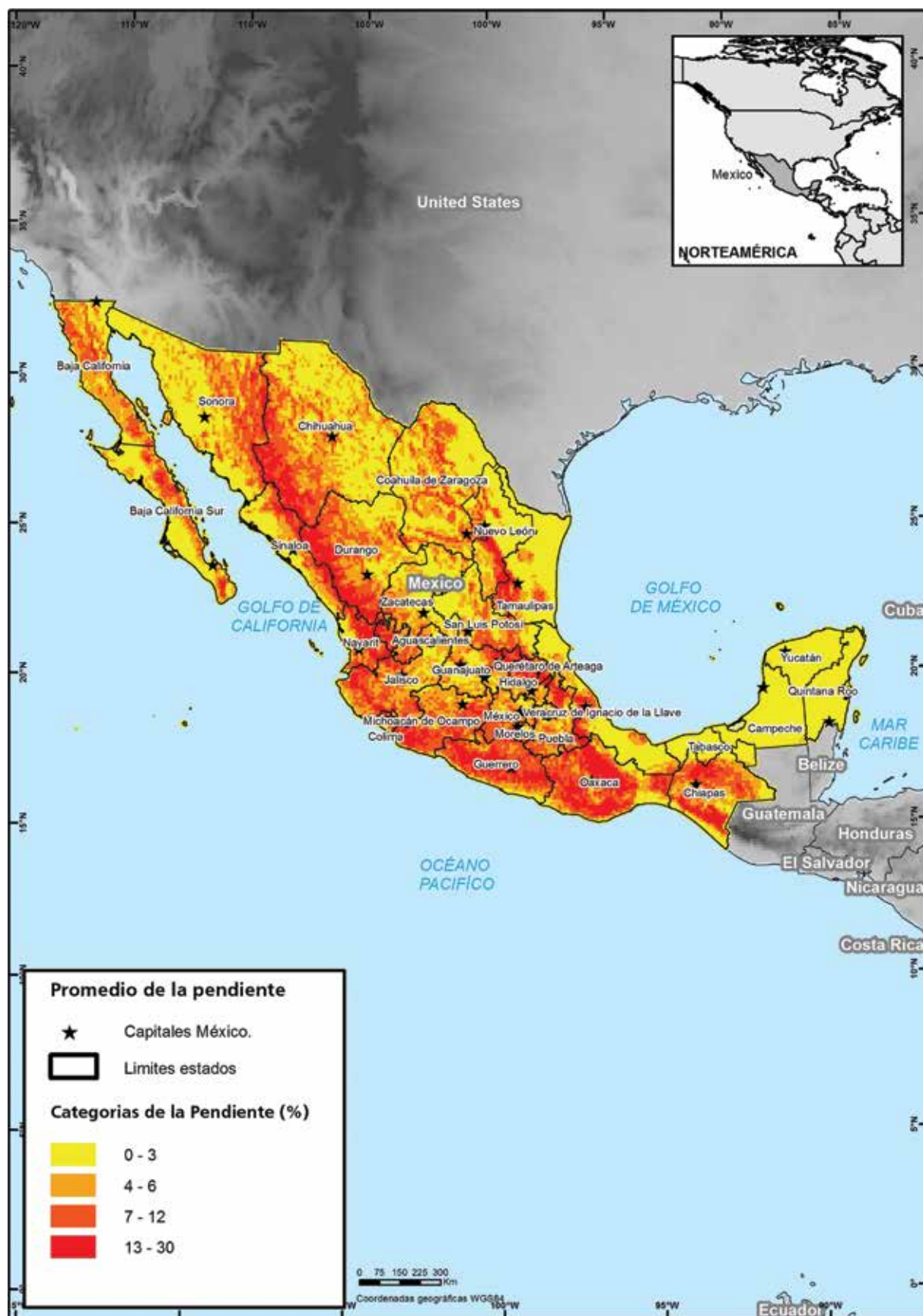
Fuente: Sistema de Monitoreo de Cultivos Ilícitos en el Territorio Mexicano-apoyado por UNODC.
Los límites y los nombres utilizados en este mapa no implican la aceptación oficial por parte de la Naciones Unidas.

Mapa 17. Altitudes promedio (MSNM) del territorio mexicano



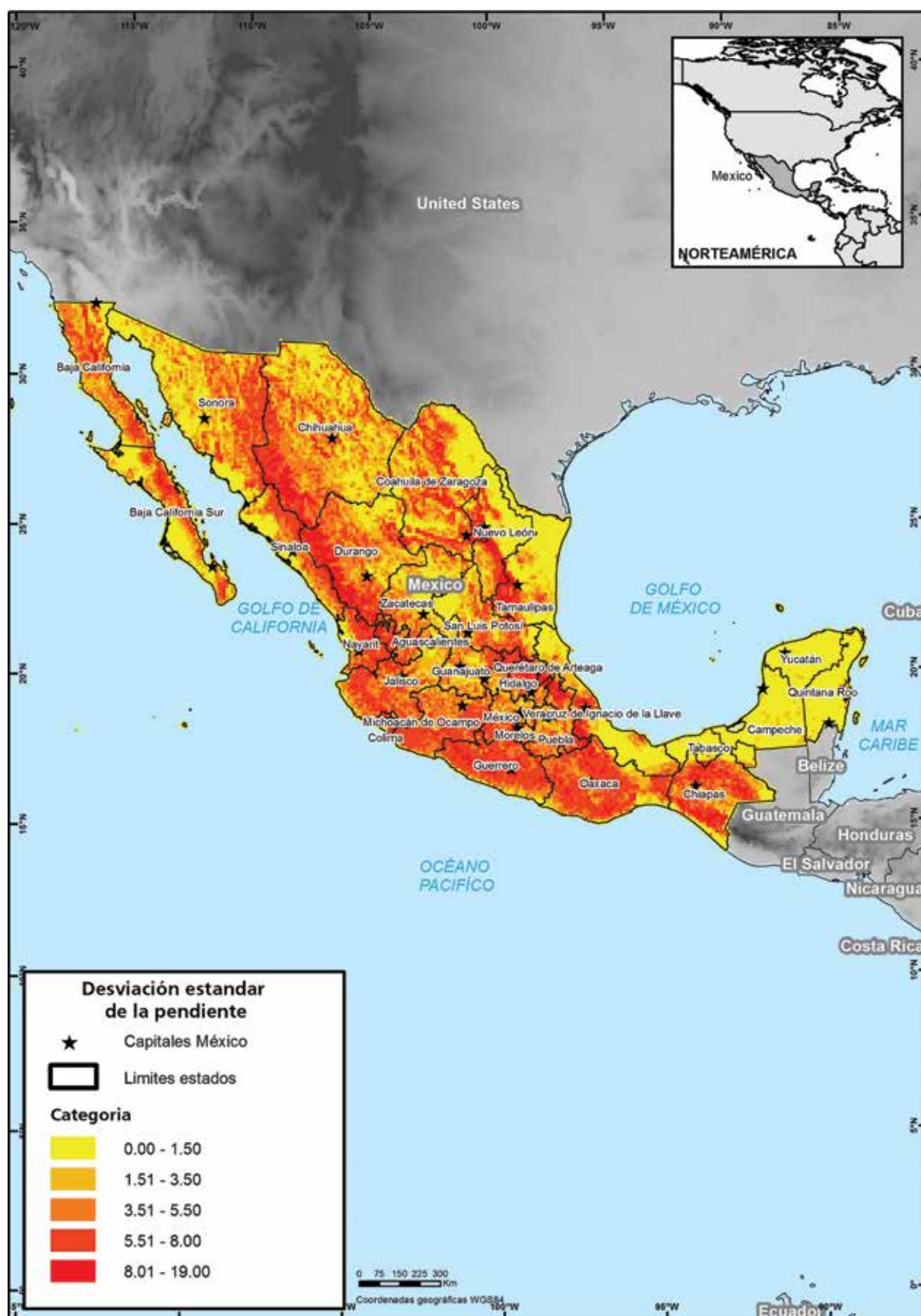
Fuente: Sistema de Monitoreo de Cultivos Ilícitos en el Territorio Mexicano-apoyado por UNODC.
Los límites y los nombres utilizados en este mapa no implican la aceptación oficial por parte de la Naciones Unidas.

Mapa 18. Promedio de las pendientes (%) en el territorio mexicano



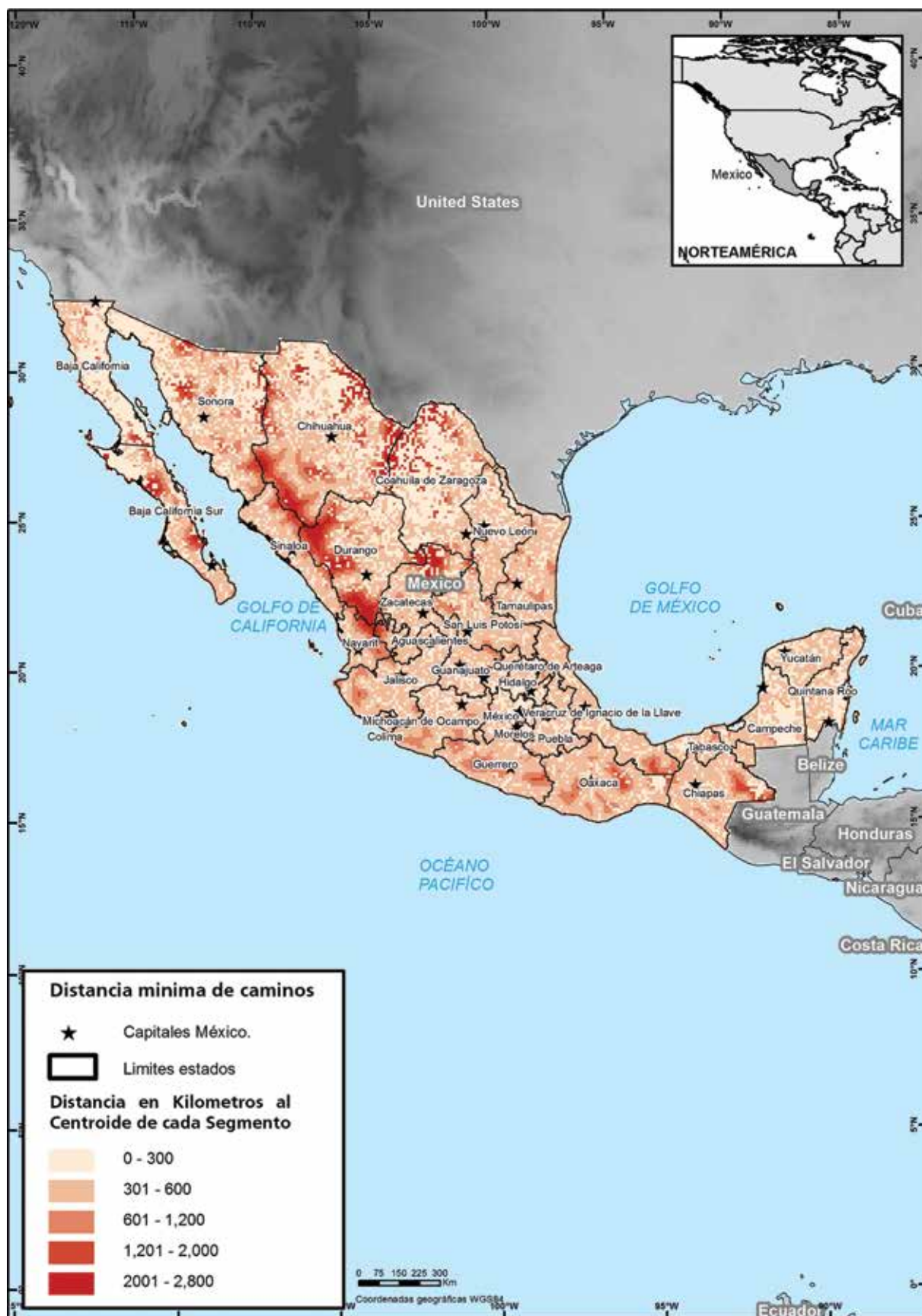
Fuente: Sistema de Monitoreo de Cultivos Ilícitos en el Territorio Mexicano-apoyado por UNODC.
Los límites y los nombres utilizados en este mapa no implican la aceptación oficial por parte de la Naciones Unidas.

Mapa 19. Desviación estándar del promedio de las pendientes (%) en el territorio mexicano



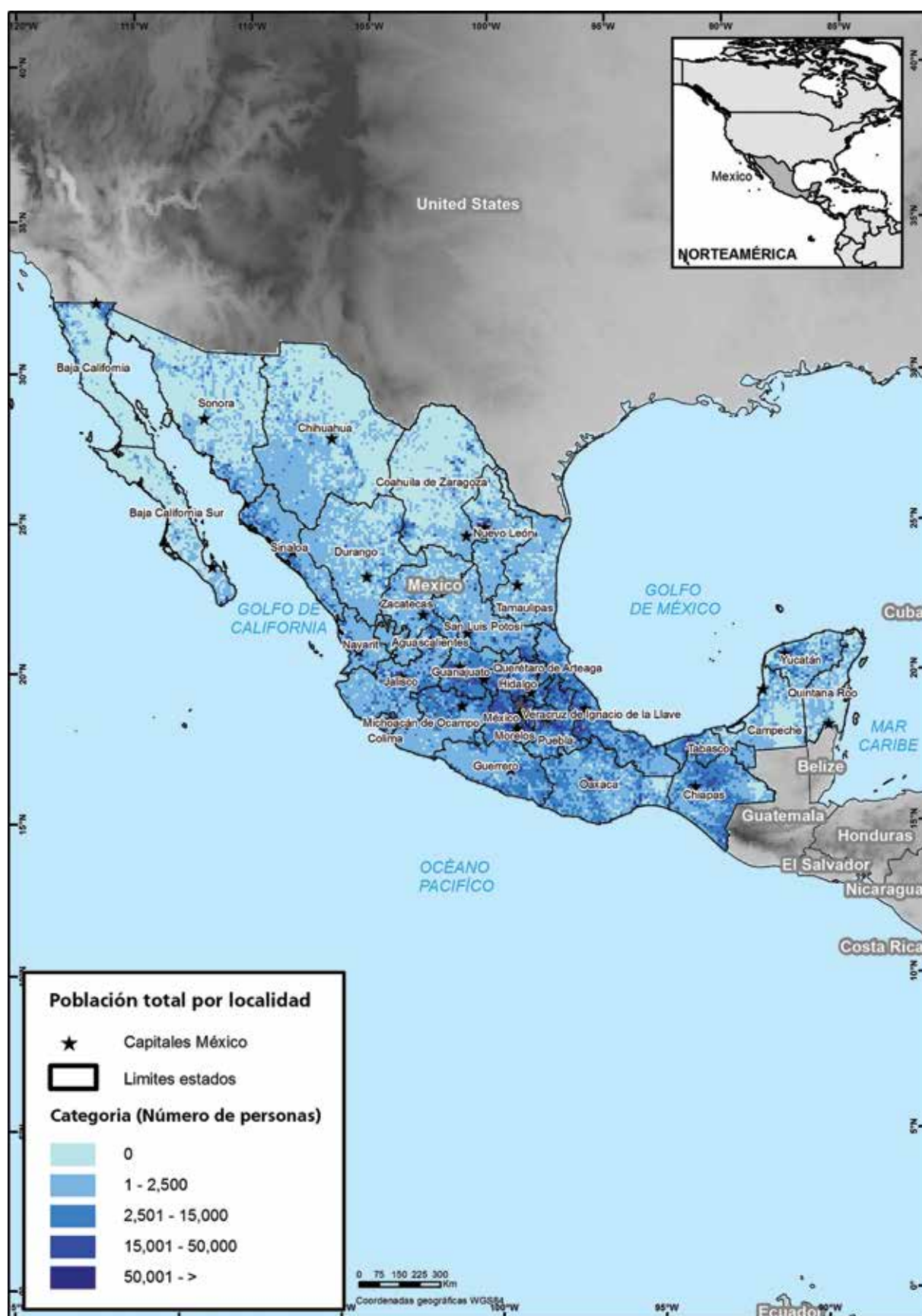
Fuente: Sistema de Monitoreo de Cultivos Ilícitos en el Territorio Mexicano-apoyado por UNODC.
Los límites y los nombres utilizados en este mapa no implican la aceptación oficial por parte de la Naciones Unidas.

Mapa 20. Distancia (Km) mínima a caminos pavimentados al centroide de cada segmento 10 x 10 Km en el territorio mexicano



Fuente: Sistema de Monitoreo de Cultivos Ilícitos en el Territorio Mexicano-apoyado por UNODC.
Los límites y los nombres utilizados en este mapa no implican la aceptación oficial por parte de la Naciones Unidas.

Mapa 21. Población total por localidades en el territorio mexicano



Fuente: Sistema de Monitoreo de Cultivos Ilícitos en el Territorio Mexicano-apoyado por UNODC.
Los límites y los nombres utilizados en este mapa no implican la aceptación oficial por parte de la Naciones Unidas.

Mapa 22. Promedio del Índice de Marginación de la población en del territorio mexicano



Fuente: Sistema de Monitoreo de Cultivos Ilícitos en el Territorio Mexicano-apoyado por UNODC.
Los límites y los nombres utilizados en este mapa no implican la aceptación oficial por parte de la Naciones Unidas.

Mapa 23. Presencia de vegetación densa en el territorio mexicano



Fuente: Sistema de Monitoreo de Cultivos Ilícitos en el Territorio Mexicano-apoyado por UNODC.
Los límites y los nombres utilizados en este mapa no implican la aceptación oficial por parte de la Naciones Unidas.

Mapa 24. Presencia de otros tipos de vegetación en el territorio mexicano



Fuente: Sistema de Monitoreo de Cultivos Ilícitos en el Territorio Mexicano-apoyado por UNODC.
Los límites y los nombres utilizados en este mapa no implican la aceptación oficial por parte de la Naciones Unidas.

Mapa 25. Área nacional de probabilidades/riesgo por factores determinantes para cultivos ilícitos



Fuente: Sistema de Monitoreo de Cultivos Ilícitos en el Territorio Mexicano-apoyado por UNODC.
Los límites y los nombres utilizados en este mapa no implican la aceptación oficial por parte de la Naciones Unidas.

ANEXO II. CARACTERÍSTICAS DE IMÁGENES SATELITALES DISPONIBLES UTILIZADAS EN EL PROYECTO

Las imágenes satelitales son el insumo principal para los análisis de los cultivos de amapola del presente trabajo; asimismo, las áreas analizadas corresponden a la muestra de 368 segmentos extraídos de manera estadística en los marcos de muestreo que fueron conformados sobre la rejilla nacional (grilla) con segmentos de 10 x 10 Km cada uno.

Por lo tanto, las imágenes utilizadas en el proyecto representan una determinada porción de la superficie terrestre, esta es capturada con un sensor remoto de tipo pasivo-óptico y que requiere de la energía solar para coleccionar la información en su sensor ensamblado al satélite artificial y que orbita continuamente alrededor de la tierra.

Las imágenes de satélite obtenidas en la misma ubicación y con una repetición temporal en el menor tiempo, nos permite ver de manera puntual la evolución de algún fenómeno terrestre, así como percibir los colores de los objetos e interpretar su contorno (forma). Por lo anterior, para el monitoreo del proyecto se utilizaron sensores de tipo pasivo, ya que son los más adecuados para la identificación de cultivos ilícitos.

Sin embargo, existen un sinnúmero de satélites orbitando la tierra con sensores solares de tipo pasivo (ópticos), estos proporcionan una gran gama de imágenes satelitales. El poder elegir qué imagen es la adecuada dependerá del tipo de estudio que se realizará, esto permitirá al usuario seleccionar qué tipo de características y resoluciones necesita como la espacial, espectral, radiométrica y temporal. En la tabla 17 se indican algunos ejemplos de los diferentes sensores comerciales.

Tabla 17. Características de los sensores pasivos utilizados para el monitoreo

Satélite	# Bandas	Sensor y resolución	Rango dinámico y precisión	Ancho de barrido	Altitud órbita
SPOT 6 y 7	Pancromática Roja Verde Azul Infrarrojo cercano	Pancromático: 1.5 m Multiespectral: 6 m	11 bits/pixel 10 m CE90	60 x 180 Km	822 Km
Ikonos	Pancromática Roja Verde Azul Infrarrojo cercano	Pancromático: 0.82 m Multiespectral: 3.2 m	11 bits/pixel 2 m CE90	11 x 60 Km	681 Km
Quick Bird	Pancromática Roja Verde Azul Infrarrojo cercano	Pancromático: 0.65 m Multiespectral: 2.62 m	11 bits/pixel 23 m CE90	18 x 50 Km	482 Km
Geo Eye 1	Pancromática Roja Verde Azul Infrarrojo cercano	Pancromático: 0.46 m Multiespectral: 1.84 m	11 bits/pixel 5 m CE90	15 x 50 Km	770 Km

Continúa Tabla 17. Características de los sensores pasivos utilizados para el monitoreo

Satélite	# Bandas	Sensor y resolución	Rango dinámico y precisión	Ancho de barrido	Altitud órbita
World View 2	Pancromática Roja Verde Azul Amarillo Infrarrojo cercano Infrarrojo medio Borde del rojo Línea de costa	Pancromático: 0.50 m Multiespectral: 1.84 m	11 bits/pixel <3.5 m CE90	16 x 110 Km	770 Km
World View 3	Pancromática Roja Verde Azul Amarillo Línea de costa Borde del rojo Infrarrojo cercano Infrarrojo medio 8 bandas SWIR 12 Bandas CAVIS	Pancromático: 0.30mts. Multiespectral: 1.25mts. SWIR: 3.70 m CAVIS: 30 m	11 bits/pixel <3.5 m CE90	13 x 112 Km	617 Km

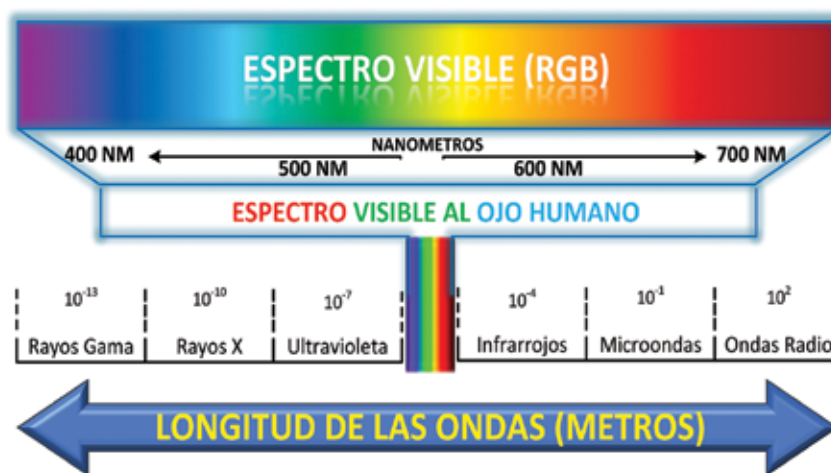
ANEXO III. DESCRIPCIÓN DEL SENSOR DE TIPO PASIVO Y/O SATÉLITES ÓPTICOS

Los sensores de tipo pasivo y/o satélites ópticos tienen la capacidad de capturar dentro del espectro electromagnético¹⁴ (figura 31)

Las características de este tipo de sensores son las siguientes:

- Las imágenes solo pueden ser colectadas durante el día ya que se requiere de una fuente de luz artificial como el sol.
- Sensor multiespectral, con capacidad de coleccionar las bandas del pancromático, roja, verde, azul (RGB) y adicionalmente las de infrarrojo lejano, medio y cercano (IR-NIR).
- Tienen una cobertura de barrido (cubrimiento terrestre) que va desde los 225 Km²-3 750 Km².
- Son imágenes de muy alta resolución con hasta 0.30 metros por pixel.
- Pueden verse afectadas dependiendo las condiciones atmosféricas como los aerosoles, nubosidad o neblinas al momento de la captura de la imagen entre el sensor y la superficie terrestre.

Figura 31. Esquema de las longitudes de onda del espectro (visible)



FUENTE: MEXK54

Tipos de resoluciones

Hay 4 tipos diferentes de resolución, característicos de cada sensor remoto: espacial, espectral, radiométrica y temporal.

Resolución espacial

Se refiere al nivel de detalles de los objetos que se pueden observar en la imagen por su tamaño de pixel; es decir, mientras más pequeño sea el pixel, mayores objetos se podrán observar en la imagen, como se muestra en la foto 20, del lado izquierdo está la imagen SPOT-7 de 1.50 metros, y del lado derecho está la imagen GeoEye-1 de 0.50 metros, en la comparación de las imágenes se puede apreciar un mayor detalle de las parcelas y/o rasgos geográficos.

Asimismo, existen casos donde la resolución se puede ver afectada por factores adversos de tipo atmosférico, neblina, nubosidad, bajo nivel de iluminación o sombras ocasionadas por la inclinación del satélite cuando es colectada la imagen con respecto a la superficie de la tierra.

¹⁴ Es el rango de la energía o radiaciones electromagnéticas que tienen longitudes de onda diferentes de todas las radiaciones electromagnéticas posibles. El espectro de un objeto es la distribución característica de la radiación electromagnética de ese objeto.

Foto 20. Comparación de detalles entre imágenes satelitales

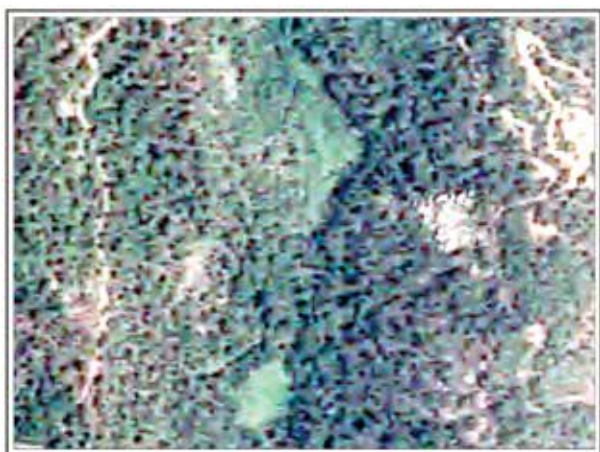


Imagen SPOT-7

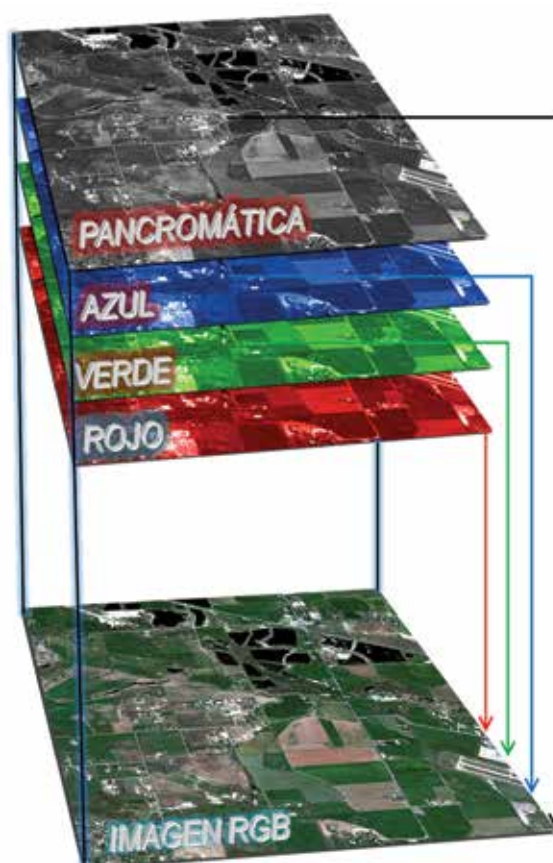


Imagen Geo Eye-1

Resolución espectral

Es la cantidad y tipo de bandas que tiene una imagen dentro del espectro electromagnético (figura 32); es decir, cada banda capturada por el sensor del satélite y cada una sirve para discriminar algún tipo de objeto sobre la superficie de la tierra, estas son: banda azul (cuerpos de agua), banda verde (vegetación), banda roja (absorción de clorofila-coberturas vegetales) banda infrarroja cercana (biomasa), banda infrarroja media (suelos desnudos rocosos) y banda infrarroja lejana (humedad en los suelo).

Figura 32. Esquema del número de bandas por tipo de espectro en imágenes Geo Eye-1

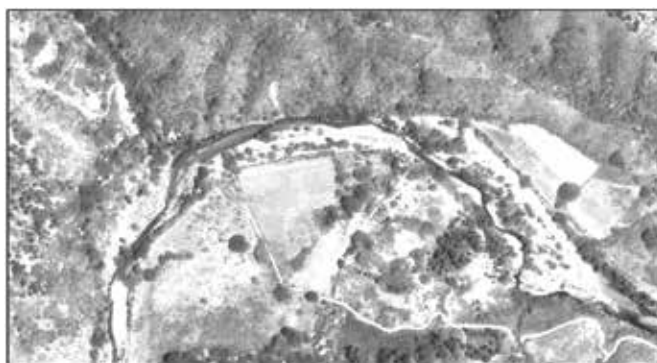


FUENTE: MEXK54

Resolución radiométrica

Es la sensibilidad del sensor, la capacidad de discriminar entre pequeñas variaciones en la radiación que capta, estos valores se expresan mediante el número de bits necesarios que se precisan para almacenar por cada pixel en la imagen; es decir, a mayor cantidad de bits, es mayor el número de valores que contiene cada pixel y con ello se puede observar de mejor manera la delimitación de los contornos de los objetos capturados (foto 21).

Foto 21. Nivel de detalles por cantidad de bits en cada imagen



8 bits (SPOT)

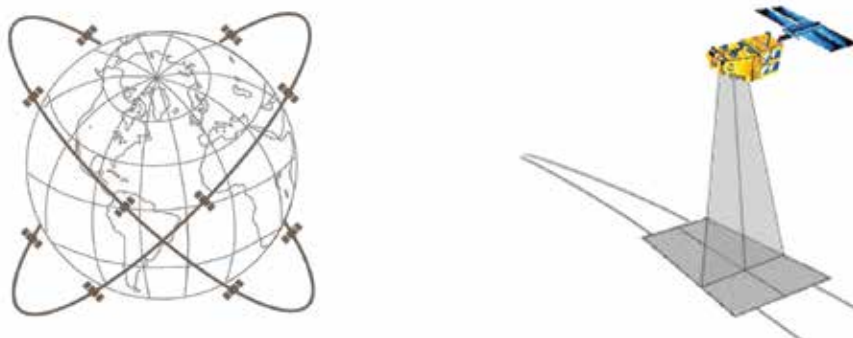


11 bits (GEO-EYE)

Resolución temporal

Indica el intervalo de tiempo entre cada imagen obtenida por el sensor (satélite) dentro de una misma órbita y el mismo ángulo de incidencia (inclinación del sensor) con lo que se pueden tener revisitas temporalmente cercanas sobre el mismo punto geográfico de la superficie (figura 33). Algunos satélites cuentan con altas resoluciones temporales, lo que es importante para el monitoreo y seguimiento de fenómenos que tienen un cambio continuo.

Figura 33. Ejemplo de órbitas (izquierda) y barrido de un satélite (derecha)



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bivand, Roger S., Edzer Pebesma, Virgilio Gomez-Rubio, 2013. Applied spatial data analysis with R, Second edition. Springer, NY. <http://www.asdar-book.org/>

CONAPO (2010), Anexo Metodológico en Índice de Marginación por Localidad, México, Consejo Nacional de Población.

EARTH EXPLORER, 2014: <http://earthexplorer.usgs.gov> (14.02.2014).

Harrell Jr, Frank E (2015). rms: Regression Modeling Strategies. R package version 4.3-1. <http://CRAN.R-project.org/package=rms>

INEGI 2010, Censo Nacional de Población y Vivienda, México Instituto Nacional de Geografía y Estadística.

Jackman, Simon (2015). pscl: Classes and Methods for R Developed in the Political Science Computational Laboratory, Stanford University. Department of Political Science, Stanford University. Stanford, California. R package version 1.4.9. URL <http://pscl.stanford.edu/>

MATTIUZZI M., BUSSINK C., BAUER T., 2014: Analysing Phenological Characteristics Extracted from Landsat NDVI Time Series to Identify Suitable Image Acquisition Dates for Cannabis Mapping in Afghanistan. Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation . 2014; (5): 383-392.

R Core Team (2014). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.



UNODC

Oficina de las Naciones Unidas
contra la Droga y el Delito

Vienna International Centre, PO Box 500, 1400 Vienna, Austria,
Tel.: (+43-1) 26060-0, Fax: (+43-1) 26060-5866, www.unodc.org