



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

**DOCTORADO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
RECURSOS NATURALES**

**ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE
ARCEUTHOBIUM GLOBOSUM IMPLEMENTANDO
TELEDETECCIÓN EN EL ÁREA DE PROTECCIÓN DE FLORA
Y FAUNA NEVADO DE TOLUCA**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS
AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES**

PRESENTA:

LUIS ALBERTO LEÓN BAÑUELOS

COMITÉ DE TUTORES

Dr. E. Gabino Nava Bernal. Tutor Académico

Dr. Angel Rolando Endara Agramont. Tutor Adjunto

Dr. William Gómez Demetrio. Tutor Adjunto

El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México. 2019

Resúmenes

En la última década se ha destacado el uso de Tecnologías de la Información y la Comunicación para el desarrollo de investigación y resolución de problemas, entre ellos los ambientales. Los acercamientos metodológicos de estudios forestales se han enfocado hacia el uso de herramientas de monitoreo y distribución espacial en bosques, a través de imágenes de satélite para el estudio y gestión del medio ambiente. Estas técnicas ofrecen la interpretación de datos implementando diversas herramientas para la captura de información, de manera que se optimice el tiempo en la toma de decisiones; esto requiere de un conjunto de medidas tecnológicas y científicas que permitan fortalecer las estrategias para mitigar el deterioro de recursos naturales y que se encaminen al desarrollo sostenible. Los recientes avances tecnológicos, como el impacto de las técnicas de teledetección con UAV, destacan para facilitar la obtención de información del estado de los bosques gracias a la alta resolución espacial que obtienen. Las masas forestales han tenido un deterioro por plagas y plantas parásitas y los planes de acción para mitigar los efectos consumen una gran cantidad de tiempo, recursos humanos y económicos. La principal causa de propagación de plagas y plantas parásitas es el largo tiempo que demora su identificación y control. Esta problemática brinda una área de oportunidad para este estudio, en el cual implementamos herramientas de teledetección UAV que permiten un monitoreo de las masas forestales con una resolución espacial superior a la que ofrecen las imágenes de satélite y que brindan detalles a nivel de copa que se procesan mediante algoritmos de colorimetría para identificar la presencia de plantas parásitas, tomando como caso de estudio al Muérdago Enano Amarillo (MEA) (*Arceuthobium globosum*), y a su vez indicar el nivel de infestación que presentan mediante el uso del algoritmo de clasificación supervisada KNN.

CONTENIDO.

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	11
CAPÍTULO II ANTECEDENTES	18
2.1 Introducción	19
2.2 Evolución de las TIC	20
2.3 TIC e Innovación como complemento a la investigación ambiental.	22
2.3.1 Las TIC como complemento en el manejo del sector forestal	23
2.3.2 Fotografía Aérea como herramienta de monitoreo forestal.....	24
2.3.3 Origen de los Vehículos Aéreos no Tripulados	25
2.3.4 Tipos de UAV.....	26
2.3.5 Implementación de teledetección con UAV	31
2.3.6 Vehículos Aéreos no Tripulados como herramienta de teledetección en el sector forestal.....	35
2.4 Bosque de Alta Montaña	38
2.4.1 Funciones de los Bosques de alta montaña	40
2.4.2 Atención necesaria a los bosques de montaña	41
2.4.3 Bosque de Pinus hartwegii	43
2.5 Agentes de perturbación en los bosques de montaña	45
2.5.1 Impacto del Muérdago	47
2.5.2 Control y monitoreo del Muérdago.....	49
CAPÍTULO III MARCO CONCEPTUAL	51
3.1 Ciencia, Tecnología y Desarrollo sostenible	52
3.1.1 Ciencia.....	52
3.1.2 Tecnología	55
3.2 Desarrollo Sostenible	59
3.3 Ciencia y tecnología para el desarrollo sostenible	65
3.4 Tecnologías de la Información y la Comunicación.....	68
3.5 Las Teconologías de la Información y Comunicación en el desarrollo sostenible.....	73
3.6 Teledetección.....	79
3.7 Espectro Electromagnético	82
3.8 Sensores y Plataformas de Teledetección	83
3.9 Espectro Visible: Modelo de color RGB	87

CAPÍTULO IV METODOLOGÍA	90
4.1 Técnicas de descomposición colorimétrica RGB	91
4.2 Área de estudio APFFNT	95
4.2.1 Localización y límites	96
4.2.2 Clima.....	97
4.3 Herramienta de teledetección.	98
4.4 Caracterización colorimétrica.....	99
4.5 Plan de vuelo	101
4.6 Obtención de datos	102
4.7 Fotogrametría.....	103
4.8 Validación de resultados	103
CAPÍTULO V RESULTADOS	105
5.1 Introducción.	106
5.2 Artículo 1 Identificación de <i>Arceuthobium globosum</i> utilizando imágenes aéreas de UAV en un bosque de alta montaña del centro de México	107
5.3 Artículo 2. Uso de Vehículos aéreos no tripulados para la de detección del Nivel de infestación por plantas parásitas a nivel de copa en bosques de <i>Pinus hartwegii</i> del centro de México.....	124
CAPÍTULO VI DISCUSIONES	149
CAPÍTULO VII CONCLUSIONES	156
BIBLIOGRAFÍA	159

FIGURAS.

Figura 1. Muérdagos y Descortezadores presentes en el Área de Protección de Flora y Fauna.....	14
Figura 2. Evolución de las TIC.	22
Figura 3. Uso de Sensores multiespectrales en bosques.	24
Figura 4. Fotografía aérea en bosque infestado por dendroctonus.	25
Figura 5. Clasificación de función del método de sustentación utilizado.....	27
Figura 6. Ala Fija (Parrot Disco).....	28
Figura 7. De Ala Rotatoria.....	28
Figura 8. Aeronave con dos rotores coaxial.....	29
Figura 9. Aeronave con dos rotores tándem	29
Figura 10. Multirrotores.	30
Figura 11. Superación de topografía accidentada.	32
Figura 12. Obtención de índices NDVI en cultivos.	34
Figura 13. Modelo de cobertura de bahía de Estacahuite.....	35
Figura 14. Resolución Espacial de las plataformas de teledetección.	36
Figura 15. Implementación de UAV para el monitoreo y detección de Incendios.	37
Figura 16. Monitoreo de plagas con UAV	37
Figura 17. Bosque de Pinus hartwegii APFFNT.....	45
Figura 18. Muérdago (a)A. globosum, b) A. vaginatum, c) Psittacanthus calyculatus).....	48
Figura 19. Sesos en la evolución de las Tecnologías.	59
Figura 20. Objetivos del desarrollo sostenible.	64
Figura 21. Elementos de la tecnociencia.	66
Figura 22. Conformación de las TIC´s.	73
Figura 23. Incursión de las TIC en la agricultura.....	75
Figura 24. Monitoreo con TIC para prevención de desastres Naturales.	78
Figura 25. Productos obtenidos con técnicas de teledetección.	80
Figura 26. Espectro Electromagnético.	83
Figura 27. Plataformas de teledetección.....	84
Figura 28. Clasificación de sensores de teledetección.	85
Figura 29. Resoluciones de Teledetección.	87

Figura 30. Modelo RGB	88
Figura 31. Metodología para la detección del nivel de infestación de MEA.	94
Figura 32. Población de Pinus hartwegii en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.....	95
Figura 33. Phantom 3 Standard DJI Oficial.....	98
Figura 34. Tratamientos para la definición de rangos colorimétricos.	100

CUADROS.

Cuadro 1. Definiciones de Tecnología.	56
Cuadro 2. Definiciones de las TIC.....	69
Cuadro 3. Características de las TIC.	71
Cuadro 4. Características del UAV Phantom 3 Standard.....	98
Cuadro 5. Características de la cámara Phantom 3 standard.....	99

Capítulo I

Introducción



El uso de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) juegan un papel muy importante en la sociedad; su aplicación exige la creación de nuevos modelos de aprendizaje, nuevos procedimientos, estrategias de búsqueda, organización, procesamiento y utilización de la información (Rodríguez, 2006), por lo que surge el interés de abordar este tema en los procesos de aplicación para la solución de problemas ambientales.

En países desarrollados se han aplicado nuevas tecnologías enfocadas a los recursos naturales, con la finalidad de contar con mayor eficiencia de recursos disponibles, reducción de costos en equipos y procesos en el diagnóstico del estado actual que guarda la conservación de los recursos naturales (UNASUR, 2014), lo que requiere de un conjunto de medidas tecnológicas y científicas que permitan fortalecer el manejo sostenible y de conservación de recursos naturales (Vilches, et al., 2014), por ejemplo, en investigaciones en torno a la solución de problemas ambientales, se han incrementado aspectos como: la eficiencia para el ahorro energético, la obtención de alimentos con procedimientos sostenibles (agriculturas alternativas, biológicas o agroecológicas) y la regeneración o restauración de ecosistemas mediante diversas técnicas sustentables como la silvicultura.

La tecnología ha incursionado en la solución de problemas ambientales enfocados al ámbito forestal, pero con ciertas limitantes en su aplicación debido a la resistencia al cambio en las técnicas que se utilizan y a las complicaciones con las que se enfrentan en las grandes extensiones territoriales de los bosques (Sotier, 2014).

Los acercamientos metodológicos de estudios forestales se han enfocado hacia el uso de herramientas de monitoreo y distribución espacial en bosques, a través de imágenes de satélite para el estudio y gestión del medio ambiente; estas imágenes resultan muy útiles cuando la escala de trabajo no requiere una alta resolución espacial (< 10 cm por pixel); sin embargo, cuando ésta es necesaria,

se encuentran condicionadas por el alto precio, las limitantes de resolución espacial y la disponibilidad de las imágenes actualizadas (Tang y Shao, 2015).

Otra limitación de las imágenes satelitales se presenta en la identificación de la presencia de plantas parásitas en bosques templados de alta montaña, ya que estas se alojan principalmente en las copas de los árboles, por lo que no se logran apreciar estos detalles (Barnoiea y Iacubescu, 2008). Las plantas parásitas tienen un tamaño pequeño en comparación con el árbol, lo cual complica visualizar su presencia.

En el campo de la sanidad forestal por enfermedades y plagas se utilizan varios métodos de análisis mediante información espacial como: segmentación, agrupación, expresión de características y clasificación supervisada; sin embargo, son costosos y complicados en la disponibilidad de imágenes de aviones de alto vuelo e imágenes de satélites comerciales que detecten los detalles de infestación por plagas y plantas parásitas (Coops, et al., 2006), (Heurich, et al., 2013); (Ortiz, et al., 2013).

El muérdago, por ejemplo, es considerado como la planta parásita con mayor extensión en México y el segundo agente de destrucción de los bosques después del escarabajo descortezador (Geils, et al., 2002); (Villa Castillo, 2003), debido a que los haustorios pueden causar deformación en la madera, reduciendo la vida u ocasionando la muerte del árbol (López de Buen, et al., 2002).

El Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca (APFFNT), ubicada en el Estado de México, se ve afectada por la incidencia de plantas parásitas (muérdago) y plagas forestales (descortezador) (Figura 1), las cuales amenazan directamente a los bosques de *Pinus hartwegii* en una superficie aproximada de 10,000 hectáreas (Cedillo Alonso, 2012). Los monitoreos y acciones para obtener la información de la distribución espacial de esta planta se realizan por medio de brigadas, lo que implica altos costos para llevar a cabo muestreos (Wallace, et al., 2016), por lo que existe la necesidad de generar métodos y estrategias que

favorezcan la obtención de información, aprovechando, de esta manera, los recursos económicos y humanos.

Figura 1. Muérdagos y Descortezadores presentes en el Área de Protección de Flora y Fauna



Fuente: Cedillo, 2012

Una de las herramientas tecnológicas que ha sobresalido en la actualidad en el monitoreo y captura de imágenes aéreas es la implementación de Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV por sus siglas en inglés), comúnmente llamados drones, los cuales por su autonomía y versatilidad reducen los costos en comparación con las técnicas de monitoreo tripuladas (Ojeda Bustamante, et al., 2014). Las herramientas de teledetección han adoptado los UAV debido a que son dinámicos y flexibles, y se integran en aplicaciones en una amplia variedad de disciplinas, incluida la agricultura de precisión (Zhang y Kovacs, 2012), la biología de la conservación (Linchant, et al., 2015), la ecología (Anderson y Gaston, 2013), la silvicultura (Howell, et al., 2018), y la arqueología (Mesas-Carrascosa et al., 2016).

La aplicación de UAV en el sector forestal se ha incrementado en los últimos cuatro años, pues estos se han visto favorecidos por la evolución tecnológica en sensores de captura, estabilidad y radiocomunicación (Singh y Frazier 2018); esto permite generar métodos y estrategias para mitigar el deterioro de los

bosques, enfocados a identificar los cambios en la cubierta forestal, el monitoreo de fauna, la obtención de datos dasonómicos, el monitoreo de incendios y la detección de plagas.

Por tal razón, se propone el análisis mediante UAV en la identificación de Muérdago Enano Amarillo (MEA) en un bosque de alta montaña del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, ante un costo de recursos humanos, técnico y operativos de monitoreo. La propuesta permitirá el uso de métodos que incluyan las tecnologías de monitoreo y herramientas de software especializado para facilitar la detección del nivel de infestación en copa del *Pinus hartwegii*.

Se plantea la pregunta de investigación: **¿Cómo contribuye la implementación de teledetección mediante UAV en el fortalecimiento y complemento de las estrategias de monitoreo y análisis de la distribución espacial de MEA en bosque de *Pinus hartwegii*?**; con la finalidad de dar respuesta a esta pregunta de investigación se plantean los siguientes objetivos:

Objetivo general

Analizar los patrones de distribución espacial del muérdago enano amarillo, implementando teledetección con UAV para la identificación del nivel de infestación en un bosque de alta montaña del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.

Objetivos Específicos

- Definir los rangos colorimétricos del *Arceuthobium globosum* en diferentes escenarios para la aplicación de algoritmos de identificación.
- Evaluar técnicas y algoritmos de procesamiento de imagen en espectro visible RGB para la obtención de presencia de muérdago enano amarillo en *Pinus hartwegii*.

- Clasificar el nivel de infestación por muérdago enano en parcelas definidas del bosque de alta montaña del Nevado de Toluca a través de la utilización de UAV.

La tesis que aquí se presenta se inicia con la presentación de los antecedentes en el Capítulo 2, los cuales muestran la importancia de las TIC en investigaciones ambientales y como se han incorporado en el ámbito forestal para el análisis y monitoreo de las masas forestales, seguido de la importancia que tienen los bosques de montaña con las funciones que proveen de servicios ambientales; asimismo, se resaltan las necesidades que se han generado en estos bosques debido al deterioro por factores bióticos, abióticos y las actividades antropogénicas que repercuten directamente en las especies de alta montaña como el *Pinus hartwegii*.

El Capítulo 3 aborda el marco conceptual desde la visión de la ciencia, la tecnología y la sostenibilidad como principales pilares para el desarrollo de Tecnologías de la Información y la Comunicación y visualizar el impacto que pueden tener con respecto al desarrollo sustentable. En este estudio se toma como ejemplo el aporte de la teledetección como herramienta para la generación de estrategias que apoyen en la conservación de recursos naturales, principalmente en el sector forestal. El Capítulo 4 describe la metodología utilizada para el cumplimiento de los objetivos planteados, la cual se definió en 6 fases: la primera fase se utilizó para la caracterización colorimétrica y la calibración del algoritmo de identificación de MEA; la segunda fase define la planeación para la ejecución del vuelo del UAV, tomando en consideración la iluminación, viento y la selección de la parcela para el trazo previo al vuelo; en la tercera fase se ejecuta el vuelo para la captura de imágenes por parte del UAV y, por parte de las brigadas, se realiza un muestreo del nivel de infestación del MEA; en la fase 4 se obtiene el ortomosaico y la resolución espacial para su posterior análisis; la fase 5 ejecuta el algoritmo de Identificación para obtener el porcentaje de presencia de MEA y de *Pinus hartwegii* para obtener la proporción. Por último, la fase 6 se divide en dos partes: la validación del método de

descomposición colorimétrica mediante pruebas estadísticas no paramétricas y la validación del nivel de infestación al comparar el índice de Hawksworth obtenido en las brigadas y la relación con el índice de resultado obtenido de la proporción definida de acuerdo con su equivalencia con el método de Hawksworth.

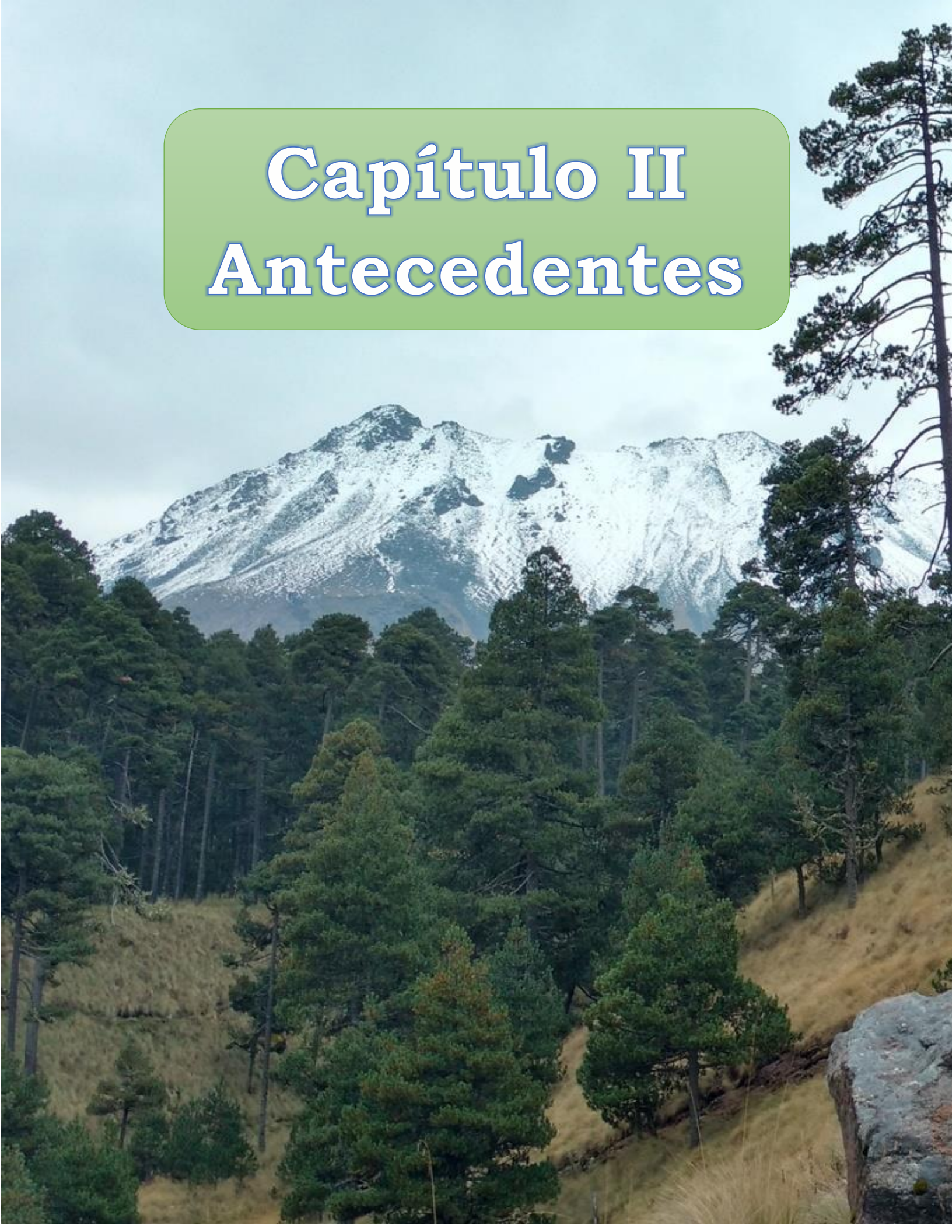
Los resultados se muestran en el Capítulo 5, en torno a la presentación de dos artículos científicos; el primero se intitula "Identification of *Arceuthobium globosum* using unmanned aerial vehicle images in a high mountain forest of central Mexico", el cual se encuentra publicado en *Journal of Forestry Research* y aborda la calibración y el método colorimétrico para la identificación de presencia del MEA. El segundo artículo se intitula "Uso de Vehículos aéreos no tripulados para la de detección del grado de infestación por plantas parásitas a nivel de copa en bosques de *Pinus hartwegii* del centro de México" el cual se publicará en la revista *Forest Systems*, en este se determina el nivel de infestación por MEA en parcelas de *Pinus hartwegii* a nivel de copa.

En el Capítulo 6, se plantea la discusión general de los resultados obtenidos con la bibliografía consultada de los trabajos relacionados con la implementación de técnicas de teledetección y algoritmos para la identificación de plagas y plantas parásitas, resaltando la importancia del aporte de los UAV en conjunto con las técnicas de clasificación y reconocimiento de patrones para el fortalecimiento de los análisis de los patógenos que afectan al sector forestal.

Finalmente, el Capítulo 7, incluye las conclusiones principales del trabajo realizado y las futuras contribuciones que se pudieran obtener de los métodos presentados. Una vez comprobada la viabilidad para la identificación de plantas parásitas, estas técnicas colorimétricas pueden ser implementadas en otros estudios, siempre y cuando se tengan rangos colorimétricos apreciables en espectro visible RGB.

Capítulo II

Antecedentes



2.1 Introducción

El gran auge de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) ha tenido un crecimiento acelerado en los últimos años, lo que ha permitido el acceso a diversos bancos de información. Los cambios que caracterizan el uso de las tecnologías y las redes de comunicación para el rápido desenvolvimiento tecnológico-científico en la globalización de la información (Navas, 2009), son derivados de los avances en electrónica y computación, que han originado diversas plataformas para la adquisición de datos, entre ellos los geoespaciales.

Los satélites han sido el sistema de teledetección más utilizado en los últimos 30 años para el monitoreo de los bosques como actores claves en la mitigación de la contaminación y la provisión de servicios ambientales (Pettorelli, 2014); sin embargo, el uso de las imágenes de satélite puede representar un alto costo cuando se estudian áreas pequeñas o medianas (Matese, 2015), lo que ocurre en muchas aplicaciones de teledetección en los entornos forestales y costeros (Padua et al.,2017).

La gestión efectiva de los ecosistemas forestales, la prevención de riesgos, así como la protección y preservación son cuestiones claves para contribuir al desarrollo sostenible del medio ambiente. Los métodos convencionales para el monitoreo y análisis de recursos forestales son costosos y lentos, por lo tanto, pierden veracidad y significancia cuando los resultados están disponibles (Kushwaha,2005).

Para este fin, el desarrollo tecnológico en el sector forestal se ha logrado mediante la implementación de las TIC, con la finalidad de fortalecer y complementar las estrategias tradicionales, proporcionando información de datos de los bosques y sus características a los diferentes instrumentos de manejo y gestión forestal que existen en el país como son: las áreas naturales protegidas, las áreas de conservación voluntaria, las unidades de manejo de vida silvestre y los programas de manejo (Madrid et al., 2009).

Lo anterior es posible gracias a los recientes avances tecnológicos, como el impacto de las técnicas de teledetección con UAV, que destacan para facilitar la obtención de información del estado de los bosques, ya que puede ser más seguro, más rentable y menos invasiva que los métodos tradicionales (Anderson y Gaston 2013) y, en su caso, superar las condiciones topográficas de los bosques de montaña que las imágenes satelitales no pueden.

2.2 Evolución de las TIC

Los medios de comunicación pueden determinar la eficiencia de la sociedad a la hora de llevar a cabo sus tareas, dando lugar a cambios sociales significativos. Es decir, los medios de los que disponen las personas son capaces de cambiar y definir las diferentes ramas de la vida. Como un claro ejemplo se tienen las revoluciones industriales, en las cuales los avances en los medios de comunicación resaltan por el gran aporte productivo que se reflejan en cada país.

Uno de los aportes iniciales más significativos de las TIC surge con los medios de comunicación más relevantes: la imprenta, si se tiene en cuenta que antes de su invención en 1450 (Briggs y Burke, 2002) la comunicación no se difundía en lugares lejanos y los acontecimientos se perdían al no poder ser plasmados. No obstante, fue la prensa de Johann Gutenberg la que tuvo impactos sobre la impresión de libros (de la Cruz, 2006), aportando así una gran herramienta para impulsar y motivar la difusión y generación de conocimiento.

Las necesidades y el afán de mejorar las comunicaciones se reflejan en el siglo XIX con grandes avances, principalmente con el desarrollo de la telegrafía en 1844 (Standage, 1998), lo que llevó a Alexander Graham Bell a inventar en 1876 el primer teléfono, de ahí que fue posible la transmisión a larga distancia de la voz humana; sin embargo el desarrollo de la radio a partir de 1880 posibilitó la transmisión de mensajes procedentes de una sola fuente a miles de personas a la vez, gracias a los esfuerzos de varios inventores como Heinrich Hertz. A comienzos del siglo XX se alcanzaron adelantos aún mayores en la telecomunicación. La televisión hizo posible la emisión tanto de sonidos como de

imágenes en movimiento en 1923 (Bellis y Charles Jenkins, 2006). El conjunto de estos medios de comunicación cambió totalmente el significado de la distancia al permitir una comunicación en tiempo real, lo que favoreció el crecimiento económico de varios países.

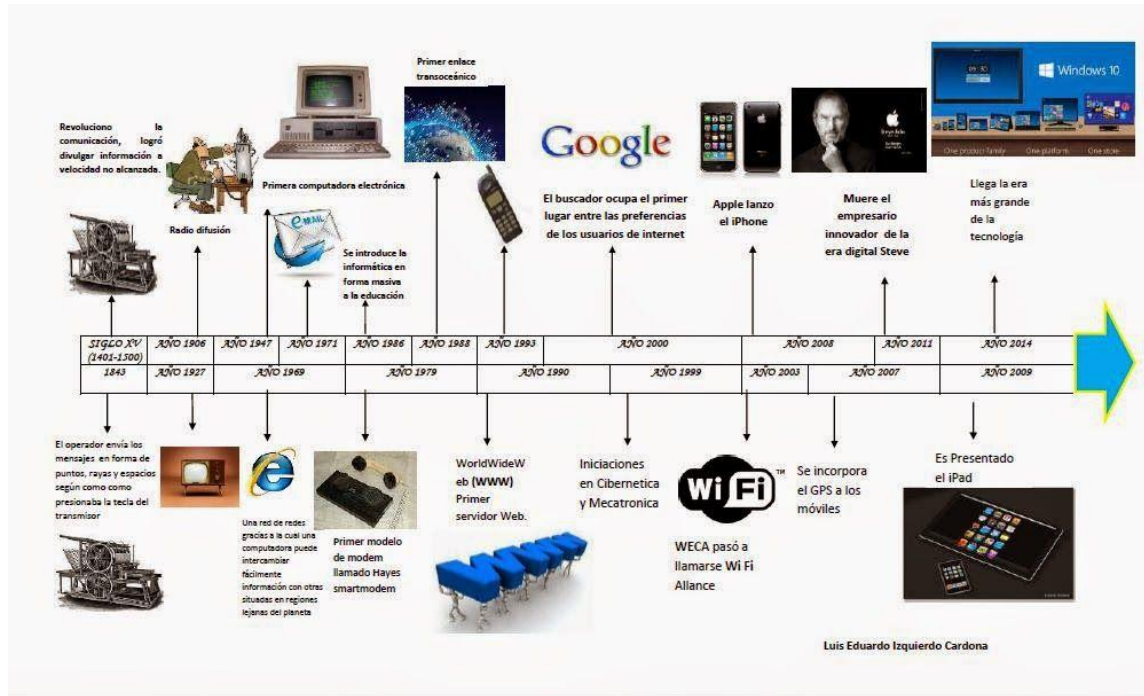
Con la invención de la computadora en el siglo pasado, se dio la creación de herramientas que pasaron a ser usadas en la vida cotidiana y la mejora en el traspaso de la comunicación como es el caso de internet, el cual, entre las nuevas tecnologías que han surgido, ha tenido un impacto económico y político en los últimos años. Como consecuencia, no solo evolucionó la tecnología, sino también el significado de las TIC, por lo que en la actualidad se denominan el conjunto de Tecnologías que permiten la adquisición, producción, almacenamiento, tratamiento, comunicación, registro y presentación de información en forma de voz, imágenes y datos contenidos en señales de naturaleza acústica, óptica o electromagnética (Acevedo, 2004).

Las TIC modernas incluyen la electrónica como tecnología base y pueden ser entendidas como un conjunto de recursos tecnológicos integrados entre sí que proporcionan, por medio de facilidades de *hardware*, *software*, y telecomunicaciones, la semi-automatización y comunicación de procesos relativos a negocios, investigación científica, enseñanza, aprendizaje y cuestiones de la vida diaria que se han necesitado a lo largo de los años como se muestra en la Figura 2 (Edi, 2014).

Se debe reconocer que las TIC se han difundido a lo largo de los últimos 25 años en todas las actividades cotidianas, personales y de la industria, por lo que no es una novedad que se aplique también en las empresas relacionadas con los sectores primarios, sobre todo si se considera la reducción de costos que han tenido las computadoras, las telecomunicaciones y el desarrollo de software. Estas tecnologías brindan una variedad de aplicación en distintas áreas, y el sector ambiental también se ha beneficiado, no solo para la optimización de procesos de la industria, también para el apoyo en la conservación de los recursos naturales, lo cual da pauta para incursionar en la inclusión de las TIC

para complementar y fortalecer las investigaciones científicas que se apoyan para mitigar el deterioro de los recursos naturales.

Figura 2. Evolución de las TIC.



Fuente: <https://images.app.goo.gl/hQsg3mXp8ZEK4YRR8>

2.3 TIC e Innovación como complemento a la investigación ambiental.

Los avances en las Tecnologías de la Información y Comunicación — especialmente del Internet, la microelectrónica, la biotecnología y la nanotecnología— juegan un rol importante e impactan significativamente en la sociedad (Lundvall et al, 2002). Herrera y Gutiérrez (2011:6) plantean que:

“Entendiendo que la innovación es un proceso complejo, esta no debe concebirse solo desde una perspectiva económica, por lo que es cada vez más notoria la tendencia a incorporar elementos sociales y ambientales en el concepto de innovación. Por ello, es conveniente tener en cuenta que, aunque hay una tendencia cada vez más generalizada a asociar la ciencia y la tecnología con el desarrollo económico, lo cual es fundamental, los procesos

científico-tecnológicos y de innovación deben concebirse desde una perspectiva más amplia, dirigida a comprender los fenómenos naturales, sociales y culturales, y a buscar soluciones a problemas ubicados en muchos ámbitos de la sociedad, por lo que su visión debe tener un carácter integral dirigido al mejoramiento de la calidad de vida en general”.

La importancia que tienen la tecnología y la innovación en las estrategias de transformación de los países vista desde la perspectiva del conocimiento y la innovación yace en que deben incorporarse como ejes transversales, como pueden ser en áreas tales como la producción industrial, agrícola, salud, energía, desarrollo social y ambiental (UNCTAD, 2008).

Por tal motivo el concepto de las TIC ha empezado a ser analizado en función de las consecuencias ambientales que produce (Cepal, 2015). En este aspecto, los problemas ambientales podrán ser resueltos con la aplicación de nuevos procesos organizacionales, producto de generar y aplicar nuevos conocimientos como: la nano y micro tecnología, la biotecnología, los dispositivos electrónicos y la robótica, que, aplicadas junto a tecnologías tradicionales, pueden alcanzar saltos cualitativos en el desarrollo tecnológico y contribuir a mitigar los problemas ambientales (Tupria, 2010).

2.3.1 Las TIC como complemento en el manejo del sector forestal

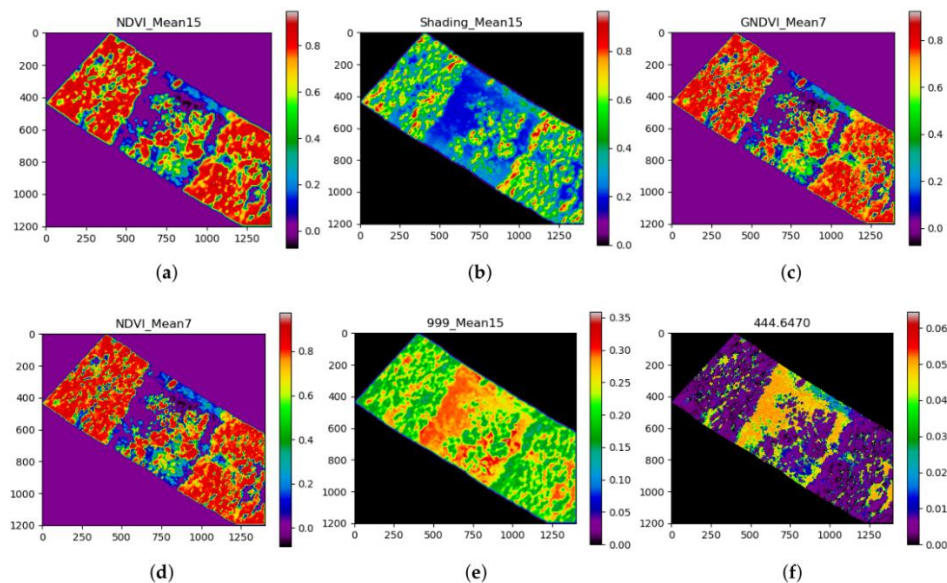
La información es un activo importante de los gestores forestales; conocer las especies, edad, crecimiento y tipos de suelo son requisitos esenciales para una gestión forestal rentable, por lo que surge la necesidad de buscar opciones como la tecnología para obtener, analizar y presentar la información (Dykstra, 1997).

En la actualidad se dispone de varios instrumentos que permiten aumentar la eficiencia en el manejo y cuidado de los bosques (Moguillansky, 2005). En general, estos instrumentos articulan los Sistemas de Información Geográfica (SIG), con los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS por sus siglas en

inglés), y software especializados para el análisis de datos. Estas plataformas permiten analizar la situación general de un bosque (Hellström, 1993), son útiles en la confección de mapas al integrar la cartografía con datos georreferenciados y permiten analizar información territorial, relacionándola en un modelo, que permite el apoyo de control, gestión y toma de decisiones (Von, 2006).

Así, la digitalización de las herramientas y dispositivos enfocados a la obtención de información de los recursos forestales ha permitido contar con datos certeros y exactos de sus bosques y patrimonio en cuanto a características como volumen y superficies (Figura 3). El cambio ha reportado un importante beneficio en las labores que requieren periodicidad operacional, como el monitoreo y control de faenas, las cuales hoy no se conciben sin el apoyo de fotografías aéreas, información georreferenciada en bases de datos y equipos digitales (Moguillansky, 2005).

Figura 3. Uso de Sensores multiespectrales en bosques.



Fuente: (Sandino, 2018)

2.3.2 Fotografía Aérea como herramienta de monitoreo forestal

En investigaciones forestales se suelen emplear métodos para recopilar información a partir de fotografías aéreas que, junto con la información básica de

campo, permite realizar mapas mostrando la vegetación, las características de los suelos, así como la presencia de arroyos, lagos y topografía en general.

Las mejoras en los procesos de la fotogrametría digital han permitido generar productos (creación de modelos en 3D a partir de imágenes 2D, Registro multitemporal, fácil duplicación y transmisión de información) compatibles con la cartografía convencional que son capaces de analizar elementos territoriales con mayores detalles en el reconocimiento de recursos naturales (Figura 4). Las ortofotos digitales son un complemento de los procesos de evaluación medioambiental y planificación territorial (Moreira, 2005).

Figura 4. Fotografía aérea en bosque infestado por dendroctonus.



Fuente:<http://www.telematica.ccadet.unam.mx/antologias/medio/narrativas/escarabajos/pdf/Articulodetivulgacion.pdf>

El resultado de la fotointerpretación servirá como medio para planear los reconocimientos del campo; además, se ha convertido en una rama altamente especializada de la fotogrametría clásica (Parody y Zapata 2015).

2.3.3 Origen de los Vehículos Aéreos no Tripulados

Un dron o un Vehículo Aéreo no Tripulado (UAV por sus siglas en inglés), también llamado Unmanned Aerial System (UAS), es un sistema aéreo no tripulado o Sistema aéreo pilotado por control remoto, RPAS (del inglés Remotely Piloted

Aircraft System). De acuerdo con el sector donde se usa o aplica, puede recibir distintos nombres, para la actividad científica es común llamarlo UAV (Cuerno-Rejado et al., 2014), por lo tanto, para este estudio utilizaremos el término UAV.

En general, un UAV es una aeronave acondicionada para colocar dispositivos auxiliares operados a distancia o que puede ser preprogramado para fines diversos, desde levantamientos cartográficos, hasta reconocimientos de patrones terrestres o medición remota de propiedades o variables de interés de la superficie terrestre (Austin, 2010).

Los UAV tuvieron sus orígenes a mediados del siglo XIX, cuando se desarrolló un primitivo UAV formado por un globo cargado de bombas que se utilizó en un ataque austríaco a la ciudad de Venecia. Posteriormente aparecieron los aviones radiocontrolados, utilizados para entrenar a los tiradores británicos antiaéreos durante la Segunda Guerra Mundial (Asensio, 2008). Los UAV modernos comienzan su historia en 1924, cuando un ingeniero francés de la École Centrale Paris Étienne Oehmichen (1884-1955) construyó un helicóptero compuesto de cuatro rotores con despegue vertical (Ojeda, 2014).

Los UAV se encuentran en evolución constante y su desarrollo ha logrado una miniaturización de componentes con mayor precisión, así como la mejora de sistemas de navegación y la mejora en las imágenes de mayor resolución (Ojeda et al., 2017).

2.3.4 Tipos de UAV.

La gran diversidad de UAV existente y las múltiples misiones que éstos pueden ejecutar hace que no exista una clasificación universalmente aceptada, sino múltiples taxonomías que se entremezclan entre sí. Algunos de los métodos de clasificación más empleados en la literatura agrupan a los UAV en dos grandes grupos, en uno de ellos se encuentran todos los aerodinos (aeronaves más pesadas que el aire) y en un segundo grupo los aerostatos (aquellas aeronaves

cuya suspensión en el aire se debe al empleo de un gas más ligero que el propio aire). En la Figura 5 se presenta el esquema de clasificación (Ortega, 2015).

Figura 5. Clasificación de función del método de sustentación utilizado.



Fuente: Santana, 2017

Hoy en día, los UAV más utilizados, tanto en el ámbito civil como militar, son aerodinos. Por ello, a continuación, definiremos los tres tipos de aerodinos más comunes dentro del campo de los UAV:

Ala fija: son aquellos aerodinos en los cuales las alas se encuentran unidas/encastradas con el resto de los elementos de la aeronave y no poseen movimiento propio (Figura 6). En su conjunto, los UAV de ala fija se caracterizan por poseer una estructura simple, con una elevada eficiencia aerodinámica, lo que permite a estas aeronaves poseer un alto rendimiento energético. Estas características les permiten presentar tiempos de vuelo relativamente elevados; sin embargo, estas aeronaves requieren de elementos y/o infraestructuras externas para poder realizar el despegue y el posterior aterrizaje, lo cual eleva el nivel de complejidad en la ejecución de la misión de vuelo. El nivel de maniobrabilidad es mucho menor al que poseen las aeronaves de ala rotatoria, lo que les impide ser utilizados en espacios de alta complejidad y de poca extensión.

Figura 6. Ala Fija (Parrot Disco)



Fuente: <https://www.parrot.com/es/drones/parrot-disco-fpv>

De ala rotatoria: son aquellos aerodinos en los cuales las alas, en este caso también denominadas “palas”, giran alrededor de un eje, consiguiendo de este modo la sustentación. Dependiendo del número de rotores y/o de su configuración, los UAVde ala rotatoria pueden subdividirse en los siguientes tipos:

Aeronaves con un rotor principal y un rotor de cola: en este tipo de aeronave la sustentación es generada por el rotor principal, el cual está situado en la parte superior del aparato, mientras el rotor de cola compensa el par de torsión que el primero produce (ver Figura 7). Este tipo de UAV tiene buena capacidad de control y maniobrabilidad; sin embargo, la estructura mecánica es compleja (Sahin et al., 2008).

Figura 7. De Ala Rotatoria.



Fuente: https://www.indracompany.com/sites/default/files/PELICANO_Esp_0.pdf

Aeronaves con dos rotores en configuración coaxial: Esta configuración posee dos rotores colocados uno encima del otro (Figura 8). Ambos rotores giran en

direcciones opuestas, consiguiendo emprender el vuelo a partir de la diferencia generada de la velocidad angular de ambos rotores. La configuración coaxial permite la fabricación de aeronaves compactas, pero tiene como desventaja que una cantidad significativa de la energía se pierda debido a que los rotores interfieren entre sí (Smith, 1980).

Figura 8. Aeronave con dos rotores coaxial.



Fuente: <https://i.ebayimg.com/images/g/T1AAAOSw-jhUDVvx/s-l400.jpg>

Aeronaves con dos rotores en configuración tándem: Este tipo de aeronaves poseen dos rotores ubicados en la parte superior del aparato en configuración tándem (Figura 9); ambos rotores giran en direcciones opuestas, lo cual neutraliza el torque generado. La estructura mecánica de estos UAV es extremadamente compleja (Sahin et al., 2008).

Figura 9. Aeronave con dos rotores tándem



Fuente: <https://www.flightglobal.com/dragonfly-pictures-unveils-tandem-rotor-dp-6-uav/76189.article>

Multirrotores: Es una aeronave de ala rotatoria que posee tres o más rotores (Figura 10). Dependiendo del número de rotores y de su configuración, los multirrotores pueden subdividirse en diferentes tipos, yendo desde aeronaves con tres rotores (tricópteros) y cuatro rotores (quadcópteros) hasta configuraciones de ocho (octocópteros) o más rotores. Al igual que los otros tipos de aeronaves de ala rotatoria, los multirrotores generan la sustentación necesaria para el vuelo a través de sus rotores, aunque en este caso sus hélices son de paso fijo (ángulo fijo) y de revoluciones variables. Las hélices son instaladas en sentidos de rotación opuestos de forma diametral, es decir, se alternan hélices de giro a derecha con hélices de giro a izquierdas, resultando nulo la suma de las fuerzas que generan. Este juego de sumas y restas de fuerzas es el que permite la maniobrabilidad de este tipo de aeronaves. Si todos los rotores producen la misma fuerza de sustentación y esta se encuentra en equilibrio con el peso de la aeronave, entonces el aparato se mantendrá en vuelo estacionario. Si este equilibrio se ve alterado porque uno de los rotores presenta más o menos velocidad angular que el resto, entonces se producirá el balanceo del aparato (Ruipérez, et al., 2016).

Figura 10. Multirrotores.



En su conjunto, los UAV de ala rotatoria pueden despegar o aterrizar de forma vertical sin requerir de infraestructuras externas. Este tipo de aeronaves presentan un alto nivel de maniobrabilidad, pudiendo realizar desde vuelos estacionarios hasta la realización de maniobras de elevado nivel de precisión, lo que les permite llevar a cabo misiones tanto en interiores como en exteriores. Son capaces de volar a alturas muy bajas con respecto al suelo, lo que les permite captar imágenes con un buen nivel de resolución, debido a su mecánica de vuelo poseen una buena capacidad de carga. Estas aeronaves presentan tiempos de autonomía de vuelo limitados, ya que poseen un elevado consumo energético, esto hace que los UAV de ala rotatoria estén limitados a sobrevolar áreas relativamente pequeñas (Santana 2017).

2.3.5 Implementación de teledetección con UAV

Los UAV brindan un gran aporte por las capacidades de monitoreo en tiempo real y el alto detalle en las imágenes que obtienen, además de que son más económicos que las técnicas de fotografía aérea tripulada (Wallace et al., 2016). Aunque el rendimiento de vuelo es corto, se ha demostrado en diversos trabajos que es suficiente para la obtención de la base de datos o la información requerida (Ramírez, 2013); no obstante, por sí solos los UAV no tienen un gran impacto, pero al combinarlos con sensores, software y algoritmos de programación, son una herramienta que puede obtener información de alto impacto capaz de proponer la toma de decisiones y acciones adecuadas a las problemáticas actuales como:

Superación de acceso a topografía: Una de las aplicaciones que tienen los UAV con respecto a lugares donde existe una restricción de acceso por topografía accidentada, por ejemplo, trabajos de Ramírez y colaboradores (2013), dan evidencia del uso para el monitoreo de Áreas Naturales Protegidas, las cuales presentan pendientes continuas, dificultando el acceso de las brigadas y aumentando el riesgo de sufrir accidentes (Figura 11). Estas limitaciones son superadas con el uso de UAV, logrando obtener información de la caracterización de cobertura de suelo, cobertura vegetal y registro de presencia de fauna. Otra

evidencia del uso de UAV se refleja en estudios enfocados en el reconocimiento de diferentes especies vegetales al usar la adquisición de imágenes mediante métodos no destructivos en cultivos (Aguera et al., 2011).

Figura 11. Superación de topografía accidentada.



Fuente: <http://www.drone4work.es/joomla/index.php/servicios/busqueda-y-rescate>

Se pueden implementar los UAV en el análisis de suelos al comparar los grados de erosión mediante las imágenes captadas y el reconocimiento en el campo, tomando en consideración que en algunas zonas no es posible acceder por las complicaciones del terreno. De igual manera, se analizan las fotografías aéreas de la serie histórica para observar los cambios, y las consecuencias de la acción antrópica a lo largo de los años (Martínez-Torres, 2018).

Uso de Tecnologías UAV en el sector Agrícola: La fuente de imágenes tradicional para la agricultura de precisión es el satélite, pero recientemente los UAV se están convirtiendo en la fuente preferida debido a una serie de ventajas que ofrecen: mayores resoluciones espaciales, optimización de tiempo y menores costos (Lu et al., 2015).

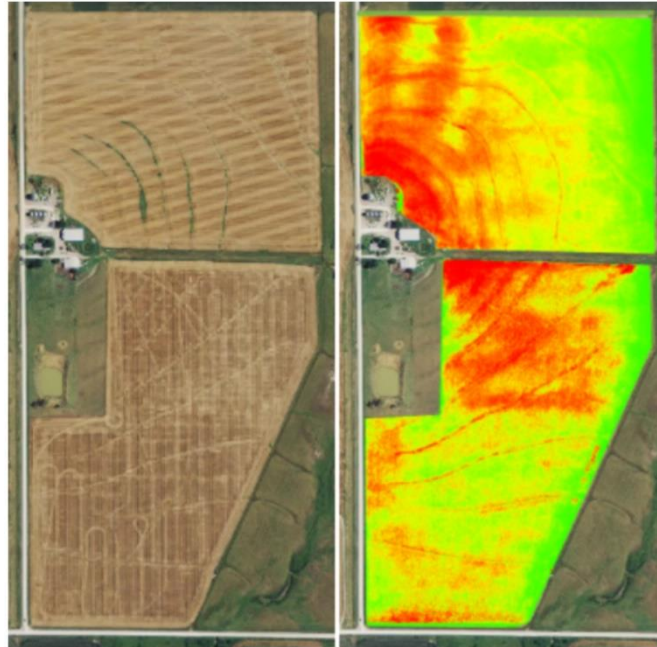
La implementación de UAV en estudios de agricultura de precisión tiene mayor desarrollo que en otros ámbitos (Singh y Frazier, 2018). Por ello, se han

desarrollado diversas técnicas de monitoreo y análisis de imágenes mediante software especializado, con este conjunto de herramientas que estudian las variables que destacan en el cultivo y se detectan posibles anomalías, las cuales, al ser conocidas en tiempos óptimos, facilitan el control y mejor aprovechamiento de cultivo (Mogili y Deepak, 2018).

En el centro de la expansión de la agricultura inteligente se encuentran los robots agrícolas, entre los que se han aplicado ampliamente los UAV (Ju y Son, 2018; Muchiri y Kimathi, 2016) para reducir significativamente las horas de trabajo, lo que resulta en una mayor estabilidad, precisión de medición y productividad. Los UAV no solo son menos costosos que la mayoría de las otras máquinas agrícolas, sino que también son fáciles de operar. Sus aplicaciones además han contribuido a la expansión de muchas áreas de la agricultura, incluida la prospección y pulverización de insecticidas y fertilizantes, la siembra de semillas, el reconocimiento de malezas, la evaluación de la fertilidad, el mapeo y el pronóstico de cultivos (Mogili y Deepak, 2018).

Los agricultores son conscientes de la importancia de utilizar métodos de detección en tiempo real para mejorar las estrategias y procesos agrícolas, como se observó en el monitoreo de la caña de azúcar en Colombia con la finalidad de obtener imágenes que generaran mosaicos para el cálculo de índices (NDVI y SAVI), para la estimación de biomasa, como se muestra en la Figura 12. (Garca y Herrera, 2015), por lo que han surgido varias aplicaciones de agricultura de precisión durante la última década (Zhang y Kovacs, 2012; Primicerio et al., 2012), las cuales implementan cámaras multiespectrales y RGB interconectadas con un UAV para obtener imágenes de alta resolución espacial (Gehrke y Greiwe, 2013).

Figura 12. Obtención de índices NDVI en cultivos.



Fuente: <https://images.app.goo.gl/GRWanhWtR6W9WVMt6>

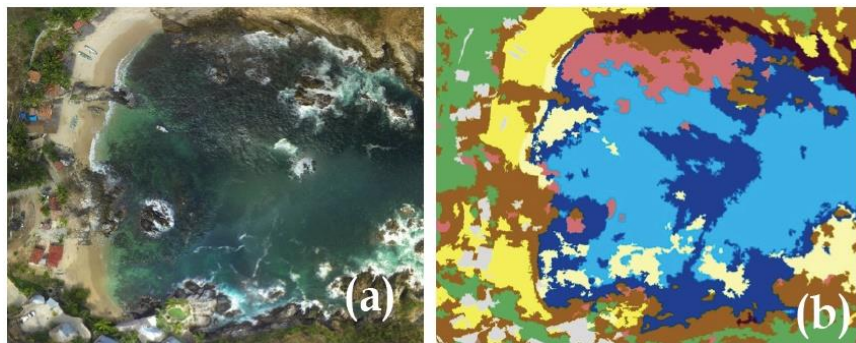
Cartografía y caracterización de espacios territoriales: El futuro de la investigación cartográfica se centra en los mapas, debido a que tienen un papel potencial que desempeñar en el análisis de datos y al cómo esta información puede ser aprovechada por las técnicas de Big Data (Griffin et al. 2017). Los UAV y el creciente número de satélites que producen información espacial continuamente permite que los productos cartográficos puedan convertirse en interfaces para datos espaciales complejos y representaciones de conjuntos de datos heterogéneos complejos que pueden ayudar a dar sentido a los grandes datos geospaciales (Robinson et al. 2017).

Los estudios de García (2015), indican que el uso de drones ayuda a complementar los análisis de degradación, en conjunto con las técnicas tradicionales, mediante trabajo de campo, imágenes tomadas por un UAV, imágenes de satélite y fotografía aérea se analizarán los procesos de degradación y los cambios notorios en los últimos años utilizando un Sistema de

Información Geográfica para manejar toda la información cartográfica con el fin de disponer de datos fiables y obtener cartografía con alto nivel de precisión.

En estudios de Ramírez (2013) se realiza la caracterización de paisaje sumergido implementando UAV como herramienta de captura de imágenes, en la cual obtienen como resultado un modelo de la cobertura del paisaje sumergido en la bahía de Estacahuite (Figura 13) por medio de la técnica de clasificación supervisada y el uso de algoritmo de máxima probabilidad.

Figura 13. Modelo de cobertura de bahía de Estacahuite.



Fuente: Ramírez, 2013

2.3.6 Vehículos Aéreos no Tripulados como herramienta de teledetección en el sector forestal

La teledetección es una alternativa rápida y de bajo costo, la cual cubre grandes superficies con diferentes niveles de resolución y se ha usado para monitorear la información de interés relacionados con el estado de los bosques de manera confiable y actualizada (Vivas, 2015). Los sistemas de información geográfica han sido la principal herramienta informática para integrar la información espacial en mapas. A partir de la década de 1980, con el uso intensivo de los satélites, se facilitó el monitoreo de la superficie terrestre con la incorporación de tecnología de sensores remotos, lo cual mejoró los métodos para análisis, procesamiento y despliegue de información espacial de variables de interés (Ojeda et al. 2014). Sin embargo, ante la demanda de información detallada, los satélites tienen la limitante de suministrar información temporal discontinua con un costo muy alto.

Ante estas limitaciones, el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV) son una alternativa viable de bajo costo para el monitoreo, equipados con sensores multifuncionales y complementados con sistemas de navegación autónoma. El uso de UAV facilita el monitoreo que las condiciones climáticas o de resolución espacial que limitan a los satelitales (Figura 14), (Mulla, 2013).

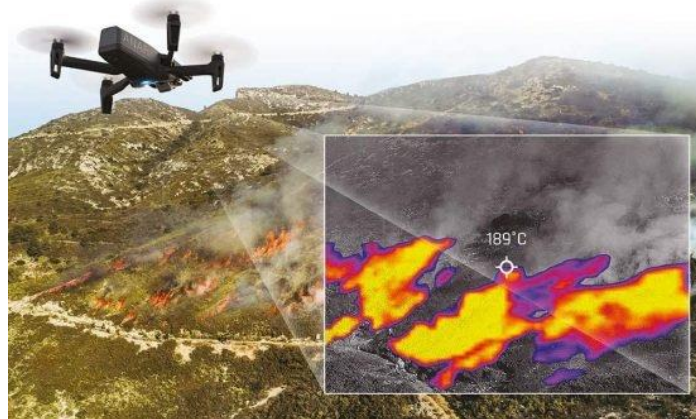
Figura 14. Resolución Espacial de las plataformas de teledetección.



Fuente: <https://images.app.goo.gl/zvpPockfAnnmv4DD9>

Monitoreo de las masas forestales: La necesidad de mejorar la recolección de información forestal en torno a reducción de catástrofes, como incendios forestales (Figura 15), hace que algunas de las aplicaciones con la teledetección se faciliten con la implementación de UAV, actividad que es difícil llevar a cabo utilizando aeronaves tripuladas o de teledetección por satélite. El uso de vehículos sin tripulaciones como los UAV permite volar cerca de las copas de los árboles varias veces para registrar la magnitud de un incendio forestal en curso sin poner en peligro la seguridad de las tripulaciones y realizar grabaciones de video, captura y transmisión de imágenes que fortalecerán las medidas de detección y prevención de incendios (Iglesias, 2016).

Figura 15. Implementación de UAV para el monitoreo y detección de Incendios.



Fuente: <https://images.app.goo.gl/sUSFqQuGqCVY2ECb7>

Otro de los problemas que se dan a menudo en el ámbito forestal, es la deforestación tropical, que sigue siendo un importante motor de las emisiones de gases de efecto invernadero y pérdida de la biodiversidad. Según Kho (2012), la teledetección con UAV se utiliza cada vez más para evaluar los cambios en la cubierta forestal (Figura 16), la distribución de especies y las reservas de carbono.

Figura 16. Monitoreo de plagas con UAV



Fuente: Hall et al., 2016

La información a nivel de parcela es de vital importancia para la silvicultura sostenible, pero los detalles necesarios para el análisis y diagnóstico no puede

extraerse de los enfoques de teledetección de resolución media o gruesa (Tang y Shao, 2015). Por lo tanto, la resolución espacial fina (< 10 cm por píxel) de los UAV brinda una herramienta que permite obtener la información en tiempo real con detalles precisos del objeto de estudio.

Los enfoques alternativos para evaluar el cambio en la estructura y composición del bosque utilizando tecnología de teledetección, han demostrado ser prometedores para aliviar la necesidad de métodos de campo costosos que consumen mucho tiempo, y pueden proporcionar parámetros adicionales para evaluar hábitats que no son logísticamente factibles con estudios de campo terrestre (Singh y Frazier, 2018).

2.4 Bosque de Alta Montaña

Las montañas son ecosistemas complejos y muy diversificados. Los bosques son una parte integral de estos ecosistemas y contribuyen significativamente a sus características clave como: suministros de agua, depósitos de diversidad biológica, áreas objetivo para recreación, centro de identidad cultural y patrimonio. En 1990, el mundo tenía 4 128 millones de hectáreas (ha) de bosque; en 2015 esa área había disminuido a 3 999 millones de ha, lo que equivale a un 30.6% de pérdidas (FAO,2015).

Se pueden definir a los bosques de montaña, como aquellos que se encuentran en zonas con una elevación de 2,500 m sobre el nivel del mar o más, con cambios bruscos de elevación dentro de una distancia corta (pendiente). Cubren aproximadamente 900 millones de hectáreas de la superficie terrestre del mundo, los ejemplos van desde las cordilleras de los Alpes, los Pirineos, los Balcanes y los Cárpatos en Europa hasta las cordilleras de los Apalaches y las Rocosas en América del Norte, los Alpes Australianos, las Tierras Altas de Guayana en América del Sur, las montañas en África Central y La cordillera de los Andes en América del Sur y Central (DOF, 2016).

Los bosques de montaña se distribuyen en una franja altitudinal relativamente angosta con presencia de nubes y neblina (Hamilton et al., 1995), abundante precipitación, elevada condensación de agua sobre la vegetación y baja tasa de pérdida por evapotranspiración (Bruijnzeel et al., 2004). Esta condición ambiental genera influencias en los ámbitos hidrológicos, ecológicos, fisiológicos, estructurales, de composición florística, de fisonomía del bosque y de propiedades de los suelos (Huber, 1986; Stadtmuller, 1987; Bruijnzeel et al., 2004).

La distribución de los bosques de alta montaña en México es discontinua, semejando un archipiélago de parches de bosque sobre las principales cadenas montañosas (Vázquez-García, 1995). Se distribuye sobre la Sierra Madre Occidental desde Sonora hasta Michoacán; en la Sierra Madre Oriental desde el sur de Tamaulipas hasta el centro de Veracruz; a lo largo de la Faja Volcánica Transmexicana; en la Sierra Madre del Sur en Guerrero y Oaxaca; en la Sierra Norte de Oaxaca y en la Sierra Madre de Chiapas. Este bioma incluye a un conjunto amplio de asociaciones heterogéneas que varían geográficamente en la composición florística, estructura, estado de conservación y grado de perturbación al que están siendo o han estado sometidos (Rzedowski, 1998; Challenger, 1998; Ramírez-Marcial et al., 2001; Luna-Vega et al., 2006).

Los bosques de montaña son reconocidos también como sistemas prioritarios para la conservación y restauración debido al papel vital que desempeñan en el mantenimiento de los ciclos hidrológicos y de nutrientes (Hamilton, 1995; Brujnzeel, 2001). Dentro del marco de la “Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales” (FAO, 2006), el bosque de niebla o de montaña ha sido reconocido a nivel mundial como un ecosistema que requiere de atención especial debido a su relevancia hidrológica. Dado su importante papel en los ciclos hidrológicos, la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), en el esquema de pagos por servicios ambientales hidrológicos, reconoce una categoría especial para los bosques de montaña.

2.4.1 Funciones de los Bosques de alta montaña

Funciones de cuencas: Los bosques de montaña son un componente clave del manejo integrado de cuencas hidrográficas, ya que contribuyen al control de la erosión del suelo y a la reducción de la concentración de sedimentos aguas abajo. Además de mantener los suelos en su lugar, los bosques de montaña y los árboles contribuyen a la regeneración de los suelos. Debido a su considerable capacidad de infiltración, los bosques pueden almacenar grandes cantidades de lluvia y reducir las tasas de escorrentía (FAO,2009).

Mitigación de riesgos: Son los protectores más efectivos contra riesgos tales como inundaciones locales, avalanchas, caídas de rocas y desprendimientos de tierras. La capacidad de un bosque de montaña para cumplir funciones de protección depende de su posición en la ladera de una montaña, su tipo y su condición (estructura, densidad, salud, mezcla de especies y edades). Para ser resistente a los peligros naturales, un bosque debe estar compuesto por árboles de diferentes alturas, edades y especies (Gottle y Sène, 1997).

Biodiversidad y seguridad alimentaria: Grabherr (1994) identifica las montañas como "puntos calientes de biodiversidad" y "motores evolutivos" debido a la proporción de plantas, mamíferos, aves, reptiles y anfibios. La alta biodiversidad de las zonas montañosas también contribuye significativamente a la seguridad alimentaria; muchas de las plantas cultivadas en todo el mundo como las papas y los cereales se originan en zonas montañosas, incluidos los bosques. Además, los bosques de montaña albergan una gran cantidad de productos forestales no madereros, como: bayas, hierbas, hongos y plantas medicinales.

Calidad del aire: Las regiones montañosas son menos adecuadas para actividades industriales o agrícolas intensivas que las llanuras y, por lo tanto, constituyen entornos menos influenciados por el hombre. Los árboles y los bosques contribuyen significativamente al aire limpio en las montañas: existe evidencia de investigación en Europa de que la capacidad de almacenamiento de carbono de los bosques de coníferas de montaña alcanza el triple del

promedio de los bosques, es decir, 157 toneladas de C por ha contra 53.2 (Pardos, 2010).

Leña y madera: A nivel mundial, la información cuantitativa sobre la producción de madera en los bosques de montaña es limitada; sin embargo, los estudios de caso de comunidades de montaña proporcionan información sobre la importancia de la madera y los productos de madera relacionados dentro de las economías locales (Gregersen, 2000; Soudan y Zingari 2000).

Cultura, turismo y recreación: Forman parte de un paisaje cultural que contribuye a moldear y mantener las identidades de las personas, las comunidades, las aldeas y todos los grupos culturales (Butt y Price, 2000). En muchas partes del mundo, las montañas son destinos turísticos clave; los bosques de montaña se suman a la belleza escénica de los paisajes, los parques nacionales y las áreas protegidas, de las cuales una alta proporción se ubica en zonas de montaña. Debido a todas estas razones, los bosques de montaña están experimentando niveles crecientes de uso recreativo.

2.4.2 Atención necesaria a los bosques de montaña

Los bosques de montaña son ecosistemas frágiles debido a sus condiciones orográficas y climáticas, por lo que la gestión de conservación es evitar su uso excesivo y degradación, ya que esto puede llevar a problemas ambientales como: la erosión del suelo, desprendimientos de tierras, desprendimientos de rocas, la reducción del almacenamiento de agua, el secado de manantiales y la pérdida de biodiversidad, por lo que es necesario generar una planificación especial y medidas adecuadas para garantizar sus funciones productivas, de protección, sociales y culturales de las montañas (FAO, 2020).

Se tienen aspectos clave para los forestales de montaña como la planificación y el monitoreo. La planificación del uso del suelo debe tener en cuenta el entorno de mayor riesgo que presentan las montañas. La zonificación de los bosques de montaña debe identificar áreas que son especialmente importantes para ciertas

funciones forestales, como la protección contra peligros, la conservación de la naturaleza, la gestión del agua, los pastos forestales y la producción de madera. El propósito, el tipo y el impacto de cualquier intervención en los bosques de montaña requieren una consideración cuidadosa.

Amenazas

La permanencia del bosque de montaña está sometida a actividades antrópicas o condiciones ambientales que limitan el mantenimiento y la viabilidad del funcionamiento del sistema, por ejemplo, una variación temporal puede incidir en la condición presente del bosque o tener una alta probabilidad de ocurrir en los próximos años, o haber sido un factor que ocurrió en el pasado y cuyos impactos siguen teniendo efecto sobre el bosque tales como:

Las alteraciones en los patrones de precipitación y distribución de las nubes, resultado del cambio climático (IPCC, 2007), pueden ser amenazas importantes que enfrenta el bosque de montaña (Foster, 2001). Los bosques de montaña se presentan en zonas donde las nubes a la altura de la vegetación están presentes continua o frecuentemente (Hamilton et al., 1995). El creciente número de estudios y esfuerzos de modelación de los impactos del calentamiento global sobre el bosque de montaña coinciden en señalar que se trata de un sistema particularmente vulnerable al cambio climático (Foster, 2001). Los bosques más fragmentados, inmersos en una matriz donde predominan pastizales y cultivos agrícolas, localizados en la cima de montañas (condiciones que pueden exacerbar los efectos del cambio climático), se consideran más susceptibles al calentamiento global y, por lo tanto, se les asigna un puntaje alto en esta amenaza.

Otra amenaza que enfrenta el bosque de montaña es la tala ilegal de madera, que afecta tanto áreas de propiedad comunal, ejidal y privada como áreas naturales protegidas. La tala indiscriminada de bosques naturales disminuye la protección forestal, permitiendo que el viento, las lluvias arrastren la capa fumífera, superficial, y provoque la erosión del suelo, además trae consigo la

destrucción de miles de especies animales que habitan dentro de los bosques, provocando la erosión de suelos y el desequilibrio del medio natural (Muñoz et al., 2006; Williams-Linera, 2002; ITTO, 2005).

Si bien en México se cuenta con grandes cantidades de recursos, también estamos en los primeros lugares en tasas de deforestación en América Latina (segundo lugar) y a nivel mundial (sexto lugar) (Capital Sustentable, 2011). Esta problemática es consecuencia, básicamente, del cambio de uso de suelo para dar lugar a superficie de uso agrícola, ganadero o urbano, todo esto afecta el equilibrio ecológico del bosque y ha ocasionado que éste se encuentre en condición de riesgo para su supervivencia (Muñoz-Villers y López-Blanco, 2007; Echeverría et al., 2007).

En México se practica el pastoreo en el bosque. Entre los efectos más nocivos de esta práctica se encuentran la compactación del suelo, daños en el tronco y follaje de arbustos y árboles, y efectos negativos sobre la regeneración de especies arbóreas (Ramírez-Marcial, 2003), tales efectos pueden diferir dependiendo del tipo de animales introducidos; al parecer el daño ocasionado por ganado ovino y caprino es de los más perjudiciales.

2.4.3 Bosque de *Pinus hartwegii*

Una de las especies endémicas de pino que se desarrolla en las partes altas de las montañas de México y Guatemala es el pino de altura (*Pinus hartwegii* Lindl.), que constituye el límite superior arbóreo (treeline) expuesto a temperaturas medias anuales de 6 a 7° C (Körner y Paulsen, 2004); a su vez, *Pinus hartwegii* es una de las coníferas más vulnerables a los cambios climáticos (Iglesias et al., 2006).

Pinus hartwegii es la especie de pino que se distribuye a mayor altitud (2,800 a 4,200 m) en el mundo (Perry, 1991). Esta especie forma bosques monoespecíficos que forman ecotonos con el pastizal de alta montaña (Challenger y Soberón, 2008); asimismo presenta gran adaptación a

temperaturas bajas extremas hasta de -30 °C (Perry, 1991), soportando la caída de nieve durante los meses de diciembre a febrero (Challenger y Soberón, 2008). No obstante, la adaptación de la especie a las bajas temperaturas la expone como una de las más vulnerables al cambio climático (Ricker et al., 2007).

Marca el límite altitudinal arbóreo en México. La captura de carbono y la formación del suelo son las principales fortalezas de esta especie, además de ser un nicho de diferentes especies (CONABIO, 2009). Esta especie cumple funciones de protección a otros recursos, amortiguan los efectos de contaminación ambiental y contribuye como regulador del ciclo hidrológico producto del deshielo de los volcanes que alimenta de agua a los mantos freáticos (Caballero, 1967; Solís, 1994). Por otra parte, los bosques de esta especie resultan una fuente importante tanto biológica como socioeconómica.

Se ha reportado la presencia de poblaciones de *Pinus hartwegii* Lindl. en el Distrito Federal y en los estados de Chiapas, Coahuila, Colima, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Morelos, Nayarit, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Tamaulipas, Tlaxcala, Veracruz y Zacatecas; sus poblaciones se localizan en los picos y montañas más altas de México, a una altura que varía entre los 2 400 a 4 282 metros (Solís, 1994);

Al *Pinus hartwegii* Lindl. se le considera como la especie de pino con mayor tolerancia a las bajas temperaturas. No obstante, con excepción por el rompimiento de las ramas producto del peso de la nieve, es posible afirmar que el hielo y la nieve no lo afectan, al menos aparentemente en la fase de establecimiento y crecimiento (Santillán, 1991).

Las plagas forestales como el muérdago y los descortezadores son su principal enemigo natural. La tala por parte del hombre y la falta de criterios para las reforestaciones, en relación con la obtención de semillas fértiles, son su principal amenaza (SEMARNAT, 2010). En México se han reportado cambios en la distribución altitudinal de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional Izta-Popo

(Beaman, 1962), el Nevado de Toluca (Figura 17), (Lauer, 1973) y el Cofre de Perote (Iglesias y Tivo, 2006), asociados a cambios en la temperatura local.

Figura 17. Bosque de *Pinus hartwegii* APFFNT



Fuente propia trabajo de campo 2017.

2.5 Agentes de perturbación en los bosques de montaña

Las plagas y enfermedades forestales constituyen un factor importante de degradación de los bosques de clima templado. La principal causa de propagación de plagas forestales es el largo tiempo que en ocasiones demora su control (Torres-Rojo, 2020). Otra causa importante de propagación son los esquemas de manejo forestal usados en el país, los cuales favorecen la fragmentación y liquidación rápida de los excedentes forestales, dando por resultado paisajes fragmentados, poco saludables y con alto riesgo para el ataque de plagas y enfermedades (Braier, 2004).

La capacidad de control fitosanitario no es suficientemente alta, ni para el aislamiento doméstico, ni para evitar la incursión de plagas exóticas. Reportes oficiales de CONAFOR muestran un alto riesgo de entrada de plagas exóticas tales como Palomilla gitana y *Glycaspis blimblecombei*, mismas que son capaces

de causar daños económicos, ambientales y sociales de gran magnitud (CONAFOR, 2003).

A pesar de los esfuerzos realizados, existe una baja proporción de la superficie arbolada sujeta a diagnóstico y detección oportuna de las plagas y enfermedades forestales nativas, ya que los programas actuales de diagnóstico cubren proporciones muy limitadas de la superficie forestal no más de 500,000 ha en todos los programas (Torres-Rojo, 2020).

De acuerdo con la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2011), los impactos de las plagas y enfermedades forestales en México se han incrementado desde los últimos diez años en aspectos como: 1) Incremento de la mortalidad de masas forestales, 2) Cambios en la diversidad de los ecosistemas 3) Pérdida de la calidad y cantidad de productos naturales, 4) Deforestación, 5) Degradación, 6) Incendios, 7) Inundaciones y 8) Derrumbes.

Se estima que la disminución en extensión de la cobertura forestal del Estado de México, entre los periodos 1940-1990, fue de 260,000 ha, lo que provocó una alteración en la estructura diamétrica, debido a que los individuos mayores a 80 cm de diámetro prácticamente desaparecieron (PROBOSQUE, 1990). Franco y colaboradores (2006) estiman una tasa de deforestación de 8.4% en el área natural protegida para el periodo 1972-2000, equivalente a 156 ha/año. Aunado a esto se incluye la pérdida de densidad de los bosques, pasando de bosques densos y semidensos a bosques fragmentados. Asimismo, la disminución de la cobertura forestal del bosque de pino denso en ese mismo periodo excedió el 40%.

La presencia de plagas forestales no corresponde a un país o región en particular, sino que es el efecto de fenómenos globales como lo puede ser el fenómeno del cambio climático, el cual incurre en la sanidad forestal a nivel mundial, ya que altera los efectos de las plagas y enfermedades forestales al afectar la diversidad de especies dentro de los ecosistemas; por tal motivo, determinar el comportamiento de insectos y patógenos es primordial, ya que aumenta el estrés

abiótico (sequías, inundaciones, vendavales) y disminuye la capacidad de defensa de los árboles, haciéndolos más susceptibles a los ataques (Moore y Allard, 2008).

En México, el incumplimiento de los programas de aprovechamiento, con una tala excesiva o ilegal, causaron el empobrecimiento y degradación de los bosques y selvas, haciéndolos más vulnerables ante los ataques de plagas y enfermedades. Esta situación reduce los incentivos económicos para que los propietarios (sociales o privados) inviertan en el manejo de recursos forestales, creando un círculo vicioso que favorece la desprotección del bosque y la proliferación de plagas y enfermedades (CONAFOR, 2015).

2.5.1 Impacto del Muérdago

Las poblaciones forestales se encuentran severamente afectadas por muérdago a nivel mundial. Esta planta parásita es encontrada en zonas tropicales y templadas a una altitud desde los 200 metros sobre el nivel del mar (Hawksworth y Wiens, 1996). Estas plantas constituyen el tercer agente de destrucción de los bosques de clima templado frío después de los incendios e insectos descortezadores, ya que están presentes en más del 10% de la superficie arbolada, lo que equivale a cerca de 1.8 millones de hectáreas de bosques de coníferas y latifoliadas (Cházaro-Basañes et al., 1992; Geils et al., 2002; Villa, 2003). A nivel mundial se registran aproximadamente 2,500 especies de plantas parásitas y hemiparásitas. El género *Arceuthobium* pertenece a la familia Santalaceae y se considera el principal agente que afecta las zonas forestales del planeta, con 42 especies (Hawksworth y Wiens, 1996; Rzedowski, 2001). Los datos oficiales publicados en el Compendio de estadísticas ambientales (Semarnat, 2012) muestran que de 1990 a 2010 se tuvo un promedio de 38 640 ha de superficie afectada por las plagas, 36 % por muérdago, 33 % por descortezadores, 20 % por defoliadores y 8 % por barrenadores.

El muérdago es considerado la plaga forestal con mayor extensión en nuestro país (Geils et al., 2002; Villa, 2003) debido a que sus raíces pueden causar

deformación en la madera, reduciendo la vida u ocasionando la muerte del árbol (López-de Buen et al., 2002). En la República Mexicana se reporta la presencia de muérdago en la mayoría de los Estados, y los estudios que han emprendido diversos especialistas mencionan los problemas en Michoacán, Veracruz, Tlaxcala, Morelos, Oaxaca, Guerrero, Querétaro, etc., algunos de los cuales, reportan la presencia desde hace más de veinte años (Martínez et al., 2007).

La Comisión Nacional Forestal sugiere que los ecosistemas forestales comprendidos en los Estados de Durango (61 mil 304), Chihuahua (37 mil 340), Oaxaca (9 mil 719) y Nuevo León (8 mil 959 ha) están siendo afectados por plantas hemiparásitas del género *Phoradendron* y epífitas de la familia *Bromeliaceae* (Figura 18), ocasionando daño severo e incluso la muerte del arbolado de miles de hectáreas.

Figura 18. Muérdago (a) *A. globosum*, b) *A. vaginatum*, c) *Psittacanthus calyculatus*)



Fuente (Cedillo, 2012)

La superficie forestal en la República Mexicana comprende en promedio un 21.5% de la superficie total del país, la cual representa 430 mil km cuadrados, donde 258 mil km cuadrados son de bosques de coníferas. En lo que se refiere específicamente al *Pinus hartwegii*, su regeneración natural ha sido nula debido al estado sobre maduro de las masas por la presencia del muérdago (enano amarillo y enano negro) que infesta los árboles a temprana edad (Franco et al., 2006).

La incidencia en plagas y enfermedades forestales ha aumentado en los últimos años en el Estado de México, lo que representa un riesgo importante para asegurar la conservación de los ecosistemas forestales, la provisión de los servicios ambientales, y la productividad del sector forestal.

Las medidas que se aplican comúnmente en el tratamiento de muérdago son podas higiénicas y el retiro de árboles secos infectados; asimismo, para monitorear áreas forestales afectadas son necesarios recorridos en campo, los cuales requieren de disponibilidad de personal y tiempo, por lo que es importante implementar o innovar métodos de muestreo que permitan identificar áreas críticas afectadas por muérdago a través de monitoreos constantes e identificar factores que están favoreciendo.

2.5.2 Control y monitoreo del Muérdago

Los métodos de tratamiento para el muérdago son principalmente 3:

1. Control Biológico. Consiste en desarrollar insectos u hongos como agentes prácticos del control de plantas parásitas (Askew et al., 2011).
2. Control Silvicultura. Consiste en el manejo de sitios infectados e involucra la detección, evaluación, prevención y supresión del patógeno (Concklin, D. A., & Geils, B.W. (2008).).
3. Control Químico. El desarrollo de un herbicida selectivo para controlar plantas parásitas y/o hemiparesia, (Coria et al., 2010).

Existen además diversos agentes que pueden ayudar a controlar al muérdago como aves, roedores o insectos; por ejemplo, algunos hongos destruyen los tallos de los muérdagos, pero siguen persistiendo en el interior de las ramas o el tallo. Otra posible forma de controlar el muérdago es limitar la fecundación de las flores femeninas, reduciendo la fructificación del muérdago, lo que indica controlar a los polinizadores.

En cuanto al control químico, los mejores resultados se han observado para arbolados jóvenes y de renuevo, pero puede ocasionar daños severos por muerte de ramas asperjadas (Coria et al., 2010). Sin embargo, se han realizado más de 260 pruebas de control químico del muérdago enano sin resultados adecuados en países como Estados Unidos y Canadá.

La poda es otra herramienta importante para el control de los muérdagos mediante la eliminación física del parásito, la cual se debe hacer sobre las ramas infectadas. El manual de CONAFOR 2007, indica que para aplicar un control es necesario podar todas las ramas con muérdago sin exceder del 50% de la copa, pues en este caso el árbol muere, y procurando también podar las ramas que puedan presentar una infección. En caso de que el muérdago se encuentre en el tronco, el árbol se debe remover y, a su vez, realizar una reevaluación del rodal cada dos años para evitar nuevamente una infección por este parásito.

Los métodos de monitoreo para identificar la distribución espacial del muérdago son constantes y se realizan mediante diferentes técnicas de muestreo complementadas con los Sistemas de Información Geográfica. La mayoría de estos estudios revelan que la distribución espacial del MEA no tienen un patrón de comportamiento estable y que los factores que afectan pueden ser variantes (Roxburgh y Nicolson 2005); sin embargo, la pérdida de masa forestal, afectada principalmente por plantas parásitas y plagas, determina que la intensidad de propagación de estos aumente (Moore y Allard, 2008).

La evidencia aquí mostrada ha permitido entender el enfoque de las TIC en el entorno social y como se ha incluido en el entorno forestal para aportar en las crecientes necesidades de monitoreo y control de información. Así mismo se pretende entender las problemáticas que afectan a los bosques con respecto a las plagas y plantas parásitas, tomando como caso de estudio el MEA y el grado de afección que pueden tener, por tal motivo, es importante fortalecer las acciones de control y prevención mediante las diferentes herramientas tecnológicas. Por lo que el siguiente capítulo proveya de información conceptual del tema y las características que definieron las variables de estudio.



Capítulo III

Marco Conceptual

Se explica aquí los conceptos de ciencia, tecnologías y sociedad con la finalidad de explicar la evolución de las TIC y como se han insertado en las tendencias actuales del desarrollo sostenible, ligando los diferentes factores presentes en su evolución, incluyendo los conocimientos científico-tecnológicos.

El desarrollo acelerado de los conocimientos científico-tecnológicos ha dado lugar a innovaciones que benefician a la humanidad, por ejemplo, la producción agrícola se ha incrementado enormemente en muchos lugares del mundo para atender las crecientes necesidades de la población. El progreso tecnológico y el uso de nuevas fuentes de energía han generado una gama completa de productos y procedimientos industriales. Las tecnologías basadas en nuevos métodos de comunicación, tratamiento de la información e informática han suscitado oportunidades para el quehacer científico y para la sociedad en general (Cardero, 2011).

3.1 Ciencia, Tecnología y Desarrollo sostenible

3.1.1 Ciencia

El significado etimológico de ciencia se entiende como “saber o conocimiento”, donde se encuentran dos acepciones: una como saber científico y otra como saber común. Desde este punto de vista (etimológico), se entiende por conocimiento “aquel saber consciente y fundamentado que somos capaces de comunicar y discutir”, distinguiéndose así del conocimiento ordinario o común, el cual es simplemente recordado y no se puede someter a crítica. La ciencia, de hecho, es el conocimiento ordenado y mediato de los seres y sus propiedades, por medio de sus causas (Díaz y Heler, 1985).

Un concepto complejo como el “conocimiento” es difícil de definir de una manera precisa. El diccionario de la Real Academia de la Lengua Española (1993) define al término conocimiento como “acción y efecto de conocer”, donde “conocer” es definido como “averiguar por el ejercicio de las facultades intelectuales la naturaleza, cualidades y relaciones de las cosas”. Desde el punto de vista de

Nonaka (1994), el conocimiento es un concepto multifacético con múltiples significados.

La definición del Diccionario "The American Heritage Dictionary" (1983) define al conocimiento como: familiaridad, conciencia, o entendimiento ganado de la experiencia o el estudio (The American Heritage Dictionary, 1983). Davenport y Prusak (1998) lo define como: el conocimiento es una mezcla de experiencia, valores, información y "saber hacer" que sirve como marco para la incorporación de nuevas experiencias e información, y es útil para la acción.

Se establece que el conocimiento es el conjunto de las "creencias justificadas por la verdad", concepto introducido por Platón. Hessen (1926) establece que el conocimiento es la imagen percibida por el sujeto conforme al objeto observado, dado que le es imposible conocer la totalidad del objeto.

Desde el punto de vista filosófico, el término conocimiento ha ocupado un lugar importante dentro del trabajo de muchos pensadores a través de la historia, tales como Platón, Aristóteles, Santo Tomas de Aquino, Descartes, Kant, Hegel, Marx, Nietzsche, Heidegger, Sartre, entre otros.

Una definición más concreta para la ciencia es: "la ciencia busca explicar la realidad mediante leyes, las cuales posibilitan además predicciones y aplicaciones prácticas (la tecnología)" (Díaz y Heler, 1985). Bunge (1975) define a la ciencia como "conocimiento racional, sistemático, exacto, verificable y por consiguiente falible". Considera que ciencia es "un bien por sí mismo, esto es, como un sistema de ideas establecidas provisionalmente conocimiento científico". Bunge (1980) considera que la verdadera diferencia existente entre la ciencia y la no ciencia se encuentra en el método científico y la finalidad a la cual se aplica, asegurando que "donde no hay método científico, no hay ciencia".

Shulman (1986) afirma que "el conocimiento no crece de forma natural e inexorable"; crece por las investigaciones de los estudiosos (empíricos, teóricos, prácticos) y es, por tanto, una función de los tipos de preguntas formuladas,

problemas planteados y cuestiones estructuradas por aquellos que investigan. El conocimiento ordinario o común apunta a resolver todo aquel cumulo de problemas de orden esencialmente práctico, que da solución a problemas inmediatos y que exigen una rápida respuesta.

La investigación científica inicia con un conocimiento empírico y ordinario que permiten resolver o plantear problemas. En sus inicios, el hombre por observación natural comienza a ubicarse en la realidad, apoyado en el conocer que le da la experiencia de sus sentidos y guiado únicamente por su curiosidad. Este conocer inicial aprendido en la vida diaria se llama empírico, por derivar de la experiencia, y es común a cualquier ser humano. El conocimiento científico, por tanto, es aquel que se ha obtenido mediante un proceso de investigación que puede volver a someterse a prueba, enriquecerse y llegado el caso superarse, mediante dicho proceso. (Arce y Long, 1992).

Para Díaz y Heler (1985), el conocimiento científico es un conocimiento objetivo que se estructura en sistemas verificables, obtenidos metodológicamente y comunicados en un lenguaje construido con reglas precisas y explícitas donde se evita la ambigüedad y los sin sentidos de las expresiones. Wartofsky (1978) afirma que la característica más importante del conocimiento científico se concreta en ser explícito y rentable.

Para entender la dimensión del concepto de ciencia, John Ziman (1981), en su texto "El conocimiento público", analiza cuatro definiciones; la primera manifiesta que la ciencia es el dominio del medio que rodea al hombre. Esta interpretación sólo se concentra en las aplicaciones del conocimiento científico, no considera los procedimientos intelectuales y da prioridad a las cosas más que a las ideas.

En la segunda definición dice que la ciencia es el estudio del mundo material. Considera que esta interpretación es aceptada en el pensamiento popular y se deriva del gran debate entre ciencia y religión (espiritual – material). Dejando a un lado esta interpretación, el significado tiene deficiencias, porque si sólo

considera el aspecto material, quedan excluidas las ciencias exactas y las ciencias sociales.

La ciencia es el método experimental y constituye la tercera definición; el cuestionamiento que se da a esta interpretación es que no todas las ciencias consideran para sus estudios esta metodología que está vinculada con el experimento y la observación, como es el caso de la matemática, la geometría, la lógica, entre otras.

Finalmente, a la ciencia se la entiende como la que llega a la verdad por inferencias lógicas de observaciones empíricas. Esta concepción se basa en los principios de inducción, es decir, si lo que se ha visto sucede continuamente, es casi seguro que no varíe, por lo tanto, se le puede considerar como un hecho básico o una ley. El cuestionamiento que se hace a esta postura es respecto al esquema lógico inductivo que no deja espacio suficiente para errores; si se hace un análisis de la construcción del conocimiento científico se evidencia que las verdades a las que se llega a partir de la investigación son parciales e incompletas.

3.1.2 Tecnología

Se considera aquí la tecnología como concepto genérico y las conexiones de este con la técnica y la ciencia. La conceptualización de tecnología de acuerdo con Bunge (1980) quien establece como necesario una inequívoca distinción entre técnica y tecnología. La técnica, se relaciona con habilidades prácticas vinculadas a procesos artesanales, y la tecnología supone una sistematización basada en conceptos científicos como la ciencia que aporta formas de saber y la tecnología proporciona formas de hacer.

La tecnología ha sido parte de la historia, desde los orígenes de la humanidad se ha manipulado la naturaleza a través de técnicas y métodos que permitieron mejorar las condiciones de vidas; desde la época del paleolítico (inferior a 600,000 años A.C.), cuando el hombre comenzó a formar tecnología al convertir

los recursos naturales en herramientas simples, por ejemplo, el tallado de piedras afiladas para hacer incisiones en la piel de un animal muerto con el fin de comérselo. A partir de este momento se produjo el efecto saliente del uso de las herramientas depuradas para emprender el sometimiento del entorno a su servicio (Fraiooli, 1999; García, 1965).

Resulta incuestionable que casi todo lo que se realiza día a día es posible gracias a la ciencia y tecnología. Se tratan de tecnologías fuertemente relacionadas en la sociedad, en el sistema socioeconómico y en la organización de las acciones cotidianas, de este modo, parecen escapar a nuestra capacidad de elección y control (González, López y Luján, 1996:19).

Martínez (1996) advierte que tecnología no es un término creado recientemente, ya que los autores clásicos, griegos y romanos ya hacían uso de éste, el Cuadro 1 ilustra las diferentes visiones de tecnología de acuerdo con la interpretación que hace Martínez (1996).

Cuadro 1. Definiciones de Tecnología.

Bechmann (1977)	La tecnología explica de manera completa, clara y ordenada, todos los trabajos, así como sus consecuencias y fundamentos.
Kearseley (1984)	El término tecnología, en su acepción más amplia, se suele identificar con acción y de hecho se puede entender como aplicación práctica, si bien se añade que esta debe estar sistematizada o más concretamente, debe ser una aplicación práctica de la investigación científica.
Bunge (1984)	Tecnología es el campo de investigación, diseño y planeación que utiliza conocimientos científicos con el fin de controlar cosas o procesos naturales, de diseñar artefactos o procesos, o de concebir operaciones de manera opcional.
Martínez (1996)	Tecnología se entiende como los diseños de estrategias de acción y los medios necesarios para su realización que, basados en el conocimiento científico y en la experiencia personal, son empleados por el hombre, ampliándose sus capacidades naturales, con

	la intención de intervenir sobre su entorno y con la peculiaridad de que esta acción pueda ser reproducible con similares resultados.
--	---

Adaptado de Martínez, 1996.

El concepto de tecnología ha evolucionado a lo largo de la historia e incidentalmente en el transcurso del siglo pasado como fruto de los continuos cambios culturales, económicos y sociales que de manera directa han influido en la calidad de vida, en la transformación del trabajo, en la comunicación y el ocio, entre otros.

Es importante reconocer la relación tan estrecha que tiene la tecnología con la sociedad y el papel que el desarrollo de la tecnología ha tenido:

“La historia de las civilizaciones es en cierta medida la historia de sus tecnologías, y nunca hasta la fecha había existido una relación tan estrecha entre las tecnologías y la sociedad, y nunca la sociedad se ha visto tan influenciada por las diferentes tecnologías que están apareciendo; siendo estas, las TIC, las que más destacan sobre todas las tecnologías” (Cabero, 2001: 11).

En el pasado, la influencia de las tecnologías no tenía el mismo impacto porque en la mayoría de los casos el beneficio era indirecto; sin embargo, hoy en día se tiene un interés particular por la tecnología en todos los ámbitos. Mumford (2000) señala que durante los últimos mil años la base material y las formas culturales de la civilización han sido profundamente modificadas por el desarrollo de la tecnología. En esta época hubo un desarrollo importante de lo que se concebía como la máquina, así como de la técnica misma para usarla.

En la revolución industrial se presentan cambios más radicales sobre el uso de la máquina y la técnica misma; en esta época se modificaron los sistemas de producción, se manifestó fuertemente una revolución demográfica, se modificó la estructura social y se gestaron nuevas clases sociales como consecuencia implícita del desarrollo tecnológico. En la actualidad, las tecnologías también

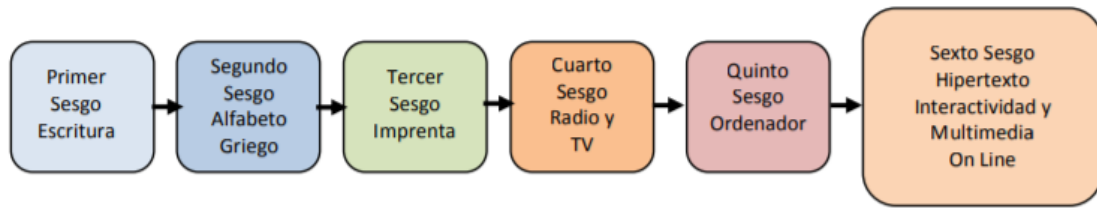
están provocando cambios significativos en el empleo, en la educación, en las comunicaciones y, en lo general, en la forma de vida de la sociedad.

La revolución tecnológica alcanzó su pleno desarrollo a principios del siglo XVIII, con el descubrimiento de las máquinas de vapor, y con ello su utilización inmediata en los transportes fluviales, marítimos y terrestres. La revolución industrial del siglo XIX es considerada como la segunda revolución. La tercera revolución, en plena expansión, se basa en el uso de las tecnologías informáticas en el mundo de los intercambios globales. Por consiguiente, la Revolución industrial, como la postindustrial, ha influido no sólo en la vida cotidiana, sino también en las capacidades intelectuales del ser humano, por lo que de manera paralela se da origen al concepto de las tecnologías Informáticas (Chacón y Gil, 2011).

Otra postura interesante sobre las etapas de desarrollo de las tecnologías es la que propone Kerckhove 1999^a (en Solano, 2003), la cual se muestra en la Figura 19, donde manifiesta que existen una serie de sesgos que reflejan la evolución de la tecnología, estos sesgos fueron eventos que propiciaron el desarrollo de las tecnologías, cada uno impactando de diferente manera según la época en la que se desarrolló. Considera que los cambios más significativos se han dado en el tercer sesgo con la llegada de la imprenta que da paso a la mecanización; en el cuarto sesgo, la radio y televisión dan paso a la cobertura mundial de la comunicación. El quinto sesgo es la computadora, la cual es el punto de partida hacia las nuevas tecnologías en el marco de referencia de esta clasificación, por lo que, en el sexto sesgo se dejan ver las tecnologías actuales, y concretamente con las telecomunicaciones entre dispositivos de manera local, regional o mundial.

Estas concepciones, en lo general, permiten ver aquellas etapas claves en la historia del desarrollo de las tecnologías (Figura 19). La máquina, la escritura, la imprenta, y las TIC han sido las etapas determinantes en la evolución de la sociedad (Cabero, 2007).

Figura 19. Sesgos en la evolución de las Tecnologías.



Fuente: (Cabero, 2007)

Actualmente, el tiempo de vida de una “nueva” tecnología es casi perecedero por la acelerada evolución de esta; cuando una nueva tecnología se integra, apenas se posiciona y ya se desarrolló otra que puede sustituirla. Llegar a comprender la concepción de la tecnología en la sociedad actual y principalmente cuál es su verdadero papel en los diferentes ámbitos, fortalece la visión de las TIC y las ventajas que sobresalen y benefician a la sociedad, superando la crítica de los impactos negativos. Internet es un ejemplo de una tecnología fundamental para la innovación y desarrollo de los procesos educativos; ésta es otra tecnología que caracteriza a la hoy llamada Sociedad de la Información y del Conocimiento (Guzmán, 2009).

3.2 Desarrollo Sostenible

El desarrollo es una condición social en la cual las necesidades auténticas de su población se satisfacen con el uso racional y sostenible de los recursos y sistemas naturales. La utilización de los recursos estaría basada en una tecnología que respeta los aspectos culturales y los derechos humanos. Todos los grupos sociales tienen acceso a las organizaciones a los servicios básicos como educación, vivienda, salud, nutrición y que sus culturas y tradiciones sean respetadas (Reyes, 2009).

El concepto de Desarrollo Sostenible se define como:

"El desarrollo sostenible es el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las

generaciones futuras para satisfacer las suyas." - Nuestro futuro común: Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (ONU, 1987).

Según Gallopín (2003), el desarrollo sostenible implica un proceso de cambio y mejoramiento que se pueda mantener en el tiempo; este planteamiento requiere diferenciar la sostenibilidad como un principio funcional aplicable a determinados sistemas, y que hace referencia a la capacidad de mantenimiento en el tiempo de una situación o condición, mientras que el concepto de desarrollo implica específicamente un cambio de situación o condición, sin tomar en cuenta su mantenimiento, y en este sentido los objetivos que persiga el desarrollo determinarán si este es sostenible o no.

Como señala Rockström (2015), la confluencia de las aspiraciones insatisfechas del bienestar humano, incluyendo el desarrollo económico, y los límites de los ecosistemas que brindan soporte obligan a definir un nuevo marco para el desarrollo sostenible que permita el desarrollo humano dentro de los límites de los sistemas que sustentan la vida en la Tierra. Por esto, es factible plantear que el desarrollo, para ser sostenible, no puede privilegiar un solo propósito o darle mayor énfasis (Harlow, 2013), como ha ocurrido con lo económico y los niveles de consumo material, sino que deberá incluir de forma balanceada objetivos ecológicos, sociales, institucionales, inmateriales, entre otros, según determinadas escalas de valores y en contextos que varían en el tiempo, características que hacen de este un proceso abierto que se alimenta progresivamente.

El desarrollo sostenible no sólo suscita un crecimiento económico, sino que también distribuye equitativamente sus beneficios, regenera el medio ambiente en lugar de destruirlo y fomenta la autonomía de las personas en lugar de marginarlas. Es un desarrollo que otorga prioridad a los pobres, amplía sus opciones y oportunidades y prevé su participación en las decisiones que afectan sus vidas. Es un desarrollo que favorece a los seres humanos, a la naturaleza, la creación de empleos y a la mujer (PNUD, 1994).

El concepto de desarrollo sostenible fue inicialmente aplicado a la actividad productiva por la necesidad de paliar la escasez de recursos en la Alemania del siglo XVIII (Novo, 2009). En los inicios de los 70 se encontraron tres grandes corrientes de pensamiento: una corriente ecologista conservacionista, expresada en una serie de trabajos hechos por biólogos y ecólogos que confluyen en la tesis de los límites físicos y la propuesta de crecimiento cero paradigmáticamente formulada en el Primer Informe al Club de Roma; una corriente desarrollista o ambientalismo moderado que se expresa en la declaración sobre el medio humano por la ONU en Estocolmo; y una corriente crítica humanista que pretende plantear una alternativa al orden dominante, que estuvo expresada por la propuesta de eco-desarrollo, más o menos integrada a la propuesta general de un nuevo orden económico internacional defendida por los países no alineados (Larrouyet, 2015).

El primer principio de la Declaración de Río coloca a los seres humanos al centro de las preocupaciones relacionadas con el Derecho Sustentable, reconociendo el derecho de una vida saludable y productiva en armonía con la naturaleza. La agenda 21 es un programa de acción en todas las esferas que competen al Desarrollo Sustentable, considerando las dimensiones sociales y económicas, la conservación y gestión de los recursos naturales para el desarrollo, el fortalecimiento de los grupos principales (mujeres, jóvenes, pueblos indígenas) y los modos de ejecución.

Estos informes mostraban la gravedad de ciertos problemas a partir de la proyección para el futuro de la humanidad, de las tendencias mundiales presentes frente a esta alarma. Se desarrollaron dos respuestas paralelas y mutuamente influenciadas: una expansión del movimiento ambientalista, animado mediante la creación de ONG nacionales e internacionales, principalmente en los países desarrollados y, en segundo lugar, las primeras formas institucionales internacionales y nacionales de asumir el tema y trazar políticas, lo que se concretó por un lado en la celebración de conferencias y convenciones de la ONU y la creación de instituciones específicas

(internacionales) y, por otro, a nivel de los países, en la promulgación de las primeras leyes ambientales y la creación de organismos estatales con competencias en el tema (Deléage, 2000).

La ONU en el 2000, se establece la cumbre del milenio de las Naciones Unidas, cuyo objetivo era reunir esfuerzos para combatir la pobreza, el hambre, las enfermedades, el analfabetismo, la degradación del medio ambiente, la discriminación contra la mujer y crear una asociación mundial para el desarrollo, declaración conocida como los 8 objetivos del desarrollo del milenio (ONU, 2000).

Las soluciones que se postulaban eran generales para aplicar tecnologías limpias y frenar o reducir el crecimiento poblacional y económico, dado que en los países del tercer mundo se concentra la mayor parte de la población mundial, por lo tanto, se tomó el desarrollo sostenible como objetivo educativo en la Declaración de la Década de la Educación para el Desarrollo Sostenible (OEI, 2004).

En el 2015 las Naciones Unidas deciden transmitir el documento final titulado “Transformar nuestro mundo: la agenda 2030 para el desarrollo sostenible”, la cual contempla los 17 objetivos del desarrollo sostenible, pretendiendo, por un lado, retomar los objetivos del desarrollo del milenio y lograr lo que con ellos no se consiguió, y, del otro, contribuir a la construcción de un futuro sostenible (ONU, 2015). Importante señalar que dicha iniciativa surge como respuesta al acuerdo alcanzado en la cumbre de la tierra RIO+20, celebrada en junio de 2012 en la ciudad de Rio de Janeiro.

En la declaración del 12 de agosto del 2015, cuando hacen referencia a “nuestros principios y compromisos comunes” en el inciso 11, realizan un resumen sobre la importancia que ha tenido el tema de la sostenibilidad en los últimos 20 años cuando señalan y reafirman: los resultados de todas las grandes conferencias y cumbres de las naciones unidas, que han establecido una base sólida para el desarrollo sostenible y han ayudado a conformar la nueva agenda, como la declaración de Rio sobre el medio ambiente y el desarrollo, la cumbre mundial sobre el desarrollo sostenible, la cumbre mundial sobre desarrollo social, el

programa de acción de la conferencia internacional sobre la población y el desarrollo, la plataforma de acción de Beijing y la conferencia de las naciones unidas sobre el desarrollo sostenible (ONU, 2015).

El reconocimiento de que actualmente se vive una fuerte crisis ambiental con fuertes repercusiones que hacen peligrar la existencia del planeta mismo ha generado la necesidad de establecer una sociedad sustentable en términos ambientales, sociales y económicos (Salvatierra, 2011).

El desarrollo sostenible se aplica al desarrollo socioeconómico y fue formalizado por primera vez por la Comisión Mundial del Medio Ambiente y Naciones Unidas en 1983. La sostenibilidad demanda también la implementación de nuevos marcos epistemológicos, principalmente relacionados con las definiciones de unidades de análisis, enfoques de integración y criterios de validación (CEPAL 2003). Para garantizar la sostenibilidad, es primordial desarrollar nuevos esquemas teóricos que sean capaces de comprender y predecir con precisión los fenómenos de interacción naturaleza-sociedad (Komiyama et al. 2011).

La sociedad tiene necesidades que cubrir como alimentación, ropa, comida, y así mismo está expuesta a catástrofes de varios tipos incluyendo las ecológicas; y el desarrollo de la sociedad se ve limitado por la tecnología, los recursos del medio ambiente y la capacidad de este para absorber los efectos de la actividad humana. La transición hacia la sostenibilidad requiere la emergencia y desarrollo de nuevos campos de investigación científica y tecnológica, la implementación de innovaciones productivas que preserven el medio ambiente y la concepción de marcos teóricos revolucionarios que permitan abordar y operar sobre los sistemas complejos y las relaciones entre la naturaleza y sociedad (Lemarchand,2016).

Es imprescindible implementar enfoques transdisciplinarios en la educación superior para poder comenzar a generar nuevos perfiles de científicos y tecnólogos (Gibbons et al., 1994) preparados para resolver problemáticas tan complejas como la demanda de un desarrollo sostenible (Komiyama et al., 2011).

La finalidad del desarrollo sostenible propicia, por lo tanto, a mejorar la tecnología y la organización humana para apoyar la recuperación del medio ambiente de la actividad humana al mismo ritmo en que se ve afectado. Por lo que se procura que las TIC impacten de manera positiva en los objetivos del desarrollo sostenible que se encuentran a su alcance, impactando principalmente en el 4,5 y 9 (Figura 20)

Figura 20. Objetivos del desarrollo sostenible.



Fuente: <https://images.app.goo.gl/nkSxn55QdQuvTyPm7>

Para lograr un futuro sostenible es preciso normalizar los objetivos planteados y convertirlos en un elemento transversal a todos los proyectos e iniciativas futuras que plantean los gobiernos. Para ello, se deben adoptar medidas de seguimiento eficaces, capaces de garantizar que las políticas contemplan las tres dimensiones del desarrollo sostenible: la social, la medioambiental y la económica.

Los recursos naturales marcaban algunas limitaciones al crecimiento económico, particularmente el agotamiento de los recursos no renovables y la capacidad de la biosfera de absorber los efectos de la actividad humana, pero los avances tecnológicos podían permitir su utilización más eficiente a partir de emplearlos en

menor medida, reducir la emisión de desechos y aumentar los niveles de reuso. El hecho de que recursos naturales, como el suelo y el agua, sean limitados en algunos países o regiones concretas; es posible superar estas barreras con el uso de nuevas tecnologías encaminadas al apoyo de la sostenibilidad (López Ornat, 2004).

Las tecnologías actuales deben enfatizarse en reducir el consumo material y energético, la emisión de residuos nocivos al ambiente y las condiciones de trabajo propensas a generar riesgos para la salud humana y el ecosistema o daños irreversibles en los recursos naturales.

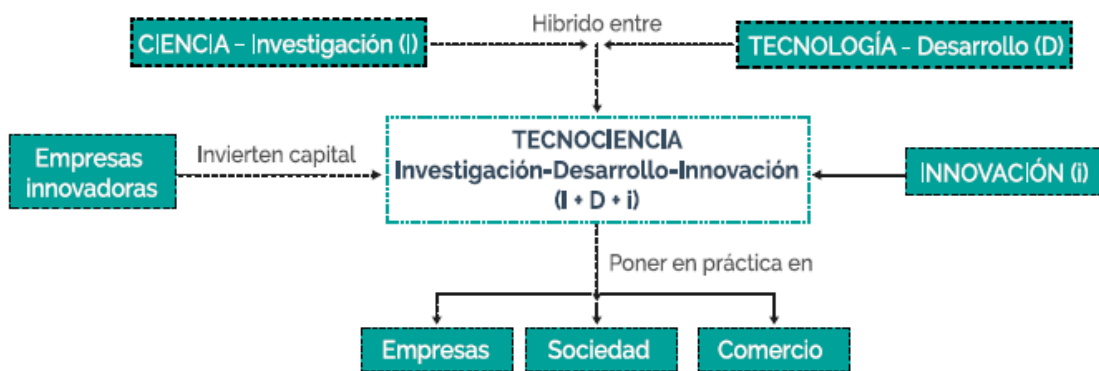
3.3 Ciencia y tecnología para el desarrollo sostenible

La ciencia y la tecnología constituyen un motor importante para el desarrollo de la humanidad, pues no existe actividad donde no estén inmersas estas dos áreas. Los descubrimientos científicos, los avances y las innovaciones tecnológicos han permitido que el ser humano puede tener una mejor calidad de vida, así como progreso y crecimiento en sectores como la agricultura, la minería, la industria, la salud, los medios de comunicación, el transporte, la informática, etc, por lo que la ciencia y la tecnología en el siglo XXI han adquirido un reconocimiento e importancia como elementos necesarios para el progreso de las sociedades. El Estado, los centros de investigación y las industrias invierten recursos con el propósito de generar mayor desarrollo, calidad de vida, rentabilidad y productividad, por lo que apuestan a los conocimientos científicos y tecnológicos para su funcionamiento y permanencia en el mercado mundial (Pérez 2007).

A nivel internacional, el avance en el desarrollo de tecnologías ambientales se ha enfocado en resolver problemas de contaminación una vez que ésta se ha producido en lugar de dar mayor prioridad a promover el desarrollo de aquellas tecnologías limpias orientadas a reducir la contaminación desde el origen de los procesos que la generan (Gavito et al., 2017).

En este sentido, la modernización ecológica, la ciencia y la tecnología juegan un papel importante en la transformación de los procesos de producción y consumo, así como en la creación de innovaciones tecnológicas ambientales. Es decir, la ciencia y la tecnología —junto con el estudio de la economía, el Estado y la movilización social— cobran importancia en la prevención y solución de problemas ambientales (Oltra, 2006); esta perspectiva tiene una relación con la evaluación constructiva de tecnologías y la participación pública en el esquema de la tecnociencia (Figura 21).

Figura 21. Elementos de la tecnociencia.



Fuente: <https://images.app.goo.gl/xwihEpBGctyJ3VBv8>

Las acciones emprendidas bajo la perspectiva de la crisis ecológica buscan realizar la medición de los impactos, reducir los riesgos y gestionarlos para ayudar a reducir su presión sobre el medio ambiente mientras que, bajo la perspectiva de la modernización ecológica, las técnicas se orientan a cambios en la trayectoria de las tecnologías, en las instituciones y en la manera en que las sociedades se conciben en relación con el medio ambiente (Lobera, 2008).

La ciencia y la tecnología han ayudado al progreso y han contribuido a disminuir los riesgos que ha producido la industrialización. Funtowicz y Ravetz (1997) proponen lo que ellos denominan Ciencia Post-Normal, la cual se basa en que la calidad de la investigación científica sea valorada no sólo por expertos sino por comunidades de evaluadores extendidas, esto debido a dos razones: la primera

es la existencia de incertidumbre en un sistema complejo como el medio ambiente, cuyos problemas pueden abordarse de distintas maneras y que conlleva la inclusión de valores en el tratamiento de estos. La segunda es la calidad que se le debe otorgar a la información científica en la toma de decisiones tecnológicas. En consecuencia, su propuesta apunta hacia la democratización de la ciencia, con un nuevo modelo de valoración científico-tecnológico que cree espacios para la participación pública donde la ciencia aporte significativamente a la solución de problemas.

La relación entre ciencia y tecnología consiste en tratar de dar respuesta a la necesidad de aportar al avance del conocimiento y la solución de problemas que enfrenta una sociedad. La difusión social de esta relación es una cuestión central, que está en la base de cualquier estrategia de estímulo a la innovación. Se requiere para ello, un equilibrio entre adoptar para la investigación, parámetros de excelencia y calidad internacionales y asegurarse que contribuirán a la solución de las necesidades de cada país (OEI, 2012).

Existe un consenso creciente acerca de la necesidad y la posibilidad de dirigir los esfuerzos de la investigación e innovación hacia tecnologías amigables con el ambiente y desarrollos científicos y tecnológicos que promuevan la sostenibilidad, lo cual incluye: la búsqueda de nuevas fuentes de energía, limpias y renovables; el incremento de la eficacia en la obtención de alimentos; la prevención de enfermedades catástrofes, así como la disminución y tratamiento de residuos. Este planteamiento exige superar la búsqueda de beneficios particulares a corto plazo (sin tomar en consideración sus consecuencias ambientales y sociales) que ha caracterizado, a menudo, el desarrollo tecnocientífico (Vilches, 2014).

La ciencia y la tecnología para el desarrollo sostenible deben ser interdisciplinarias. Para enfrentar estas expectativas, es esencial que la educación, la investigación y la contribución social se integren de manera apropiada en una combinación de respuestas que se promuevan y se refuerce la innovación en los procesos sustentables (Giannuzzo, 2010).

Las tecnologías tienen un potencial muy importante ya que sus posibilidades de innovación son amplias y se pueden combinar entre sí. Los conocimientos entre disciplinas científicas y tecnológicas se ven potenciadas considerablemente gracias a las TIC; las disciplinas tradicionales convergen y surgen nuevas colaboraciones que traen consigo transformaciones. Esta situación brinda la posibilidad de generar nuevos conocimientos, productos y servicios, así como procesos sociales, económicos y de gobernanza que pueden mejorar la capacidad de cumplir los objetivos del desarrollo sustentable. La importancia de la inclusión de las tecnologías también supone cambios que puedan ser impactantes en ámbitos sociales y económicos, por lo que los cambios tendrán lugar en varios sectores y se propagarán a través de sectores y países a un ritmo acelerado. Asimismo, en el caso de las nuevas tecnologías, se notan cambios muy rápidos en comparación con las disciplinas más maduras, por lo que uno de los factores que limita los cambios tecnológicos en el logro de los objetivos, es la capacidad de empresas y sectores para implementar y difundir tecnologías con eficacia

3.4 Tecnologías de la Información y la Comunicación.

Aunque existe un dilema en el origen del término, las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) tienen un significado más amplio de lo que habitualmente se entiende. Además de las computadoras y del Internet, el término también se refiere a otras tecnologías que apoyan la comunicación y la difusión de información. En 1998 la OECD organizó el Equipo de Trabajo sobre los Indicadores de la Sociedad de Información (Working Party on Indicators for the Information Society o WPIIS por sus siglas en inglés), con el objetivo de fijar una definición internacional estándar de las TIC (OECD, 2003), por lo que se planteó la siguiente definición:

“Están considerados como TIC aquellos productos que sirvan para procesar la información y la comunicación, incluso su transmisión y su presentación, y que lleven a cabo un proceso

electrónico para identificar, medir o capturar un fenómeno físico o bien para controlar un proceso físico” (OECD, 2003:6).

Las TIC también se puede definir como:

“Las Tecnologías de la Información y la Comunicación se pueden concebir como resultado de una convergencia tecnológica, que se ha producido a lo largo de ya casi medio siglo, entre las telecomunicaciones, las ciencias de la computación, la microelectrónica y ciertas ideas de administración y manejo de información. Se consideran como sus componentes el hardware, el software, los servicios y telecomunicaciones” (CAIBI, 2001: 5).

El análisis que hace Cabero (2001:299-300), complementado por Guzmán (2009), muestra las concepciones de las TIC por diferentes autores mostradas en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Definiciones de las TIC.

Autor	Concepción de las TIC
Ortega, (1997b)	Discrimina entre tecnologías convencionales (diaporamas, audiovisuales y prensa) y tecnologías avanzadas (diseño y animación informática, acceso a bibliotecas virtuales y navegación a través de redes,)
Tirado (1997)	Distingue entre nuevas tecnologías y tecnologías avanzadas, indicando que las últimas son aquellas que poseen respeto a las anteriores los atributos de interactividad multimedia frente a la interactividad monomedia de las denominadas “nuevas”, y susceptibilidad de flexibilidad espacio-temporal frente a la flexibilidad espacial y temporal.
Cabero y Martínez (1995)	Hablan de nuevos canales de la comunicación en vez de nuevas tecnologías, ya que estas suelen implicar la utilización de tecnologías tradicionales, pero con usos diferentes y novedosos, es decir, se refiere a la integración

	de las tecnologías anteriores, pero de una forma tanto cuantitativa como cualitativa
Adell (1997)	Las nuevas tecnologías son el conjunto de proceso y productos derivados de las nuevas herramientas (hardware y software), soportes de la información y canales de comunicación relacionados con el almacenamiento, procesamiento y transmisión digitalizados de la información.
Duarte y González (1998)	Las nuevas tecnologías son aquellos medios electrónicos que crean, almacenan, recuperan y transmiten la información cuantitativamente, veloz y en gran cantidad, y lo hacen cambiando diferentes tipos de códigos en una realidad hipermedia
Pérez (1997)	Para las nuevas tecnologías deberíamos contemplar, por una parte, una dimensión técnica, y, por otra, una expresiva, repercutiendo ambas en la creación de nuevos entornos comunicativos
Sáez Vacas (1999)	Las tecnologías de la información comprenden el conjunto formado por las telecomunicaciones y la informática y todos sus antecedentes y consecuentes (microelectrónica, redes de ordenadores, ofimática, groupware, red Internet, tecnologías del multimedia, etc.),
Cebreiro (2007:163)	Se refiere a que estas éstas giran en torno a cuatro medios básicos: la informática, la microelectrónica, los multimedia y las telecomunicaciones. Y lo que más importante, giran de manera interactiva e interconectada, lo que permite conseguir nuevas realidades comunicativas, y potenciar las que pueden tener de forma aislada.
Comisión de Comunidades Europeas	Las tecnologías de la información y de las comunicaciones (TIC) son un término que se utiliza actualmente para hacer referencia a una gama amplia de servicios, aplicaciones, y tecnologías, que utilizan diversos tipos de equipos y de programas informáticos, y que a menudo se transmiten a través de las redes de telecomunicaciones.

La definición inicial de las TIC se enfoca en el sector industrial y en sus inicios se relacionaba fuertemente en las comunicaciones como uno de sus principales

desarrollos tecnológicos; sin embargo, con el paso del tiempo se englobaron diferentes ámbitos para conformar las TIC actuales (Roberts, 2004). Las características identificadas por Cabero (2007), como las más importantes que presentan las TIC se definen en la Cuadro 3.

Cuadro 3. Características de las TIC.

Inmaterialidad	Hace referencia a que la materia prima en torno a la cual desarrollan su actividad es la información e información en múltiples códigos y formas, es decir: visuales, auditivas, audiovisuales, textuales de datos estacionarios y en movimiento.
Interconexión	Se refiere a diferentes formas de conexiones, vía hardware, y a que se permitirá el acto de la comunicación en el que se han desarrollado nuevas realidades expresivas y comunicativas.
Interactividad	Hace referencia a que el control de la comunicación se centra más en el receptor, desempeñando un papel importante en la construcción del mensaje donde el rol del trasmisor evoluciona.
Instantaneidad	Rompe las barreras de espacio y tiempo.
Creación de nuevos lenguajes expresivos	Se refiere a que permiten nuevas realidades expresivas, como es el caso de los multimedia e hipermedia; estos a su vez ocasionan nuevos dominios alfabéticos, potenciando la alfabetización en el lenguaje informático y multimedia.
Ruptura de la linealidad expresiva	Se refiere a que los mensajes tienden a organizarse no de forma lineal, sino de manera hipertextual, lo que traerá una serie de consecuencias significativas, como son la desestructuración del discurso, la transferencia del peso de la comunicación del autor al texto, el desafío de pasar de la distribución de la información a su gestión y la construcción del significado de forma diferente en función de la navegación hipertextual realizada por el receptor.
Diversidad	Se refiere a que no existe una única tecnología disponible, sino que, por el contrario, se tiene una variedad de ellas.
Innovación	Se refiere a señalar que el proceso de innovación de la tecnología es tan acelerado que en ocasiones rebasa al

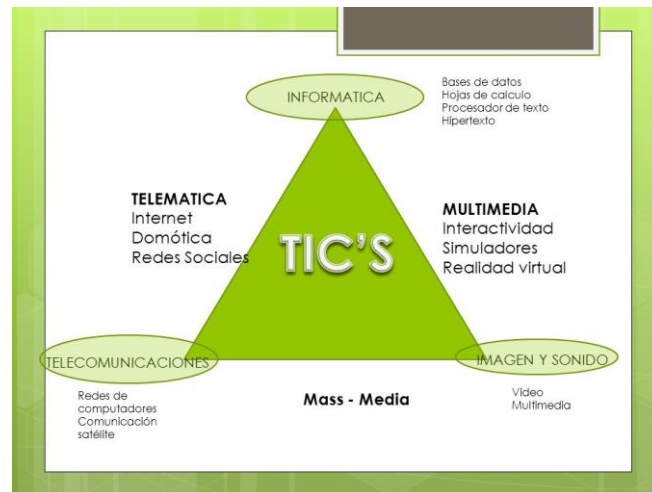
	contexto educativo por su poca capacidad para absorber la tecnología. En muchas ocasiones, cuando se incorpora una tecnología, esta tecnología ya está siendo transformada.
Elevados parámetros de calidad, imagen y sonido	Se refiere a la calidad con que pueden transferir la información. Y, sin lugar a duda, esto se ha logrado por la digitalización de las señales visuales, auditivas y de datos y por los avances significativos en el hardware usado para las comunicaciones.
Potenciación, audiencia segmentaria y diferenciada	Se refiere a la especialización de los programas y medios en función de las características y demandas de los receptores, es decir —en el caso de los medios televisivos—, pueden provocar una segmentación de audiencias, según la conveniencia. En el caso de las comunidades virtuales, rompen el concepto de cultura de masas y se superpone la cultura de la fragmentación de las audiencias en función de los intereses y actitudes de los que participan

Fuente: (Cabero, 2007).

Las TIC han tenido un papel decisivo en el cambio del dinamismo social, cultural y económico. La revolución de las comunicaciones y de la información permiten ir más allá del lenguaje oral, centrada prioritariamente en los hechos de la vida cotidiana: la escritura que, mediante signos gráficos, puede transcribir lo que se habla y conservarse en el tiempo; un ejemplo lo fue la imprenta, un medio para expandir el conocimiento y posibilitó la creciente alfabetización. Finalmente, hasta las nuevas tecnologías, lograron la reproducción y expansión del sonido e imagen a través de múltiples medios como la radio, la televisión, el video, el computador, etc. (Ontoria, 2006).

Actualmente, el término TIC contempla toda forma de tecnología usada para crear, almacenar, intercambiar y procesar información en sus varias formas, tales como datos, conversaciones de voz, imágenes fijas o en movimiento, presentaciones multimedia y otras formas (Figura 22). En particular, las TIC están íntimamente relacionadas con computadoras, software y telecomunicaciones (Tello, 2008).

Figura 22. Conformación de las TIC's.



Fuente <https://images.app.goo.gl/rrRkawt7namf7dVH7>

La llegada de las TIC ha creado muchas oportunidades para los países en desarrollo, ya que el hecho de que las TIC y las prácticas digitales tengan beneficios que van más allá del ámbito económico y sean aplicables en el ámbito de la salud, la política, la administración pública, la educación e investigación, así como en actividades culturales y sociales demuestra el potencial que tiene el desarrollo tecnológico actual (CEPAL, 2007).

Las ventajas de las TIC, en particular de las nuevas tecnologías como la computación en la nube, generan efectos que sobrepasan lo económico y lo empresarial y tienen un amplio espacio que permite mejorar su desarrollo. Las evidencias de estas potencialidades quedan muy claras también cuando se consideran nuevas aplicaciones, como por ejemplo a nivel de salud y educación. En los países desarrollados, las TIC han tenido un rol importante en facilitar una dinámica de profundas transformaciones económicas que se han expresado en un aumento en la productividad (Rovira y Stumpo, 2013).

3.5 Las Tecnologías de la Información y Comunicación en el desarrollo sostenible

Es necesario reflexionar sobre el papel que actualmente están desempeñando las TIC en conjunto con la sostenibilidad, más allá de los límites que las relegan

a un mero asunto económico, las TIC ofrecen, desde una visión de sostenibilidad, aspectos positivos (Panico et al., 2014).

La sostenibilidad se enfrenta a fenómenos inquietantes: el cambio climático, la pérdida de la biodiversidad o la contaminación, todo ello en un entorno de desigualdad creciente entre países, regiones y sectores sociales. Sin embargo, también ha progresado el desarrollo en el sector de las TIC como herramientas que tiene el potencial de liderar un cambio hacia el desarrollo sostenible (Vilches et al., 2014).

Un sector dinámico como el de las TIC está acostumbrado a cambios rápidos, grandes inversiones y al manejo de la investigación y de sistemas complejos, a lo que tenemos que sumar un capital humano innovador y emprendedor, acostumbrado a suministrar servicios que se adivinan clave para crear soluciones que puedan combatir el cambio climático (UNCTAD, 2008).

Es importante reconocer la importancia de las alertas tempranas como parte de un sistema de reducción del riesgo de desastres a todos los niveles a fin de reducir el impacto económico y social, y disminuir la pérdida de vidas; las evaluaciones exhaustivas de los riesgos y el intercambio de conocimientos e información, incluida la información geoespacial disponible.

Las TIC crecieron económicamente un 10.3% en 2008. Las compañías que producen las TIC representan el 6.4% del producto interno bruto mundial (WITSA, 2008); de las 50 empresas más importantes del mundo, 16 están fuertemente relacionadas con las TIC. El aspecto tecnológico no solo involucra al consumo y transformación de la energía, sino que abre la argumentación hacia una crítica del proceso de la evolución sociocultural. El Banco Mundial ha concluido que las empresas que hacen un mayor uso de las TIC son las más productivas, competitivas, rentables y presentan un mayor crecimiento con mayores inversiones (Ferrari, 2012).

Las TIC tienen un papel central, como herramienta generadora de eficiencia, en ámbitos como innovación, seguridad alimentaria, energía, industria, transporte, construcción y prevención de desastres, entre otros (Bárcena, 2012). Las tecnologías establecidas como las emergentes tienen un amplio grado de aplicabilidad a los distintos objetivos de desarrollo sostenible (ODS) para la agenda 2030. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) ha definido 11 líneas de acción que van desde las infraestructuras, los e-health, e-learning o e-science y su impacto en los ODS (García, 2018). La agricultura es uno de los campos en los que se tiene un desarrollo continuo para la inclusión de tecnología que mejore la producción e informe periódicamente el estado de los cultivos (Figura 23).

La tecnología Blockchain, por ejemplo, podría controlar toda la cadena de suministro de alimentos y mejorar los costosos esfuerzos de recuperación de alimentos que, en ocasiones, son necesarios para detener la propagación de enfermedades. En esta misma línea, la Inteligencia Artificial también puede contribuir a revertir el contagio de enfermedades y, con ello, reducir dramáticamente la carga de infraestructuras de salud pública con recursos limitados en todo el mundo.

Figura 23. Incurción de las TIC en la agricultura.



Fuente: <https://images.app.goo.gl/XSDy5HYasMZBWuEc7>

Los ODS actúan sobre una lista propia de metas, algunas medibles y otras expresadas como mejoras sustanciales o incrementos. Para ello, se involucra tanto a gobiernos, organizaciones internacionales y líderes mundiales, sin olvidar a la ciudadanía, a quienes exhorta la ONU a colaborar.

La importancia de las TIC y su relación con el medio ambiente

Las Tecnologías de la información y la Comunicación (TIC) juegan un papel fundamental en la generación de estrategias para mitigar el deterioro de los recursos naturales, si bien, un incremento en el uso de las TIC ha sido parte de las causas del calentamiento global debido al incremento del uso de computadoras y aparatos electrónicos, también las TIC son una parte clave para combatir el calentamiento global, ya que pueden estabilizar y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Es importante resaltar métodos que han aportado a la reducción, por ejemplo la utilización de las computadoras como herramienta de control para mejorar el rendimiento de los motores en las empresas industriales; una distribución de bienes más eficiente, recurriendo a la gestión informatizada del transporte y el almacenamiento; el fomento de las reuniones o el trabajo a distancia mediante videoconferencias; y la utilización de redes de sensores con el fin de controlar la calefacción y el alumbrado en los edificios (Borraz, 2012).

Las TIC pueden contribuir en gran medida al desarrollo de nuevas tecnologías eficientes para la reducción de las emisiones globales de gases de efecto invernadero que emanan de diversos sectores de la economía. La reducción de las emisiones de carbono para combatir el cambio climático dependerá de los cambios en el estilo de vida y comportamiento de los individuos, pero los cambios en las prácticas de gestión también pueden tener un impacto positivo y las TIC pueden ayudar:

- Directamente, mediante la reducción de las necesidades de energía propias del sector de las TIC.

- Indirectamente, mediante el uso de las TIC para el desplazamiento de carbono o de una manera sistémica, proporcionando la tecnología para implementar y monitorear las reducciones de carbono en otros sectores.

Las TIC se han establecido como un factor esencial en esta materia y así lo han entendido los gobiernos y la sociedad civil en el mundo. Así lo consigna el “Monitor Mundial de la Sociedad de la Información (MMSI): TIC y sustentabilidad ambiental”, elaborado el año 2010. El MMSI resalta los simposios orientados al tema que se han organizado mundialmente, como “TIC y cambio climático” realizado en Ecuador por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) en el año 2009 (eLAC, 2011).

La importancia que ha adquirido el tema del cambio climático, así como la búsqueda de soluciones que puedan minimizar el impacto a través de las TIC, es relevante, puesto que la acumulación de GEI en la atmósfera está creciendo más rápidamente de lo que se predijo originalmente (Neves, 2011). Una iniciativa relevante para reducir el impacto de la contaminación es la correcta gestión de los residuos electrónicos. La rápida aparición de nuevas tecnologías genera un alto número de desechos electrónicos, los cuales pueden ser reciclados y reutilizados, ya sea en su totalidad o parcialmente (Valdiviezo, 2011).

El aprovechamiento científico y operativo de las TIC hace posible la comprensión científica y la detección de los fenómenos naturales que generan riesgos. Por esta razón, estas tecnologías deben utilizarse para adoptar medidas preventivas y reactivas, y establecer sistemas de alerta temprana. Por tal motivo, es importante promover la cooperación y el establecimiento de políticas para el uso de las tecnologías de la información y las comunicaciones en materia de desastres naturales, cambio climático, prevención y atención de emergencias, con arreglo a estándares comunes y mejores prácticas (eLAC, 2011).

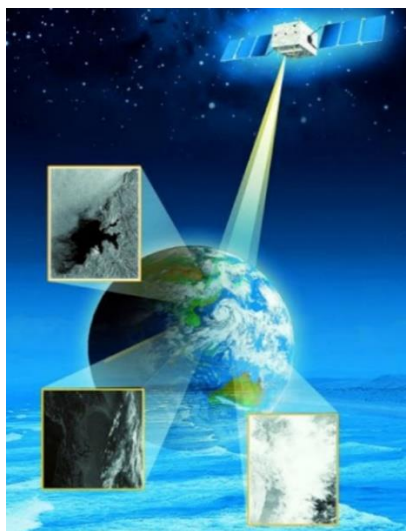
Sobre ellas se sustentan proyectos de gobernanza, salud y educación que logran llegar a muchos más miembros de la comunidad; además, son útiles en el monitoreo ambiental y climático, incluido el pronóstico del tiempo, y

fundamentales para las comunicaciones de alerta temprana y mitigación en caso de catástrofes (Jhonson, 2011).

La innovación tecnológica aparece como una condición esencial para la expansión de la sociedad, de forma que el desarrollo de Know-how y el cambio tecnológico vienen a ser impulsores del crecimiento sostenible (Gaynor, 1999). Ello es, en parte, resultado del carácter interdisciplinario de los avances tecnológicos, como derivación de la fusión y afinidad entre las áreas tecnológicas ofrecidas por los medios de comunicación e información, y pueden impactar en los ámbitos prioritarios para el monitoreo de la huella de carbono (Figura 24).

Cabe mencionar la importancia del monitoreo remoto de la Tierra por satélite y sensores en el suelo y los mares se engloban en la teledetección. Esto puede servir, por ejemplo, para extraer datos sobre deforestación o patrones de cultivos que indican una posible escasez de alimentos. Las TIC además son vitales cuando se trata de advertir sobre desastres naturales que pueden sobrevenir como consecuencia del cambio climático, así como para hacer frente a sus efectos, al permitir que los equipos humanitarios respondan de distintas maneras (Jhonson, 2011).

Figura 24. Monitoreo con TIC para prevención de desastres Naturales.



Fuente: <https://images.app.goo.gl/tzD6rBs2em4j2dad6>

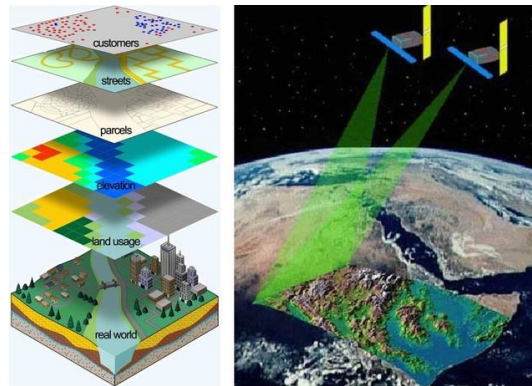
Algunas de las aportaciones de la supervisión medioambiental se mencionan a continuación:

- Satélites meteorológicos que realizan un seguimiento de los huracanes y tifones.
- Radares meteorológicos que siguen el progreso de los tornados, tormentas eléctricas y los flujos procedentes de volcanes o incendios forestales de gran magnitud.
- Sistemas de ayuda a la meteorología basados en radiocomunicaciones que recopilan y procesan datos meteorológicos, sin los que la precisión actual y planificada de las predicciones meteorológicas.
- Sistemas de radiodifusión sonora y de televisión terrenales y por satélite; distintos sistemas de radiocomunicación móvil que advierten de eventos climatológicos peligrosos.
- Sistemas de teledetección de la Tierra por satélite, que obtienen información medioambiental como la composición atmosférica (por ejemplo, niveles de concentración de CO₂, vapor de agua u ozono), parámetros oceánicos, humedad del suelo, vegetación, monitoreo forestal, datos agrícolas y entre otros

3.6 Teledetección

La teledetección es un campo de estudio que consiste en adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores espaciales que se encargan de registrar la interacción entre la energía electromagnética y el objeto de estudio. La capacidad de obtener información a partir de imágenes en cualquier parte de la superficie terrestre muestra una perspectiva para la búsqueda de recursos geotérmicos, naturales y estructurales como se muestra en la Figura 25 (Hiriart, 2011).

Figura 25. Productos obtenidos con técnicas de teledetección.



Fuente: <https://images.app.goo.gl/kZauRWiQf9W93Mix5>

La teledetección en general, y en particular la satelital, se fundamenta en el hecho de que todo objeto o cubierta de suelo absorbe, transmite y refleja el flujo de luz que incide en él, de forma que la proporción reflejada dependerá de la naturaleza del objeto o de la cubierta iluminada; esta radiación reflejada y captada por un dispositivo sensible a su registro digital (sensor) será la respuesta espectral propia de dicho objeto o cubierta. Este es el principio por medio del cual, a partir de los colores, formas y texturas, la visión opera para discriminar diferencias en la interpretación de fotografías en blanco y negro y, principalmente, en color. El desafío se encuentra en aquello que cambia pero que no podemos distinguir a simple vista. El ojo humano es incapaz de ver longitudes de onda por debajo del rojo, en el infrarrojo, y son justo esas longitudes en las que las partes verdes de las plantas vigorosas reflejan mejor la luz. Así, un cambio ligero en la condición de salud del arbolado puede detectarse mejor en el infrarrojo con la ayuda de un sensor óptico (Rullan, 2015).

El término teledetección incluye el principio físico de la detección remota y está restringido a los métodos que emplean energía electromagnética en forma de luz, calor y ondas de radio, para detectar y medir características de los objetos (Gebhard,2002). Este recurso incluye sensores remotos que se clasifican en dos grupos:

a) Sensores activos: son aquellos que tienen su propia fuente de energía, como los radares.

b) Sensores pasivos: son aquellos que aprovechan la energía electromagnética proveniente del sol que es reflejada por la cubierta terrestre, incluyendo también la energía emitida por los objetos en virtud de su propia temperatura.

La energía electromagnética sólo se detecta cuando interactúa con la materia y hace referencia a toda energía que se propaga a la velocidad de la luz, es decir que las ondas son iguales y se repiten en un intervalo de tiempo (Bognanni, 2010). El conjunto de los datos adquiridos mediante procedimientos de Teledetección de aviones o naves espaciales comprenden siempre tres tipos de información (Goillot, 1976):

1. Una información espacial que representa la organización en el espacio físico de los elementos que constituyen la imagen.
2. Una información espectral que caracteriza y puede conducir al conocimiento de la naturaleza de la superficie terrestre.
3. Una información temporal que permite la detección de los cambios operados en la superficie de la Tierra con el transcurso del tiempo.

Las propiedades espectrales son importantes para la elección de la banda del espectro electromagnético; los rangos de longitud de onda dependen de la interacción entre la radiación electromagnética (radiación visible e infrarroja) y los materiales. La superficie de la Tierra está compuesta en su mayoría por rocas, suelos, vegetación y agua. De acuerdo con el material y su condición, se presenta un patrón de respuesta espectral particular que depende de la energía reflejada o emitida (Santillán et al., 2015). El análisis de los datos obtenidos en teledetección se ha convertido a lo largo de las tres últimas décadas en una herramienta fundamental para el estudio de la dinámica de diversas variables ambientales, tanto a escala regional como global (Riaño et al., 2007).

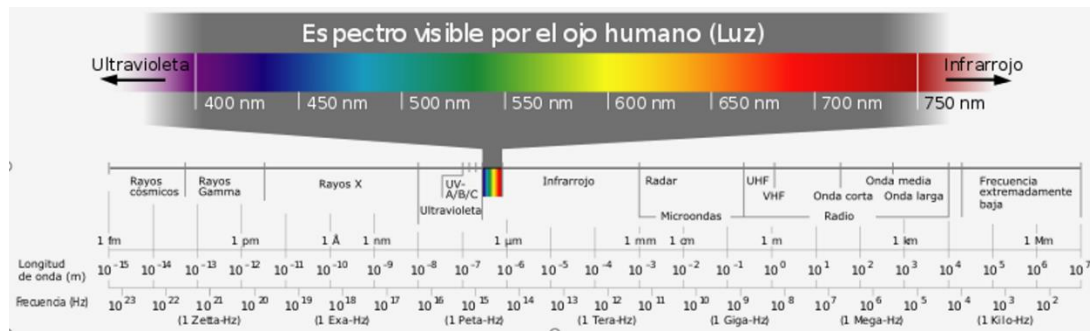
3.7 Espectro Electromagnético

El espectro electromagnético representa la distribución energética de las ondas electromagnéticas. El mismo va desde la radiación con longitud de onda menor, hasta las ondas de mayor longitud de onda. La luz que nuestros ojos pueden detectar forma parte de la porción llamada visible. La porción visible para los humanos es pequeña en comparación con el resto del espectro. Otros organismos de importancia para las plantas tienen campos visibles más amplios; por ejemplo, los ojos de las aves tienen cuatro tipos de células foto receptoras, mientras que los ojos humanos solo tienen tres (Rush, 1995).

Hay una gran cantidad de radiación que nos rodea y es invisible para el ojo humano, como se muestra en la Figura 26. Esta energía puede ser detectada por instrumentos de teledetección, los cuales pueden tener varias bandas de percepción en diferentes rangos del espectro, dependiendo de cuál sea su objeto de interés (Lillesand y Kiefer, 1994).

La energía electromagnética que no es absorbida o dispersada por las partículas presentes en la atmósfera alcanza la superficie terrestre, permitiendo así la proliferación de la vida. Esta energía incidente (I) interactúa de tres formas diferentes: absorción (A), transmisión (T) y reflexión (R). La absorción ocurre cuando la energía es absorbida por el objeto de interés, mientras que la transmisión se produce cuando la energía pasa a través del objeto. La reflexión se da cuando el objeto en cuestión redirige la energía. En esta última interacción está la clave en cuanto a la teledetección, ya que esa energía reflejada es grabada por los sensores para luego dar a lugar una imagen y/o un conjunto de datos (Tirado, 2018).

Figura 26. Espectro Electromagnético.



Fuente: <https://images.app.goo.gl/ZUeBUwf8BttUjtqF6>

Dos ejemplos de importancia en la botánica son las hojas y el agua. En el caso de las hojas, la clorofila absorbe ondas largas del rojo (620-750 nm) y el azul (450-495 nm) ya que de allí proviene gran parte de la energía lumínica usada para la fotosíntesis. A su vez, las hojas reflejan ondas largas de verde e infrarrojo cercano. La reflectancia en el infrarrojo es utilizada por botánicos, ecólogos y otros como una manera de determinar si la vegetación de un ecosistema está funcionando óptimamente. Las hojas saludables tienden a reflejar ondas largas cercanas al infrarrojo. Por otra parte, el agua normalmente se ve azul o azul-verdosa debido a la reflectancia de ondas largas mayores. A mayor presencia de sedimento en la columna de agua menor será la reflectividad. Los organismos marinos fotosintéticos, como lo son las algas, suelen dar tonalidades más verdes cuando se encuentran en grandes cantidades (CCRS, 2016).

3.8 Sensores y Plataformas de Teledetección

Una plataforma aérea de teledetección es donde se ubica el sistema sensor. Un sensor es un instrumento tecnológico cuya función es captar imágenes a distancia. Los diferentes sensores están diseñados para captar información de las diferentes regiones del espectro electromagnético; cada una de estas regiones se denomina canal o banda. Generalmente, los sensores son desarrollados para operar en la banda infrarroja y en la microondas. La Figura 27 muestra las plataformas de teledetección (Short, 2010).

Figura 27. Plataformas de teledetección.

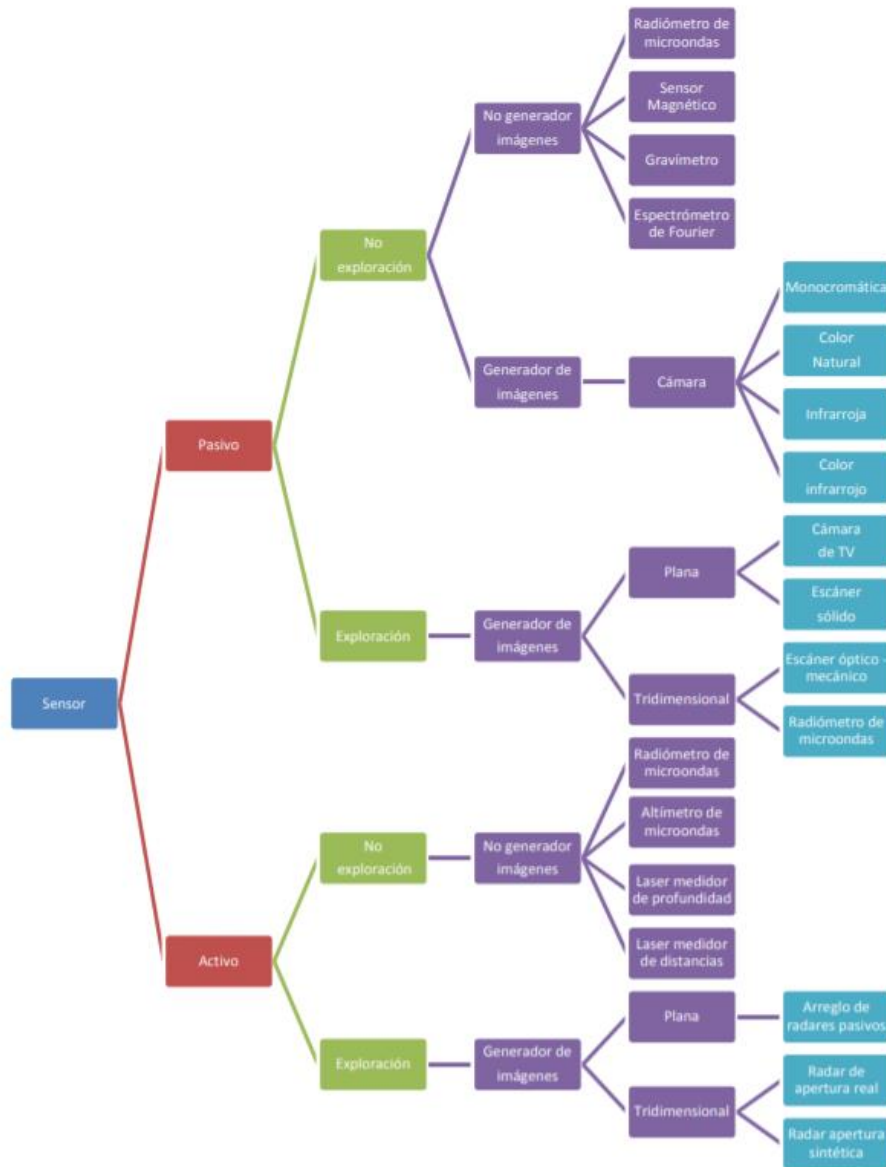


Fuente: <https://images.app.goo.gl/vEbbMTTxnQDmDMRo8>

Los sensores pueden clasificarse de acuerdo con la forma de detectar la energía procedente de los diversos objetos a estudiar y se dividen en pasivos y activos, como se muestra en la Figura 28.

Los sensores **pasivos** no emiten ningún tipo de energía y se limitan a detectar la radiación electromagnética reflejada o emitida de fuentes naturales de energía, en este caso la del Sol. Por su parte, los sensores **activos** detectan la respuesta reflejada por objetos (o la superficie terrestre en general) a los que se les suministra energía generada artificialmente por el mismo sensor. Estos sistemas tienen la ventaja de poder operar en horarios nocturnos o superficies con cobertura nubosa, también son utilizados para estudios oceanográficos. Los más utilizados son el radar y lidar (Gebhard, 2002).

Figura 28. Clasificación de sensores de teledetección.



Fuente (Short, 2010 citado por Avalos, 2012)

Un concepto clave para comprender las posibilidades de aplicación de los sensores remotos es el de resolución. La resolución se puede definir de cuatro formas: radiométrica, espectral, temporal y espacial (Figura 29).

Resolución radiométrica: hace referencia a la sensibilidad del sensor, es decir, a su capacidad de detectar variaciones en la radiación espectral que recibe. Esta radiación se representa en cada uno de los píxeles de la imagen a través de su nivel digital (ND), que, para el caso de las imágenes Landsat TM, es de un rango

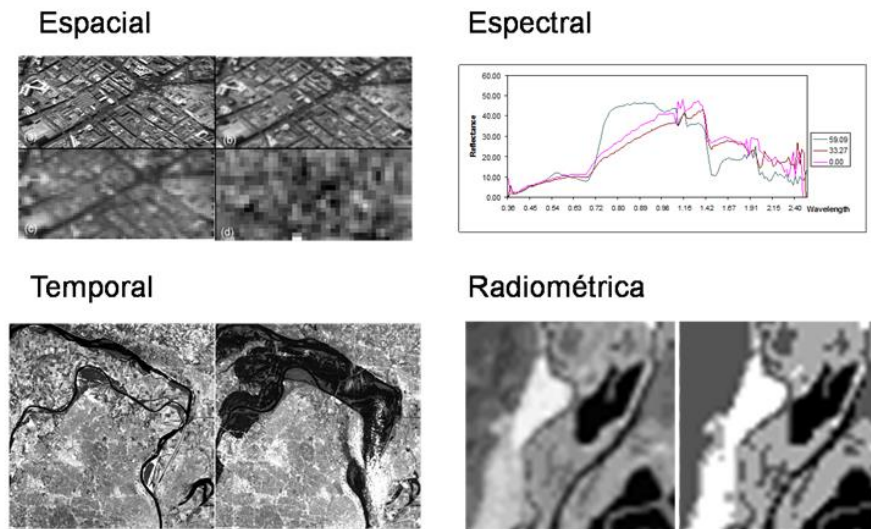
de 256 tonos de grises posibles (es decir, 28 niveles de grises). Hay que tener en cuenta que, para un análisis visual, no es muy importante tener muchos niveles de color ya que el ojo humano difícilmente puede percibir más de 64 tonos de gris, pero cuando se opta por el tratamiento informático, la mejora en la resolución puede ser importante (Sobrino 2000).

Resolución espectral: indica el número y ancho de banda que puede discriminar un sensor y, por ende, el rango de longitudes de onda que puede registrar un sensor en el espectro electromagnético (Maggi 2003). Una alta resolución espectral estará dada por un mayor número de bandas que tengan en cuenta un rango electromagnético más angosto. El sensor TM de Landsat tiene 7 bandas que van desde el espectro visible (azul, verde y rojo), infrarrojo cercano, medio y termal. El Landsat 7 tiene el sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper) que, además de las 7 bandas, posee una octava banda pancromática de 15 m de resolución espacial.

Resolución temporal: se hace alusión a la posibilidad que tiene el sensor de obtener imágenes de la misma área en el menor tiempo posible. Está, principalmente, en relación con la órbita y el ángulo de observación y apertura que tiene cada sensor. Es muy importante para realizar seguimientos de catástrofes naturales. Por ejemplo, el satélite Landsat 7 puede tomar la imagen de la misma zona cada 16 días (Bognanni, 2010).

Resolución espacial: hace referencia a la menor medida de los objetos que se pueden reconocer con el sensor, es decir, al área del terreno representada por un píxel. Sin embargo, pueden reconocerse rasgos, como caminos y ríos, que tienen un ancho menor que los detectados por el sensor; esto se puede lograr a partir de un gran contraste de reflectividad del rasgo con el medio que lo rodea (Bognanni, 2010).

Figura 29. Resoluciones de Teledetección.



Fuente <https://images.app.goo.gl/AvMjc6eYWitzSmrQ7>

3.9 Espectro Visible: Modelo de color RGB

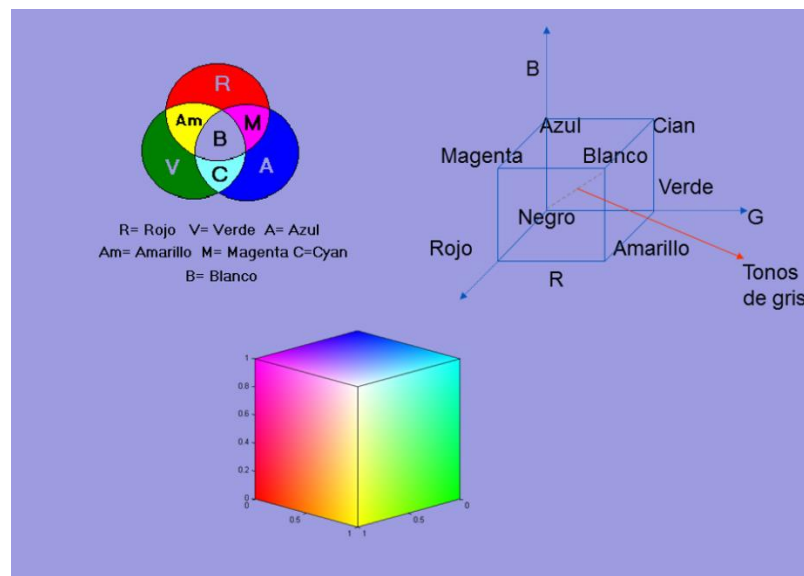
La descripción RGB —del inglés Red (rojo), Green (verde), y Blue (azul) — de un color hace referencia a la composición del color en términos de la intensidad de estos colores primarios. Este modelo está basado en la mezcla aditiva de los 3 colores primarios para obtener cualquier color, es decir, se suman las contribuciones individuales de cada color principal (Alonso, 2009). El modelo de color RGB no define exactamente rojo, verde o azul, por lo que los mismos valores RGB pueden mostrar colores notablemente diferentes; aunque utilicen un mismo modelo de color, sus espacios de color pueden variar considerablemente.

Para indicar con qué proporción mezclamos cada color, se asigna un valor a cada uno de los colores primarios, de manera que, por ejemplo, el valor 0 significa que no interviene en la mezcla y, a medida que ese valor aumenta, se entiende que aporta más intensidad a la mezcla. Aunque el intervalo de valores podría ser cualquiera (valores reales entre 0 y 1, valores enteros entre 0 y 37, etc.), es frecuente que cada color primario se codifique con un byte (8 bits). Así, de

manera usual, la intensidad de cada una de las componentes se mide según una escala que va del 0 al 255 en valor digital.

La mayor parte de los monitores trabajan de esta manera, tienen una profundidad 8 bits por color (24 bits en total), con lo cual pueden representar aproximadamente 16,8 millones de colores distintos. Por lo tanto, el rojo se obtiene con (255,0,0), el verde con (0,255,0) y el azul con (0,0,255), obteniendo en cada caso un color resultante monocromático. La ausencia de color —lo que se conoce como color negro— se obtiene cuando las tres componentes son 0, (0,0,0). La combinación de dos colores a nivel 255 con un tercero en nivel 0 da lugar a tres colores intermedios. De esta forma, el amarillo es (255,255,0), el cian (0,255,255) y el magenta (255,0,255). El color blanco se forma con los tres colores primarios a su máximo nivel (255,255,255) (González, 2011). La figura 30 muestra el espacio de color RGB.

Figura 30. Modelo RGB



Fuente <https://images.app.goo.gl/w6KQ4DXN6mEgj7Ks7>

Las TIC están instauradas en todos los niveles de nuestra sociedad. Las redes de telecomunicaciones e Internet aseguran que la información esté disponible en todo momento en cualquier lugar del mundo. De igual forma las TIC se pueden integrar con investigaciones científicas para potenciar al máximo las capacidades

de estas y así poder colaborar en la adaptación de estrategias que beneficien al desarrollo sostenible. Por tanto, se destaca la importancia de mencionar las ventajas que aportan las TIC utilizadas en la supervisión medioambiental y meteorológica, distribución de los datos y alerta temprana, junto con la adopción de métodos para evaluar los efectos de los servicios y equipos TIC. Asimismo, los ODS piden que las TIC formen parte de la solución a problemas ambientales y a la adaptación, teniendo en cuenta las necesidades de los países en desarrollo.

Este capítulo abordo los conocimientos teóricos que fundamentan las bases de la evolución de las tecnologías y la relación que tiene con la ciencia, para generar innovaciones que contribuyen a las soluciones de problemas actuales, tomando como perspectiva el desarrollo sustentable. Los conocimientos científico-tecnológicos también evolucionan y permiten desarrollar métodos que fortalecen a las técnicas tradicionales. Por ejemplo, una de las tecnologías que sobresale, son las telecomunicaciones, específicamente la teledetección, que permite obtener información en tiempo real y a distancia, lo cual brinda la posibilidad de generar estrategias de prevención por parte de los tomadores de decisiones.

Capítulo IV

Metodología



Los enfoques alternativos para evaluar el cambio en la estructura y composición del bosque utilizando tecnología de teledetección han demostrado ser viables para aliviar la necesidad de métodos de campo costosos que consumen tiempo y pueden proporcionar parámetros adicionales para evaluar hábitats que no son logísticamente factibles con estudios de campo terrestre (Mascaro et al., 2014).

La creciente atención se ha centrado en la mejora de las aplicaciones de teledetección en el sector forestal (Tang y Shao, 2015). Una de las barreras críticas para las aplicaciones de teledetección en este ámbito es la falta de recopilación oportuna de datos sobre las áreas objetivo; por ejemplo, cuando se quiere evaluar los brotes de plagas (Wulder et al., 2005) o la propagación de incendios forestales (Arroyo et al., 2008) en un paisaje boscoso, las imágenes de satélite apropiadas pueden no estar disponibles y las fotografías aéreas de aeronaves tripuladas pueden ser inalcanzables.

La miniaturización de la electrónica, las computadoras y los sensores han creado nuevas oportunidades para aplicaciones de teledetección. El uso de vehículos aéreos no tripulados equipados con pequeños sensores térmicos, láser o espectrales se ha convertido en una alternativa prometedora para ayudar a las aplicaciones de modelado, mapeo y monitoreo en pastizales, bosques y entornos agrícolas.

4.1 Técnicas de descomposición colorimétrica RGB

La metodología que se planteó para este estudio se basa en las técnicas de descomposición colorimétrica en espectro visible RGB que se han implementado en diversos estudios para el reconocimiento de vegetación sobre el suelo y en técnicas de clasificación supervisadas.

Los estudios de Chianucci y colaboradores (2016) mencionan que las estimaciones precisas del dosel del bosque son esenciales para la caracterización de los ecosistemas forestales. Las técnicas de detección remota proporcionan una forma única de obtener estimaciones sobre áreas

especialmente extensas, pero su aplicación está limitada por la resolución espectral y temporal. En su estudio incluyen el uso de UAV como plataforma de teledetección y describen una metodología para obtener estimaciones rápidas y confiables del dosel del bosque a partir de un pequeño UAV equipado con una cámara RGB comercial. Los valores digitales rojo, verde y azul se convirtieron al algoritmo de hoja verde (GLA) y al espacio de color CIE L * a * b * para obtener estimaciones de la cubierta de la copa, la aglomeración del follaje y el índice de área de la hoja (L) a partir de imágenes aéreas. El método fue probado en bosques de hayas.

Como resultado, las imágenes UAV cuantificaron con precisión la cubierta del dosel incluso en condiciones muy densas, a pesar de la tendencia a no detectar pequeños espacios dentro de la corona en imágenes aéreas, lo que lleva a una medición de una cantidad mucho más cercana a la cubierta de la corona estimada a partir de la fotografía de la cubierta *in situ*. Chianucci y colaboradores (2016) concluyeron que las imágenes UAV en color verdadero se pueden utilizar de manera efectiva para obtener resultados rápidos y estimaciones exhaustivas baratas de los atributos del dosel forestal a escalas medianas y grandes, por lo que es adecuado para el monitoreo rutinario de rodales forestales y aplicaciones en tiempo real.

Mullerová y colaboradores (2017) indican que, para combatir con éxito las invasiones de plantas, se necesitan nuevos métodos que permitan un monitoreo rápido y eficiente, y la detección remota puede hacer que su manejo sea más eficiente y menos costoso. Sin embargo, la resolución de los datos, el costo y la disponibilidad pueden ser limitantes. La solución óptima depende de las características de la especie, donde la resolución espectral y espacial puede compensarse entre sí en cierta medida, y la fenología juega un papel importante.

Los datos satelitales de alta resolución espacial disponibles son suficientes para el reconocimiento de especies distintas y grandes o que forman parches uniformes de un tamaño comparable al tamaño de píxel de los datos. Para otras

especies se necesita una mayor resolución espacial y los UAV proporcionan datos de resolución espacial extremadamente alta a bajo costo y alta flexibilidad. Este estudio evaluó el potencial para mapear la langosta negra invasiva (*Robinia pseudoaccacia*), probando imágenes de diferente origen (satélite, UAV), espectral (MSS, RGB + NIR) y resolución espacial, y varios enfoques técnicos para elegir la mejor estrategia para el monitoreo de especies con un equilibrio entre precisión de detección y viabilidad económica (Somodi et al., 2012).

Yuan y Hu (2016) concuerdan en que las plagas forestales son uno de los factores más importantes que afectan la salud del bosque. Sin embargo, dado que es difícil determinar las áreas de plagas y predecir las formas de propagación, las áreas infectadas se han extendido continuamente en la actualidad. Por lo tanto, la introducción de la tecnología de información espacial es muy demandada, ya que puede ser otra manera efectiva de examinar las características de distribución espacial y pueden generar estrategias apropiadas y oportunas para el control de plagas. Las fotografías del UAV pueden ser adecuadas para monitorear la salud del bosque y detectar la plaga a través de imágenes aéreas, para lo cual los autores realizaron una segmentación en superpíxeles y luego calcularon la textura estadística de 12 dimensiones para cada superpíxel que posteriormente se utilizarán para entrenar y clasificar los datos, así como para la extracción de áreas de plagas forestales en imágenes de UAV.

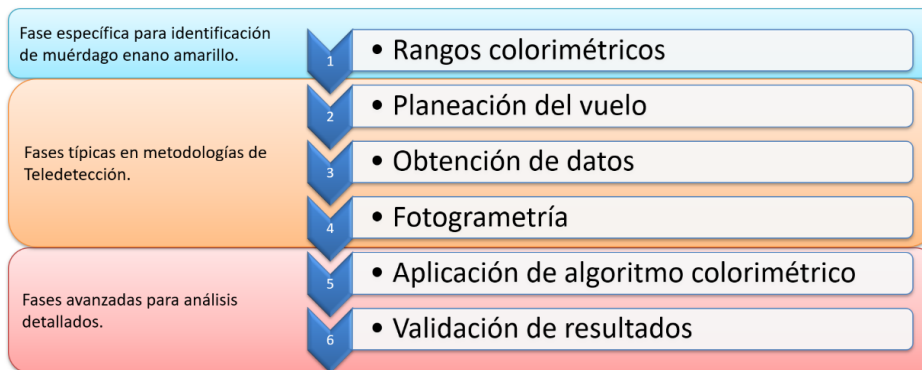
Feng y colaboradores (2015) sustentan que la teledetección de UAV tiene un gran potencial para el mapeo de vegetación en paisajes urbanos complejos debido a las imágenes de ultra alta resolución adquiridas a bajas altitudes. Debido a las restricciones de capacidad de carga útil, las cámaras digitales estándar se usan ampliamente en UAV de tamaño mediano y pequeño. La limitación de la baja resolución espectral en las cámaras digitales para el mapeo de vegetación se puede reducir incorporando características de textura y clasificadores robustos. Random Forest ha sido la herramienta ampliamente utilizada en aplicaciones de teledetección satelital, a partir de lo anterior, se propone un

método híbrido que utiliza el algoritmo Random Forest y el análisis de textura para diferenciar con precisión las cubiertas de tierra de las áreas urbanas con vegetación, y analizar cómo cambia la precisión de la clasificación con el tamaño de la ventana de textura.

Poblete-Echeverría y colaboradores (2017) mencionan que el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV) en la viticultura permite la captura de imágenes aéreas rojo-verde-azul (RGB) con una resolución espacial ultra alta. Otros estudios han demostrado que las imágenes RGB se pueden utilizar para controlar la variabilidad espacial de los parámetros biofísicos de la vid. Sin embargo, para estimar estos parámetros, se requieren métodos de segmentación precisos y automatizados para extraer información relevante de las imágenes RGB. En el caso de viñedos comerciales, es necesario considerar algunas particularidades inherentes al tamaño del dosel en los Sistemas de Enrejado Vertical, como la sombra efecto y diferentes condiciones del suelo en hileras (información mixta de suelo y malezas).

Con base en la literatura se determinó que, las técnicas de teledetección con imágenes UAV en espectro visible son viables para la identificación de vegetación sobre el suelo y aplicables en bosque, por lo tanto, se definió la metodología con 6 fases como se muestra en la Figura 31.

Figura 31. Metodología para la detección del nivel de infestación de MEA.

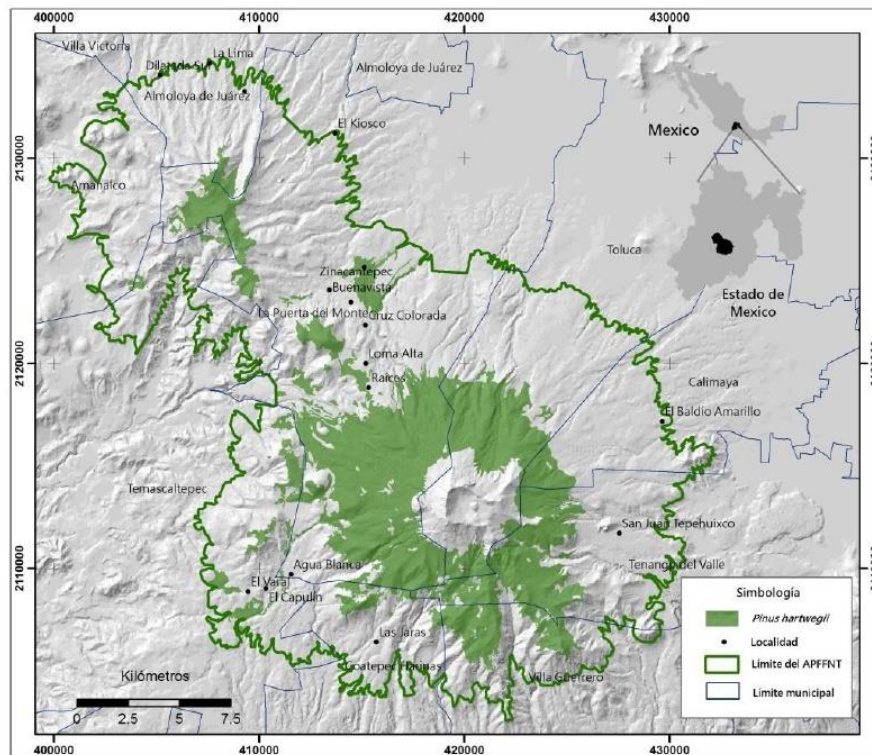


Fuente: elaboración propia.

4.2 Área de estudio APFFNT

El Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, se localiza en el Estado de México y comprende el volcán denominado Xinantecátl o Nevado de Toluca, el cual ocupa el cuarto lugar entre las cumbres más altas del país con una elevación de 4,680 metros sobre el nivel del mar (msnm).

Figura 32. Población de *Pinus hartwegii* en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.



Fuente: (Bermúdez, 2018)

El punto de partida para esta tesis fue el que se realizó por Franco y Endara en el 2010, quienes sobre un estudio fitosanitario del bosque del APFFNT (Franco y Endara, 2010), en el que se obtuvieron polígonos de las densidades de las plagas y se encontró que el muérdago enano se acentúa en las laderas norte, noreste y este; los factores a los que se les atribuye están muy relacionados con la densidad arbórea porque requiere luz solar para su mejor desarrollo, es decir, a menor densidad mayor infestación por plantas parásitas. CONAFOR (2015) realizó un manual sobre la actualización de plagas y

enfermedades en los bosques del nevado de Toluca, en el cual se planteó que el bosque de pino tenía 9,308 ha infestadas por muérdago enano, 55 ha por muérdago verdadero, así como 106 puntos de presencia de descortezador; para el bosque de oyamel se encontraron 1,539 ha infestadas por muérdago enano y el bosque de aire, por su parte, presentó 541 ha infestadas por muérdago verdadero.

Cedillo (2017) indica que el bosque de pino se encuentra infestado en un 43%, por muérdago amarillo y negro, respectivamente. Las zonas se encuentran afectadas por algún tipo de muérdago; por lo tanto, es necesario generar estrategias y métodos que permitan asegurar la regeneración del bosque donde se realiza cosecha, aprovechamiento forestal u otras funciones (FAO, 2010).

4.2.1 Localización y límites

El Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca se encuentra dentro de la provincia fisiográfica denominada Faja Volcánica Transmexicana, que constituye una franja de 130 km, la cual conforma la cordillera con las cimas más altas del país, entre ellas el Nevado de Toluca, con la altitud ya referida de 4,680 msnm.

El Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca se encuentra comprendida desde la cota de los 3,000 msnm hasta el Pico del Fraile a 4,680 msnm. El límite inferior del Área de Protección de Flora y Fauna (3 000 msnm) incluye no solo al volcán Nevado de Toluca, sino también a las estructuras volcánicas de los cerros San Antonio (3,600 msnm) y El Calvario (3,600 msnm), hacia el noroeste del estratovolcán (Villers et al., 1998). También incluye otras elevaciones como: Cerro de los Órganos (3,400 msnm), Cerro del Amparo (3,460 msnm), Cerro El Jabalí (3,440 msnm), Cerro La Calera (3,740 msnm), Cerro La Ciervita (3,480 msnm), Volcán Gordo (3,780 msnm), Cerro Prieto (4,320 msnm), Cerro Tepehuixco (3,480 msnm), Cerro Las Palomas (3,600 msnm), Cerro El Zacatonal (3,440 msnm) y Cerro Calotepec (3,800 msnm), (INEGI, 1996).

El área natural protegida se localiza en la porción centro Sur del Estado de México, a 23 kilómetros al Suroeste de la ciudad de Toluca, abarcando una superficie de 53,590-67-86.28 hectáreas de los municipios de Almoloya de Juárez, Amanalco de Becerra, Calimaya, Coatepec Harinas, Temascaltepec, Tenango del Valle, Toluca, Villa Guerrero, Villa Victoria y Zinacantepec (DOF, 2016).

4.2.2 Clima

En el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca se distribuyen, de acuerdo con la clasificación climática de Köppen modificada por García (1973), los siguientes tipos de climas:

E (T) H wig. Clima frío con temperatura media anual entre $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, con temperatura del mes más frío inferior a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y con temperatura del mes más cálido entre $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $6.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. El régimen de lluvias es de verano, aunque pueden caer nevadas en invierno; tiene comportamiento isotermal y la temperatura más elevada ocurre antes del solsticio de verano. Este tipo de clima se presenta en el volcán Nevado de Toluca a partir de los 3,700 metros de altitud.

C (E) wig. Clima semifrío subhúmedo con temperatura media anual entre $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $7\text{ }^{\circ}\text{C}$, el régimen de lluvias es de verano, es isotermal y la temperatura del mes más caliente se presenta antes del solsticio de verano. Este tipo de clima rodea a todo el volcán en la franja que está entre los 2,800 metros a los 3,700 metros de altitud.

Es importante mencionar que el clima es un factor determinante para la planeación de vuelos con el UAV, debido a que los altos niveles de humedad y las condiciones lluviosas, afectan su funcionamiento. También las condiciones de nubosidad y neblina impactan en los resultados de las imágenes obtenidas por el UAV.

4.3 Herramienta de teledetección.

Para el desarrollo del estudio se utilizó un UAV quadcopter como herramienta de teledetección. El Phantom 3 standard (Figura 33) está equipado con sistema de navegación GPS, despegue y aterrizaje automático controlado con la aplicación móvil con telemetría y transmisión de video vía Wi-Fi. Una de las ventajas particulares con respecto a otros UAV de la misma gama es la duración de la batería inteligente —con aproximadamente 25 minutos de vuelo— y la batería inteligente que indica cuando esta por agotarse, tomando en cuenta la distancia a la que se encuentra del punto de despegue.

Figura 33. Phantom 3 Standard DJI Oficial.



Fuente: <https://images.app.goo.gl/xJcRfg1L3Df63KsT8>

El GPS incorporado graba su punto de despegue y lo recuerda; si la señal de control se pierde, el Phantom 3 standard vuelve al instante a un punto en el cual recupere la señal, lo cual es de suma importancia para el trabajo en bosque. Las características del UAV se muestran en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Características del UAV Phantom 3 Standard

Weight (Battery & Propellers Included)	1216 g
Diagonal Size (Propellers Excluded)	350 mm
Max Ascent Speed	5 m/s
Max Descent Speed	3 m/s
Max Speed	16 m/s (ATTI mode)
Max altitude	500m
Max Distance	500m
Max Flight Time	Approx. 25 minutes

La cámara integrada DJI permite obtener fotografías aéreas de alta calidad como se muestra en el cuadro 5:

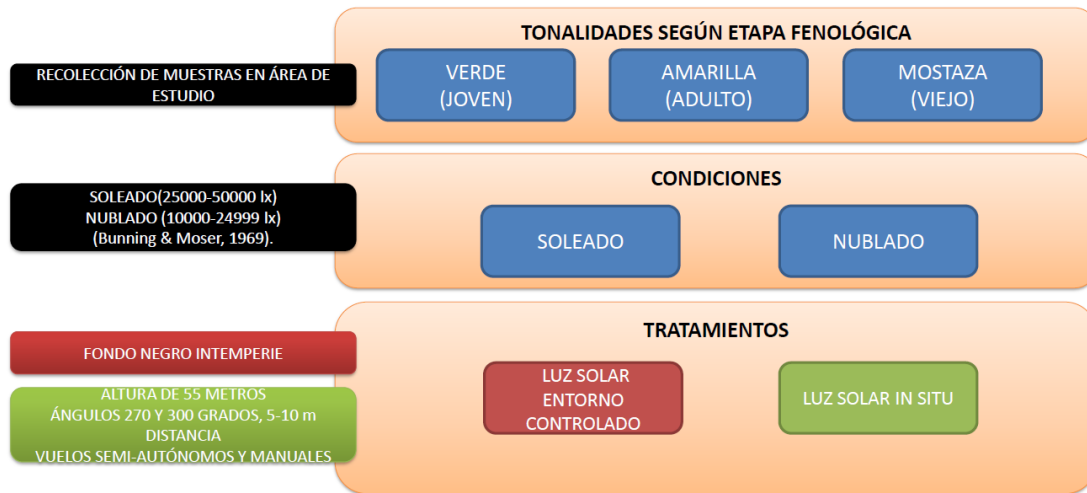
Cuadro 5. Características de la cámara Phantom 3 standard

Sensor	1/2.3" Effective pixels:12 M	CMOS
Lens	FOV 94° 20 mm (35 mm format equivalent) f/2.8	
Image Size	4000x3000	
Still Photography Modes	Single Auto Exposure Bracketing (AEB): 3/5 bracketed Timelapse	Shot
Video Recording Modes	2.7K: 2704 x1520p FHD: 1920x1080p HD: 1280x720p	
Photo	JPEG, DNG (RAW)	
Video	MP4, MOV (MPEG-4 AVC/H.264)	

4.4 Caracterización colorimétrica

El Muérdago Enano Amarillo (MEA) mide de 18 cm a 70 cm de largo, presenta un período de florecencia entre marzo y abril y fructifica en agosto (Hawksworth y Wiens, 1996; Cibrián et al., 2007), lo cual indica que no tiene un color definido, por lo que es necesario definir la etapa fenológica relacionada con sus rangos colorimétricos. Para lo anterior se colectaron muestras en el área de estudio, las cuales se clasificaron de acuerdo con la tonalidad de color: verde (joven), amarilla (adulto) y marrón (viejo), (Figura 34), según la etapa fenológica (Cibrián et al., 2007).

Figura 34. Tratamientos para la definición de rangos colorimétricos.



Fuente: Elaboración propia.

La fenología de la vegetación presenta patrones complejos asociados a la variabilidad climática y a la composición del paisaje (Peñuelas et al., 2004). De acuerdo con Adamsen y colaboradores (1999) y Gitelson y colaboradores (2002), se puede establecer la presencia de vegetación sobre el suelo, apelando a la descomposición colorimétrica de la imagen en el rango del espectro visible. En el caso de MEA, de las fotografías aéreas se obtuvo el rango colorimétrico de cada una de las tonalidades fenológicas que presenta, que dieron lugar a los píxeles de las áreas visibles que se identifican como muérdago a partir de criterios específicos sin que influya el dosel del pino, arbustos, pastizales y demás elementos del área de estudio.

La obtención manual de píxeles puede tener errores en la percepción de color. Con la finalidad de clasificar las 3 tonalidades de forma precisa, se aplicaron 2 tratamientos en la selección de píxeles, para observar variaciones en la refracción del color en dos entornos: a) soleado y b) nublado; considerando que las condiciones climáticas del alta montaña presentan comúnmente nubosidad, es necesario cubrir las diferentes condiciones en las que se pueden obtener las fotografías aéreas para mejorar la obtención de información, evitando errores provocados por sombra, los cuales son los más comunes en el análisis de

imágenes obtenidas por UAV (Laliberte, 2007; Chen, 2010). La figura 34 muestra los tratamientos utilizados.

4.5 Plan de vuelo

Las problemáticas a las que se someten los UAV son diversas; por tanto, los detalles que se desean obtener deben ser claros para que el análisis se enfoque en el objeto de estudio, por ejemplo, el éxito de las metodologías que utilizan drones como herramienta de captura de fotografías aéreas dependen mucho de la información que se obtiene y, para lograr capturar información de calidad, se deben verificar diversos aspectos: el primero de ellos es la selección del área donde se llevaran a cabo las pruebas, que en este caso son parcelas fijas de 2 hectáreas y la altura máxima de los árboles es de 55 a 60 metros; por lo tanto la altura recomendada es de por lo menos 65 metros, tomando 5 metros más a la altura máxima de la parcela para anteponerse a dificultades técnicas o logísticas.

Una vez definidos los detalles pre-vuelo, se analizaron los requisitos básicos como la duración de la batería; en el caso del phantom 3 standard la batería tiene una duración aproximada de 15 a 20 minutos, sin tomar en cuenta la intensidad de viento que se pueda presentar en el área, lo cual disminuiría el rendimiento; aun así, la duración es suficiente para realizar dos vuelos de dos hectáreas.

Los modos de vuelo (autónomos, semiautónomos, manuales) son parte importante en el vuelo del dron en alta montaña, de los cuales se debe hacer uso en maniobras específicas, como el despegue y aterrizaje para evitar errores de precisión del GPS, la distancia máxima horizontal se debe prever en el plan de tal forma que se cubra la totalidad del área monitoreada. Es importante, en el estudio, que el UAV se acerque lo más que se pueda a los árboles para realizar una captura que muestre los detalles del MEA.

Se utilizó el software DJI GO, propio del fabricante del UAV phantom 3 standard, para obtener una vista previa del área de estudio para verificar el alcance del UAV y si cubre por completo las parcelas.

El software dronedeploye permitió realizar el plan de vuelo, que se preprograma con las características mencionadas anteriormente, tomando la altura a la que volará, la extensión territorial que cubrirá y la forma en la que realizará el recorrido. Una de las ventajas sobresalientes de dronedeploye es que asigna la periodicidad de captura de la cámara de acuerdo con la relación altura-extensión-forma de vuelo.

Los vuelos de prueba son importantes para obtener la resolución espacial, la calidad de las imágenes, los aspectos visibles y, lo más importante, el monitoreo del comportamiento del UAV con respecto a los satélites disponibles, lo que permitirá ejecutar un plan de vuelo adecuado a las condiciones del área de estudio. En nuestro estudio se realizaron 8 vuelos de prueba en 4 parcelas con diferentes condiciones topográficas.

El área de despegue debe ser de por lo menos 6 metros cuadrados en tierra sin arbustos prolongados y sin ramas, de lo contrario se deberá hacer una limpieza del área o cambiar el punto de despegue.

4.6 Obtención de datos

La ejecución de vuelo activa está determinado por la ruta programada en el software dronedeploye, la duración del vuelo y monitoreo de la trayectoria del UAV; si por alguna razón el rendimiento de la batería no es suficiente para terminar la ruta del recorrido, la pila inteligente lo detectara y regresara al punto de partida como una medida de protección que evite la caída del UAV. Una vez que el vehículo comience automáticamente a recorrer el área seleccionada, realizará numerosas capturas de imágenes hasta que haya sobrevolado por completo la parcela. Durante todo el tiempo de vuelo, el UAV envía la información a la estación base sobre diferentes aspectos como: posición, estado de las baterías o potencia de los motores. Al término de la ruta, dronedeploye indica el número de imágenes obtenidas.

Se documentan los datos específicos en una bitácora como la hora de vuelo, fecha, duración del recorrido, intensidad de viento, intensidad luminosa y número de imágenes, este último será un factor importante para la aplicación posterior del algoritmo de identificación.

Antes de terminar el trabajo de campo, se verifica que las imágenes tienen aspectos visibles del muérdago, de no ser así se debe repetir el vuelo con una estrategia de recorrido diferente. La recopilación de datos cartográficos es importante para tener una referencia real del área de estudio con las coordenadas UTM.

4.7 Fotogrametría

Una vez recolectadas las fotografías aéreas, estas deben ser seleccionadas de manera que se eviten imágenes borrosas, con un mal enfoque o que no visualicen el punto de interés.

Al tener el banco de imágenes seleccionadas, se colocan en la plataforma de dronedeploye web, una vez que el servidor procesa la información se crea un mosaico, el cual ilustrará la parcela de estudio, permitirá contar con la resolución espacial determinada por el software dronedeploye, en el cual se aplicaran los algoritmos de identificación de MEA y las técnicas de clasificación supervisada. Una vez obtenidos los mosaicos, se ejecuta el algoritmo CRPL, el cual permite obtener la imagen de identificación de la cobertura de dosel y MEA a nivel de copa del *Pinus hartwegii*.

4.8 Validación de resultados

Para validar el nivel de infestación por MEA, se realizó un censo en la parcela seleccionada mediante el método de Hawksworth, considerando solo los dos tercios superiores del *Pinus hartwegii* que corresponden al dosel. El censo fue dirigido a árboles mayores a 20 cm de Diámetro a Altura de Pecho (DAP), ya que son los que se aprecian en las fotografías capturadas, y se recopilaron las variables altura, DAP, sanidad y coordenadas de cada individuo.

Se determinó el nivel de infestación de la parcela con base en la escala de Hawksworth y de los datos obtenidos del censo. Para clasificar el nivel de infestación de la parcela, con base en las imágenes obtenidas del UAV, se realizó la calibración con imágenes que presentan las siguientes características:

- Ausencia de MEA y poca presencia de *Pinus hartwegii*.
- Poca presencia de MEA y poca presencia de *Pinus hartwegii*
- Poca presencia de MEA y abundante presencia de *Pinus hartwegii*
- Abundante presencia de MEA y Abundante presencia de *Pinus hartwegii*

Una vez obtenida la equivalencia del porcentaje de presencia del algoritmo, se determina la coincidencia con la escala de Hawksworth.

Los estudios de teledetección se han incrementado exponencialmente con diferentes técnicas que en conjunto con algoritmos y software proveen información para identificar comportamientos de cambio o anomalías que ocurren en las masas forestales. Así mismo la evolución de la tecnología brinda oportunidades con herramientas de captura de información que hace una década se complicaba por los costos y la facilidad de adquisición.

Los métodos tradicionales en comparación con los métodos de teledetección toman en cuenta detalles a nivel de suelo que no son perceptibles en las imágenes capturadas por UAV, sin embargo, se cubre un gran porcentaje de los detalles del árbol que permiten obtener la suficiente información para realizar la identificación de detalles a nivel de copa. En el caso del MEA, el método de Hawksworth contempla todos los individuos, por su parte en el método de teledetección se contemplan solo los juveniles y adultos que son los que presentan mayor infestación según la literatura, es por ellos que es viable el análisis del MEA a nivel de copa mediante la descomposición colorimétrica y algoritmos de clasificación como el KNN.

Capítulo V

Resultados



5.1 Introducción.

Se generaron dos artículos científicos, el primero se titula “Identificación de *Arceuthobium globosum* utilizando imágenes aéreas de UAV en un bosque de alta montaña del centro de México” y se encuentra publicado en la revista *Journal of Forestry Research*, indexada en el JCR (Journal Citation Report). En este se abordan las 4 etapas iniciales de la metodología planteada, y tiene como objetivo realizar la exploración y análisis de datos obtenidos de las imágenes aéreas con UAV de tal manera que se pudiera calibrar un algoritmo programado para la identificación de presencia de MEA en bosque de *Pinus hartwegii*. Tomando en cuenta que el método tradicional con brigadas tiene altos costos y demanda una gran cantidad de tiempo para el diagnóstico de esta planta parásita, la identificación de presencia de MEA puede fortalecer las estrategias y logística en el diagnóstico de infestación.

El segundo artículo se titula “Uso de Vehículos aéreos no tripulados para la de detección del Nivel de infestación por plantas parásitas a nivel de copa en bosques de *Pinus hartwegii* del centro de México” y fue enviado a la revista *Forest Systems*. En este se abordan las 2 últimas etapas de la metodología con la finalidad de definir el nivel de infestación en la parcela evaluada mediante el algoritmo de clasificación supervisada KNN, de tal forma que se generan regiones de la cubierta de dosel presente y dentro de estas regiones se obtiene el porcentaje de presencia de MEA para generar la equivalencia con la escala del método de Hawksworth.

5.2 Artículo 1 Identificación de *Arceuthobium globosum* utilizando imágenes aéreas de UAV en un bosque de alta montaña del centro de México

Springer Link

» Sign up / Log in English Academic edition

Search

Home • Books A - Z • Journals A - Z • Videos • Librarians

» Browse Volumes & Issues Search within this journal

Journal of Forestry Research

ISSN: 1007-662X (Print) 1993-0607 (Online)

This journal was previously published under other titles ([view Journal History](#))

Description

The Journal of Forestry Research offers articles dealing with all aspects of forestry. It is primarily a medium for reporting original theoretical and experimental research, as well as technical reviews. Approximately 75 per cent of the papers published in the journal are by international researchers; the balance is contributed by Chinese scientists. The authorship covers more than 60 countries. The Journal of Forestry Resear ... [show all](#)

[Browse Volumes & Issues](#)

Latest Articles

Original Paper
At what carbon price forest cutting should stop
Timo Pukkala (February 2020)
[» Download PDF \(550KB\)](#) [» View Article](#)

Review Article
Protective and defensive roles of non-glandular trichomes against multiple stresses: structure–function coordination



Impact Factor	Available
1.155	1990 - 2020
Volumes	Issues
31	120
Articles	Open Access
2,816	111 Articles

Stay up to Date

[» Article abstracts by RSS](#)
[» Register for journal updates](#)

Original Paper | Published: 23 April 2019

Identification of *Arceuthobium globosum* using unmanned aerial vehicle images in a high mountain forest of central Mexico

[Luis A. León-Bañuelos](#), [Angel R. Endara-Agramont](#), [William Gómez-Demetrio](#), [Carlos G. Martínez-García](#) & [E. Gabino Nava-Bernal](#) 

[Journal of Forestry Research](#) **31**, 1759–1771(2020) | [Cite this article](#)

138 Accesses | [Metrics](#)

Abstract

The identification of forests infested by parasitic plants is important for the design of appropriate control and prevention strategies. Satellite images and geographic information systems are commonly used to analyze the presence of pest and parasitic plants in the forests. However there is a need for finer resolution. In the last decade, the use of unmanned aerial vehicles has become increasingly common for capturing aerial images (< 10 cm per pixel). The objective of the study was to obtain RGB values (Red, Green and Blue) through the colorimetric ranges for use in identification of Yellow Dwarf Mistletoe (YDM) (*Arceuthobium globosum*) in aerial images taken in a forest of central Mexico via a programmed algorithm. Three tonalities of YDM were classified according to its phenological stages, viz. green (young stage), yellow (adult stage), and brown (senescence stage), considering two light intensities, sunny and cloudy. Non-parametric tests were used in statistical analyses. The Spearman test showed significant negative correlation ($p < 0.001$) between phenological stage and colour, indicating that lower RGB values were associated with greater age. The differences between groups were analysed using Kruskal–Wallis ($p < 0.01$) and Mann–Whitney tests ($p < 0.01$). The applied algorithm identified the presence and predominant colours of YDM according to its phenological stage.

ORIGINAL PAPER

Identification of *Arceuthobium globosum* using unmanned aerial vehicle images in a high mountain forest of central Mexico

Luis A. León-Bañuelos¹ • Angel R. Endara-Agramont¹ • William Gómez-Demetrio¹ • Carlos G. Martínez-García¹ • E. Gabino Nava-Bernal¹

Received: 15 November 2018 / Accepted: 13 February 2019
© Northeast Forestry University and Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2019

Abstract: The identification of forests infested by parasitic plants is important for the design of appropriate control and prevention strategies. Satellite images and geographic information systems are commonly used to analyze the presence of pest and parasitic plants in the forests. However there is a need for finer resolution. In the last decade, the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) has become increasingly common for capturing aerial images (<10 cm per pixel). The objective of the study was to obtain RGB values (Red, Green and Blue) through the colorimetric ranges for use in identification of Yellow Dwarf Mistletoe (YDM) (*Arceuthobium globosum*) in aerial images taken in a forest of central Mexico via a programmed algorithm. Three tonalities of YDM were classified according to its phenological stages, *viz.* green (young stage), yellow (adult stage), and brown (senescence stage), considering two light intensities, sunny and cloudy. Non-parametric tests were used in statistical analyses. The Spearman test showed significant negative correlation ($P < 0.001$) between phenological stage and colour, indicating that lower RGB values were associated with greater age. The differences between groups were analysed using Kruskal-Wallis ($P < 0.01$) and Mann-Whitney tests ($P < 0.01$). The applied algorithm identified the presence and predominant colours of YDM according to its phenological stage.

Keywords: colorimetric analysis • RGB • *Pinus hartwegii* • parasitic plants • remote sensing

Introduction

High mountain forest in Mexico are mainly represented by *Pinus hartwegii*, an endemic species that occupies elevations between 2,900 and 4,200 m a.s.l. (Rzedowski 1978, 1981; Perry 1991). Mexico's diversity of pine species is among the greatest in the world. Notably, 24% of the estimated total flora of Mexico corresponds with pine forest, which contain an assemblage of around 7,000 species (Rzedowski 1998). However, species in high mountain forests such as pines and firs suffer high rates of mortality (Dobbertin and Rigling 2006) as a result of the interaction of multiple biotic factors (pathogens, defoliators, parasites, and hemiparasites), abiotic factors (severe drought and prolonged rains) (Allen *et al.* 2010), and anthropogenic degradation (illegal logging, grazing, and fires) (Endara *et al.* 2012). The Nevado de Toluca Flora and Fauna Protection Area (NTFFPA) in central Mexico is affected by parasitic plants (mistletoe) and forest pests (bark beetles) that directly threaten *Pinus hartwegii* forests across an area of approximately 10,000 ha (Cedillo 2012). Commonly applied measures for control of parasitic plants are sanitation pruning and removal of dry, infected trees (CONAFOR 2005; Marchal 2009). Outbreaks over large areas are usually detected using traditional sampling methods (random, systematic, or stratified) (McRoberts *et al.* 1992), yet these are often costly and require large allocations of resources and time for their application (Méndez and Magaña 2007; Wallace *et al.* 2016).

Project funding: The work was supported by Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) and the project Programa de Manejo del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca (No. 3674/2014E).

The online version is available at <http://www.springerlink.com>

Corresponding editor: Tao Xu

E. Gabino Nava-Bernal
gnavab@uaemex.mx

¹Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales [ICAR], Toluca, Mexico 50000, México

Despite its inherent difficulties, the identification of the spatial distribution of parasitic plants is important for generating adequate containment and prevention strategies (Ramírez and González 2007). For this purpose, satellite images have been used to monitor and analyze vegetation distribution patterns through geographic information systems (García-Rodríguez *et al.* 2016). To identify, the presence of parasitic plants, a spatial resolution of centimetres per pixel (< 10 cm) is required. Barnoaiea and Iacobescu (2008) reported that parasitic plants could not be identified in panchromatic images with spatial resolution of 1 m or in images with spatial resolution of 4 m that captured spectral channels such as blue, green, red, and near infrared. Accordingly, it is necessary to use additional technical-scientific measures that strengthen existing techniques to identify parasitic plants in temperate forests (Vilches *et al.* 2010).

Currently, one trend in remote sensing studies is the processing of high-resolution aerial images that capture diverse frequencies of the electromagnetic spectrum for a variety of purposes. Examples are analyses of the visible spectrum based on pixel RGB colour models. These have been used in forestry studies to identify specific elements of flora and fauna (Christensen 2015; Danilov *et al.* 2015; Pavelka *et al.* 2015; González *et al.* 2016) as well as in precision agriculture (Fajardo-Junco 2013; Campo *et al.* 2015; Rincón *et al.* 2015; Navia *et al.* 2016), landscape and soil characterisations (Ramírez-Chávez *et al.* 2013; García-Rodríguez *et al.* 2016), hydromorphological analyses (Ojeda *et al.* 2014; Casado *et al.* 2015), and cartography (Reinoso *et al.* 2018), among other fields of study. In this respect, RGB colourimetry is often used to strengthen and complement existing methods or in new methods supported by computational techniques in order to improve data analysis and generate better results (Koh and Wich 2012). Such integrated analyses enable specific components of the environment to be evaluated, including the monitoring of plant phenology (Klosterman and Richardson 2017), the influence of different stressors (Ludovisi *et al.* 2017), and changes in forest structure (Wallace *et al.* 2016).

Images generated from unmanned aerial vehicles (UAVs) may be used in RGB colorimetric analyses. Notably, the use of UAVs to obtain aerial photographs has rapidly developed over the last decade (Berni *et al.* 2009). Because of their autonomy and versatility, UAVs complement the capacities of manned aerial vehicles and satellite remote sensing systems (Tang and Shao 2015). In addition, they can reduce costs to one tenth of the expense of manned monitoring techniques (Ojeda *et al.* 2014).

UAVs have not had a large impact in the field of forest health because factors such as climatic conditions, rugged topography, and forest density complicate their technical and logistical operation (Lehmann *et al.* 2015). Despite these complications, the telecommunication technologies used in UAVs have rapidly evolved, enabling autonomous and semi-autonomous flights to be carried out and to capture high resolution photographs (Dempewolf *et al.* 2017). These technologies provide new opportunities in the monitoring and identification of pests and parasitic plants (Watts *et al.* 2012).

One advantage of using UAVs to identify parasitic plants in temperate forests is their capacity to capture different tones of the RGB color spectrum, which may be subsequently analysed for specific purposes (Salamí *et al.* 2014). Yellow Dwarf Mistletoe (YDM) (*Arceuthobium globosum* Hawksw & Wiens) presents particular colors in each of its phenological stages (Cibrián *et al.* 2007), distinguishing it from its host (*Pinus hartwegii* Lindl). However, no colorimetric or remote sensing methods currently exist for identifying the presence of this mistletoe species, nor has its spectral signature been defined.

For this reason, a colorimetric method based on the color decomposition of Yellow Dwarf Mistletoe (YDM) species was carried out using aerial photographs obtained from UAVs in a high mountain forest of central Mexico. The aim was to develop a method for identifying the presence of YDM as a case study. The colorimetric ranges of different phenological stages (young, adult, and senescent) of YDM were defined during an initial calibration stage in order to subsequently automate the identification of this species using algorithms programmed and customised for this purpose.

Materials and methods

Flight platform

For remote sensing we used the UAV quadcopter (drone Phantom 3 standard). It was equipped with a GPS navigation system, automatic take-off and landing, telemetry, and video transmission via Wi-Fi and was

controlled by the DJI GO mobile application. One of the advantages of this UAV with respect to similar UAVs was the duration of its intelligent battery, which provided approximately 25 minutes of flight. Upon sensing depletion of battery charge, the UAV returned to its point of take-off. The characteristics of this UAV enabled continuous forest monitoring combined with stability during the capture of images. Table 1 shows the general characteristics of the UAV used in our field work.

Table 1 Characteristics of the UAV Phantom 3 Standard.

Specifications	Capacity
Weight (battery included)	1216 g
Max ascent speed	5 m/s
Max descent speed	3 m/s
Max speed	16 m/s (ATTI mode)
Max altitude	500 m
Max distance	500 m
Integrated camera	Lens FOV 94° 20 mm (35 mm) f/2.8 Sensor 1/2.3" CMOS pixels: 12 M (4000 × 3000) JPEG

Study area

Aerial photographs were captured during August and November 2016 in the NTFFPA (4,660 m a.s.l.). This flora and fauna protection area is one of the main suppliers of environmental services in central Mexico (CONANP 2017). Forests containing pine trees (*Pinus spp.*) and fir trees (*Abies religiosa* Kunth Schldl. & Cham.) occupy approximately 66% of the total area (Franco and Burrola 2009) yet are threatened by land use changes, increasing anthropogenic pressures, and consequently, the proliferation of pests and diseases (Franco *et al.* 2016). Fig. 1 illustrates the impact of these plants on the NTFFPA (Cedillo 2012).

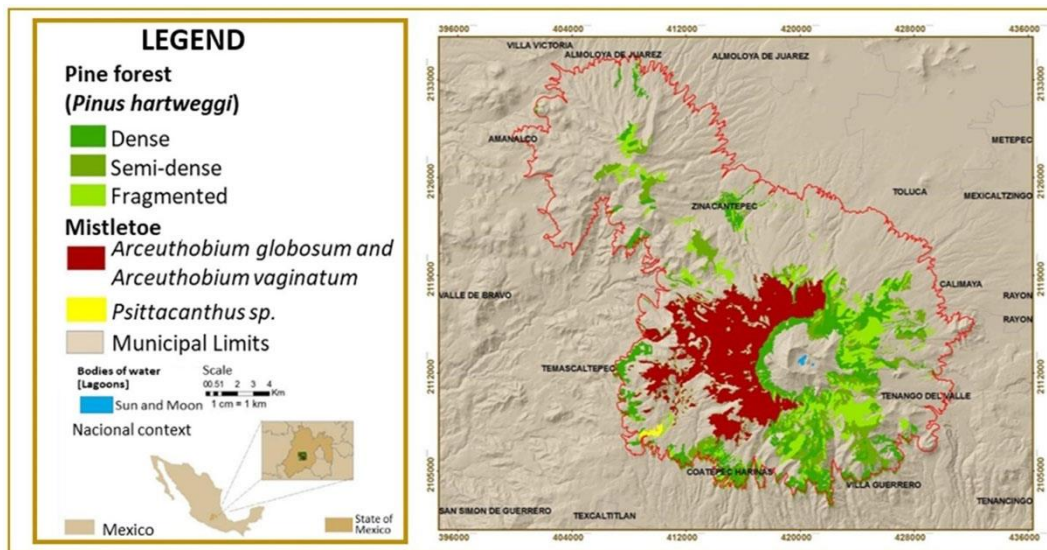


Fig. 1 Distribution of parasitic plants in the Nevado de Toluca Flora and Fauna Protection Area (Source: Cedillo 2012).

We used the UAV to photographically sample an experimental plot of 2 ha area that contained fragmented *Pinus hartwegii* forest. This plot was one of the areas with greatest incidence of YDM identified by Cedillo (2012) (Fig. 1). The plot had slopes of less than 15° to enable the easy ascent and descent of the UAV.

Colorimetric identification of *A. globosum*

YDM measures from 18 to 70 cm in length and has greenish-yellow stems. It flowers between March and April and fruits in August (Hawksworth and Wiens 1996; Cibrián *et al.* 2007). Its colour varies throughout the year. During its growth stage, it is greenish in color and as it matures, it begins to turn yellow. When senescent, its color is pale brown.

According to Adamsen *et al.* (1999) and Gitelson *et al.* (2002), the presence of vegetation on soil can be established through performing the colorimetric decomposition of an image in the visible range of the electromagnetic spectrum. To identify YDM in aerial photographs, it is first necessary to define the colorimetric range of the tones presented during each phenological stage. Accordingly, colorimetric decomposition was used to obtain the pixels of visible areas of YDM while avoiding the influence of the forest canopy, trees, grasses, and other plants in the study area. Images were taken under two specified lighting conditions (treatments) to observe the effects of possible variations in colour refraction (Table 2).

Table 2 Treatment conditions for obtaining aerial photographs (Source: Elaborated by the authors)

	Treatment 1 Sunlight in a controlled environment	Treatment 2 <i>In situ</i> sunlight
Photograph capture	Performed with a camera integrated with an UAV at a height of 35 cm above the YDM sample.	Performed at a height of 55 to 60 m from the point of take-off, vertically (270 degrees), with an angle of inclination of 300°, at a distance of 5 to 10 m above the pine trees.
Light conditions	Sunlight intensity of 25,000 to 50,000 luxes in a sunny environment and 10,000 to 25,000 luxes in a cloudy environment (Bunning and Moser 1969).	Sunlight intensity of 25,000 to 50,000 luxes in a sunny environment and 10,000 to 25,000 luxes in a cloudy environment (Bunning and Moser 1969).
Observations	A black background was used to avoid interference from other colours.	The mobile application DJI GO was used to access the semi-automatic and manual flight modes, and to perform specific manoeuvres, such as take-off and landing, and to compensate for errors in the precision of the GPS (Kaliardos and Lyall 2014).

The objective of applying the controlled treatment was to have a point of reference in the calibration of the pixels. Random samples were collected for the controlled and *in situ* treatments (aerial photographs). We discarded images that lacked acceptable definition as a result of poor focus or lack of visualisation of the point of interest.

Data collection

Four flights were carried out during which 36 photographs were obtained for each treatment, corresponding with 12 images of green YDM (young), 12 images of yellow YDM (adult), and 12 images of brown YDM (senescent) based on the three phenological stages described by Cibrián *et al.* (2007). From these images, 36 pixels of YDM were obtained during full sunlight and 36 during cloudy conditions by use of the Instant Eyedropper 1.9.1 (2016) tool. The obtained data were recorded in a matrix in RGB format and were divided into subpixels: Red (R), Green (G), and Blue (B). These subpixels R, G, and B were measured as values ranging from 0 to 255. Table 3 describes the design of the treatments used to analyze the data as formulated following Saghri *et al.* (1998) and Das (2004).

Table 3 Design for the RGB analysis of YDM

Treatment	Tone	Light intensity	Repetitions R-G-B
1. Controlled sunlight (CSL)	1. Green	1. Sunny	N = 36
		2. Cloudy	N = 36
	2. Yellow	1. Sunny	N = 36
		2. Cloudy	N = 36

	3. Brown	1. Sunny	N = 36
		2. Cloudy	N = 36
2. <i>In situ</i> sunlight	1. Green	1. Sunny	N = 36
		2. Cloudy	N = 36
(INSL)	2. Yellow	1. Sunny	N = 36
		2. Cloudy	N = 36
	3. Brown	1. Sunny	N = 36
		2. Cloudy	N = 36

The analysis of RGB data was carried out in the following three steps: (1) The data were explored to identify distribution patterns as suggested by Field (2013); (2) Kolmogorov-Smirnov normality tests were applied to the RGB data of each treatment, a step recommended when sample size >50; and 3) Non-parametric tests were conducted, *viz.* Spearman correlation, Mann-Whitney, and Kruskal Wallis tests (Field 2013). To identify associations between the phenological stages of YDM and the digital values of the RGB subpixels, a bivariate Spearman correlated was applied. Mann-Whitney tests were applied to identify differences between groups with respect to light intensity (sunny versus cloudy). Finally, Kruskal-Wallis and Mann Whitney tests were used to identify differences between tones.

The analysed values were the medians and interquartile ranges (IQR) as well as the central tendency and dispersion. The tone variables were measured on an ordinal scale and served to identify differences in medians between groups. The data were analysed in the software SPSS Ver. 24 at an alpha level of 0.05 unless otherwise specified in the text.

Results

Exploration of the color ranges of Yellow Dwarf Mistletoe

The dispersion of the pixels corresponding with YDM in each treatment shows the behavior of the RGB data for each tone under different light intensities. Figure 2 illustrates the upper and lower RGB values and the distribution of YDM tones in each treatment. The subpixels R and G of the INSL treatment presented a larger range of values compared to the CSL treatment. Differences were also apparent in the order of the tones, which indicate the distinct phenological stages of YDM. Subpixel B showed differences in the range and dispersion of pixels as YDM increased in age; however, it did not differ in the order of tones.

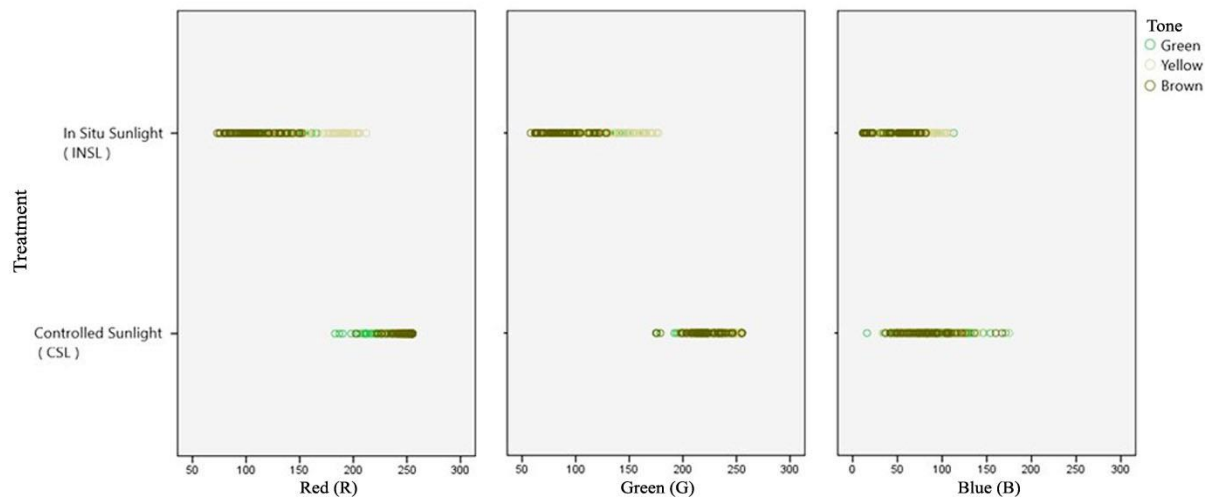


Fig. 2 Distribution of RGB subpixels of YDM per treatment and tone

The distribution of the subpixels according to treatment (light intensity) displayed a similar pattern in terms of the range and dispersion of the RGB values per tone. The ranges and the positions of the subpixels of each tone and light intensity indicate possible differences between the treatments. Hence, it was necessary to analyze the behavior of the subpixels in each treatment to further evaluate their relationships and to determine whether the treatment conditions/variables directly affected the values of the subpixels.

Analysis of RGB subpixels

Dispersion of RGB values per treatment

The YDM tones were defined by the interaction of the RGB subpixels. Figure 3 shows the distribution of the subpixels in pairs. The first comparison of R-G indicated a positive pattern in the INSL treatment, whereas a well-defined pattern was not apparent in the CSL treatment, implying the possibility of an interaction between R-G. The second comparison of R-B indicated a positive pattern, although the interaction between these two subpixels was lower. Greater clustering of the values was observed in the INSL treatment, whereas the values in the CSL treatment displayed more similar values in the dispersion. The third comparison of G-B showed the same distribution pattern as that of R-B.

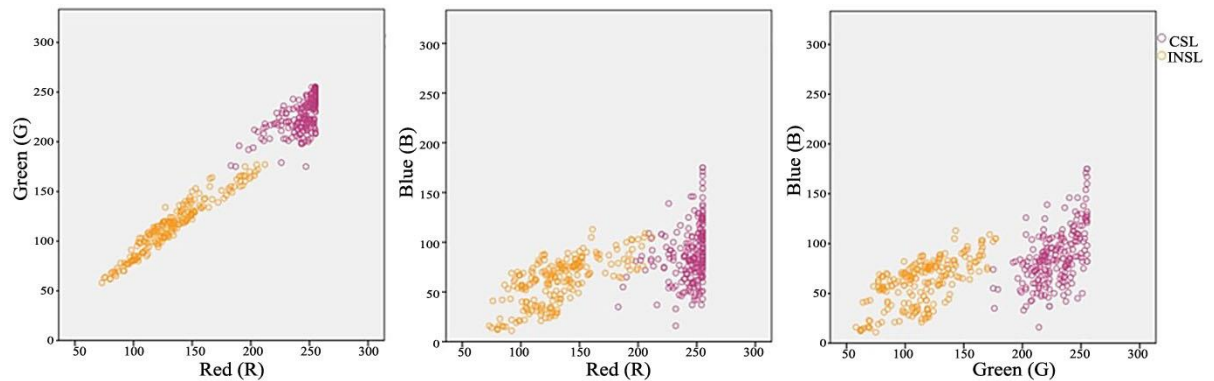


Fig. 3 Dispersion of RGB subpixel values in the treatments INSL and CSL

The degree to which one or two of the three primary RGB colors dominates causes one of the tones to stand out (Dekel 2016). In the case of YDM, the subpixels R and G were dominant and responsible for defining the main tones (green, yellow, and brown). Subpixel B differed because the response to this subpixel was one-twentieth of the response to the other two colors, as reported by Casado *et al.* (2015). In this case, subpixel B was responsible for determining intensity of brightness: As the tone of YDM neared 0, the colour becomes darker. Meanwhile, as the tone approached the upper limit, the color became lighter.

Dispersion of RGB values per tone

Fig. 4 illustrates the distribution pattern of the YDM subpixels for the CSL treatment. The R-G subpixels showed a positive linear tendency in young YDM (green), indicating dependence on one another. In contrast, the subpixels for adult and senescent YDM (yellow and brown, respectively) did not show a linear tendency. A small range of values and low dispersion were recorded for these tones, which were mostly positioned near the upper limit. The R-B and G-B pairs showed no defined pattern of behavior or linear dispersion compared to the R-G pair.

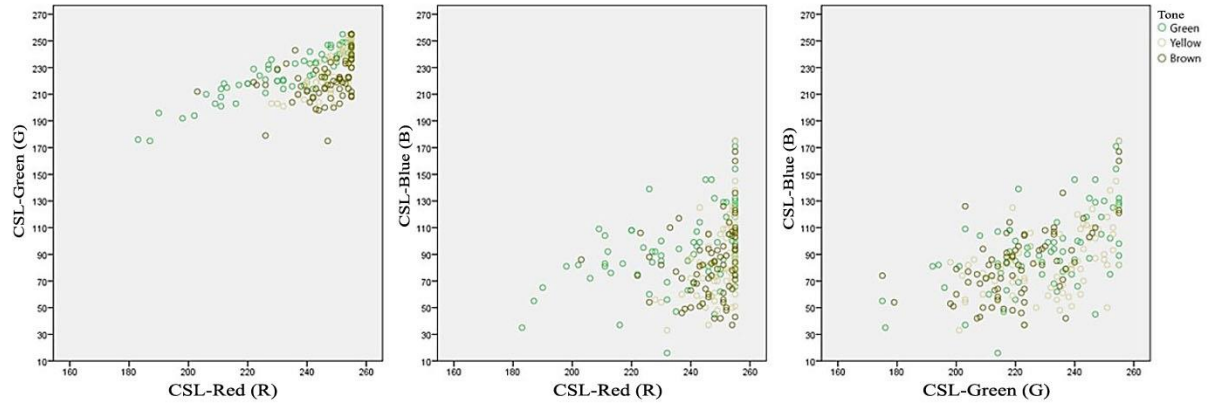


Fig. 4 Dispersion of subpixel pairs according to tone in the CSL treatment

Fig. 5 shows the dispersion of the subpixels in the INSL treatment. The values were lower than those recorded for the CSL treatment. However, the behavior of the R-G subpixels showed a more defined and linear pattern in the YDM tones. Higher R values corresponded with a lighter yellow tone, whereas higher G values corresponded with a green tone. As these two values decreased, the tone tended toward brown. The dispersion pattern for the R-B and G-B relationships was similar, so we conclude that subpixel B had less impact on the YDM tones.

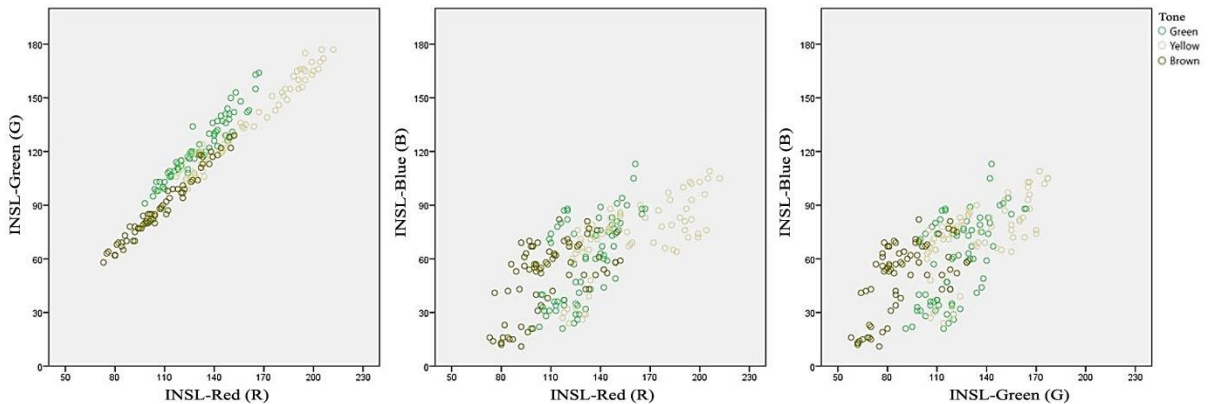


Fig. 5 Dispersion of subpixel pairs according to tone in the INSL treatment

The distribution of the two treatments differed according to tone. In Fig. 5, a clear linear relationship is shown in the R-G distribution compared to that shown in Fig. 4. The CSL and INSL treatments were somewhat similar with respect to the R-B and G-B patterns. Notably, B was responsible for brightness and did not directly influence tone.

To compare the relationships between the subpixels of each treatment and their significance with respect to phenology and light intensity, we first used a Kolmogórov-Smirnov normality test and this indicated non-normal data distribution. Accordingly, non-parametric tests were used to assess differences between treatment means.

Correlations of RGB subpixels with phenology, light intensity, and tone

Correlation of RGB subpixels with phenology

In the CSL treatment under sunny conditions, the subpixel R was not related with phenological stage, as a similar range was found for the young, adult, and senescent stages. In contrast, the subpixel G was

negatively and significantly ($P < 0.01$) related with phenological stage; as the age of YDM increased, the contribution of subpixel G decreased. Similarly, subpixel B had a negative relationship ($P < 0.05$) and a behavior similar to subpixel G, but with a lower dependence on phenological stage. Under cloudy conditions, the subpixel R showed a positive relationship ($P < 0.05$) with phenology; as the age of YDM increased, the value of this subpixel also increased. On the other hand, subpixels B and G were not significantly related with the tones of the phenological stages under these conditions.

In the INSL treatment under sunny conditions, the subpixels R, G, and B, were negatively related with phenological stage, indicating that as the age of YDM increased, the values of these subpixels tended to decrease. This coincided with the pattern illustrated in Figure 5 in which the brown tones (senescent individuals) were associated with lower RGB values. Under cloudy conditions, a negative relationship was similarly found for subpixels R and G, whose values decrease to a lesser extent as YDM advanced in age from young to senescent. In contrast, subpixel B did not indicate a relationship with tone under cloudy conditions, maintaining a similar range of dispersion in each tone, as shown in table 4.

Table 4 Correlation between RGB subpixels and phenological stage of YDM per treatment

Treatment	Subpixel	Sunny (<i>r</i>)	Cloudy (<i>r</i>)
CSL n = 108	Red (R)	0.078 ^{NS}	0.363**
	Green (G)	-0.433**	-0.011 ^{NS}
	Blue (B)	-0.225*	-0.083 ^{NS}
INSL n = 108	Red (R)	-0.375**	-0.494**
	Green (G)	-0.500**	-0.640**
	Blue (B)	-0.396**	-0.118 ^{NS}

NS = Not significant at 0.05; * Correlation is significant at 0.05 (2-tailed); ** Correlation is significant at 0.01 (2-tailed).

The subpixel relationships differed in the CSL and INSL treatments under sunny conditions, especially considering that subpixel R was not significant in the CSL treatment because it showed similar dispersion across all tones (Fig. 4). Similarly, the significance of subpixel B was lower in CSL, indicating a lesser contribution to YDM tone than in the INSL treatment.

In the cloudy environment, subpixels differed with phenology in both treatments, mainly in the type of relationship recorded for subpixel R. This relationship was positive in the CSL treatment and negative in the INSL treatment. Similarly, subpixel G was negatively and significantly correlated with phenological stage in the INSL treatment, although the same relationship was not recorded for the CSL treatment. Subpixel B was the only subpixel showing the same relationship with phenology in both treatments (non-significant). Casado *et al.* (2015) reported that lighting is not a key factor affecting classification as long as a minimum level of brightness is present. To verify the possible differences between treatments, Mann Whitney and Kruskal-Wallis tests were applied.

Differences in subpixels per light intensity

The differences between the CSL and INSL treatments are notable in the median values of the R and G subpixels, which were much higher in the CSL treatment than in the INSL treatment under sunny conditions. However, the interquartile ranges (IQRs) of the INSL treatment were greater than those of the CSL treatment, especially considering that R-G was responsible for the observed tone. The subpixel B had similar median values, indicating a similar distribution in both treatments.

The differences in the cloudy environment were more notable in the median values of the subpixels R and G in the CSL treatment and were double those of the INSL treatment. On the other hand, the IQRs of the INSL treatment were greater. The differences in tone identified in each treatment might be associated with a higher or lower IQR, a higher IQR indicating greater combination of the subpixels in the generation of a tone.

Table 5 shows a comparison of the Sunny and Cloudy treatments as a whole and lists the significant differences for subpixels R and G in the INSL and CSL treatments. Light intensity had detectable effects in each treatment. The behavior of subpixel B was similar for treatments, taking into account that this subpixel did not directly affect tone.

Table 5 Comparison of light intensities in the CSL and INSL treatments

Subpixels	Sunny (n = 216)		Cloudy (n = 216)		² P
	Median	¹ IQR	Median	¹ IQR	
³ Red	214.0	105.0	167.5	126.0	<0.01
³ Green	178.0	107.0	156.5	115.0	<0.01
³ Blue	75.0	29.0	73.0	49.0	0.87

¹IQR = interquartile range; ²P = Mann Whitney ($P < 0.05$); ³Red-Green-Blue = subpixels expressed as a value from 0 to 255.

The differences in the RGB values per tone according to light intensity (under Sunny and Cloudy conditions) established the basis for verifying the dependence of each tone on the subpixels.

Differences in subpixels per tone

RGB values of YDM tones differed significantly between CSL and INSL treatments ($P < 0.001$) (Table 6). With respect to subpixel R, the yellow tone differed. Its median was greatest, and its dispersion was distinct from those of the green and brown tones. With respect to subpixel G, the brown tone differed and reflected the lesser median, indicating that this tone required a comparatively smaller contribution from subpixel G. Similarly, for subpixel B, the brown tone differed and presented the lowest median; the level of brightness of this tone was lower than that of both yellow and green.

Table 6 Comparison of the tones that influence the CSL and INSL treatments

Subpixel R-G-B	Green (n = 72)		Yellow (n = 72)		Brown (n = 72)		² P
	Median	IQR ¹	Median	IQR ¹	Median	IQR ¹	
R ³	175 ^a	113	220 ^b	102	177.5 ^a	148	<0.001
G ³	169 ^a	113	187.5 ^a	107	152 ^b	136	<0.001
B ³	77.5 ^a	37	78 ^a	24	64 ^b	31	<0.001

¹IQR = Interquartile range; ²P = Kruskal-Wallis probability value; ³Red-Green-Blue = subpixels expressed as a value from 0 to 255; abc = Different superscripts among groups indicate significant differences according to the Mann-Whitney test.

Greater precision was obtained for pixels in a controlled environment, but the significant differences in light intensity as well as tone revealed that the ranges of RGB values documented in the CSL treatment were not appropriate for use in the identification of YDM (in situ) in our study area. Thus, the colorimetric ranges for identifying the presence of YDM were established based on the data obtained from the INSL treatment.

Application of the identification algorithm to the colorimetric ranges at pixel level (CRPL)

Once the data were analysed and cleaned, the minimum and maximum values of each tone were established. The defined ranges are shown in Table 7 and Table 8 for sunny and cloudy conditions, respectively. These were based on the dependence of the subpixels obtained in the Spearman correlation test and on the range of separation between the subpixels R and B as limiting factors for the brightness level.

Table 7 Ranges and separation between R-G and R-B under sunny conditions

Range	Sunny in situ, green			Sunny in situ, yellow			Sunny in situ, brown		
	R	G	B	R	G	B	R	G	B
Max	167	164	113	212	177	109	152	129	81
Min	124	108	43	134	106	48	91	70	42
R-G Min	0			20			13		
R-G Max	22			37			28		
R-B Min		48			63			38	
R-B Max		91			128			93	

Table 8 Ranges and separation between R-G and R-B under cloudy conditions

Range	Cloudy in situ, green			Cloudy in situ, yellow			Cloudy in situ, brown		
	R	G	B	R	G	B	R	G	B
Max	149	138	88	152	130	88	115	99	82
Min	98	91	21	117	99	24	73	58	11
R-G Min	3			6			11		
R-G Max	11			25			22		
R-B Min		31			50			23	
R-B Max		100			103			78	

The results of the identification algorithm applied to the colorimetric ranges at pixel level (CRPL) are depicted in the aerial images according to tone (phenological stage) (Fig. 6 and 7). In some groups of pixels, more than one color is shown because a single spot of YDM can present all three tones if either new shoots or shade is present. However, one tone was always dominant.

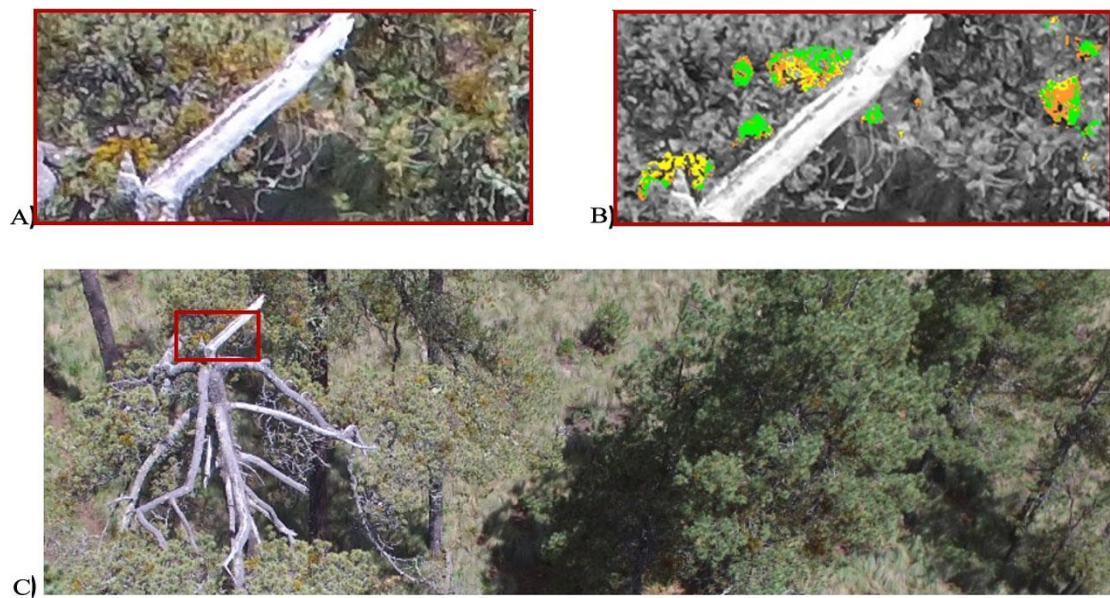


Fig. 6 A) Area affected by YDM. B) Identification of YDM by the CRPL algorithm. C) Aerial photograph of the study area under sunny conditions.

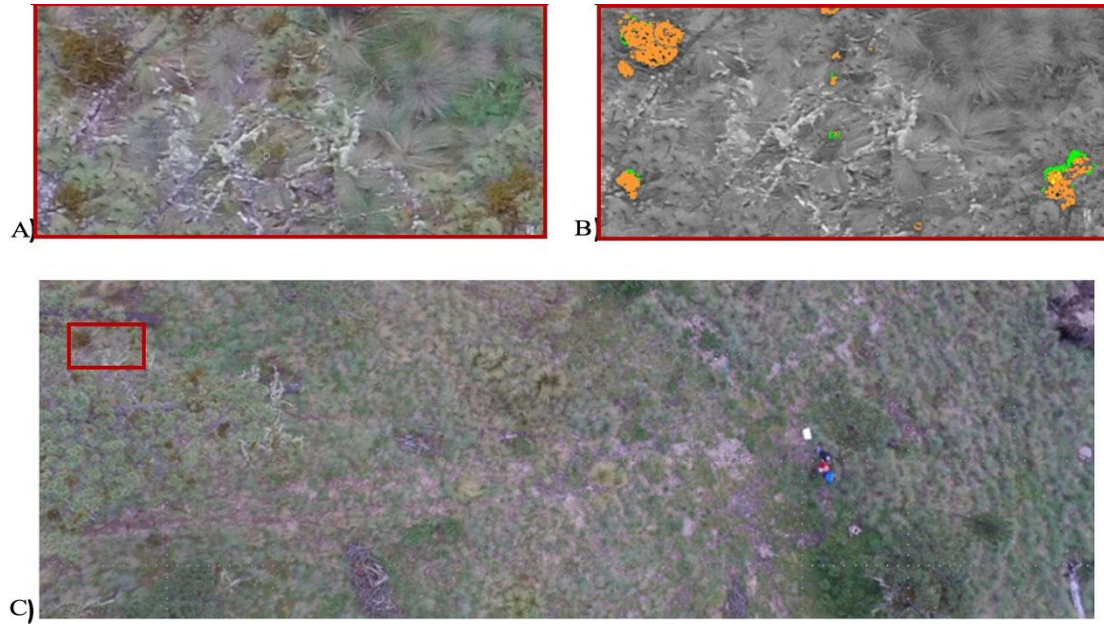


Fig. 7 A) Area affected by YDM. B) Identification of YDM by the CRPL algorithm. C) Aerial photograph of the study area under cloudy conditions

Discussion

It proved feasible to use photography acquired by UAV to identify the colorimetric ranges that define the presence of YDM according to its phenology (young, adult, and old). The combination of colorimetric decomposition with a programmed algorithm enabled identification of YDM because of the high resolution of the UAV images (<10 cm per pixel). In contrast, studies using satellite images of low spatial resolution are inadequate for this purpose because they do not show sufficient levels of detail in the canopy (Wulder *et al.* 2005; Barnoaiea and Iacubescu 2008; Wang *et al.* 2012).

It is possible to identify the presence of vegetation on soil in the visible RGB spectrum (Adamsen *et al.* 1999; Gitelson *et al.* 2002). The ability to discriminate between plant species and habitats depends on the phenological state of vegetation and sometimes requires that images be captured during specific seasons (Richardson *et al.* 2009). Additionally, it is important to consider ideal conditions (clear sky, sun at its highest point, lack of wind) in order to have greater precision in the capture of aerial photographs visualising the study object. In the case of YDM, its identification is directly related to its phenology (Cibrián *et al.* 2007), which affects its coloration. The calibration of the colorimetric ranges must be performed for each phenological stage in contrast with standard algorithms such as NDVI that are applied generally to vegetation irrespective of phenology. Hence, phenological conditions and ideal environmental conditions should be considered in the identification of YDM in the visible spectrum.

Lehmann *et al.* (2015) reported that colorimetric techniques at the pixel level have limited applicability to forest studies because the variability and texture parameters of infrared images yield results superior to those of pixel-based analyses. But we quantified a direct and highly significant relationship between the red and green subpixels of YDM and its phenology. The distinct coloration of YDM during its phenological stages can be used to differentiate this species from *Pinus hartwegii*. Hence, RGB data in the visible spectrum can be used to identify parasitic plants providing that the colorimetric pattern of these plants differentiates them from other elements in the environment.

The consideration of sunny and cloudy environments enabled greater precision in the analysis. We identified calibration pixels in order to improve the identification of YDM and to determine how data were altered by shade, one of the main constraints on the utility of photographs obtained by UAVs (Chen *et al.*

2010; Laliberte *et al.* 2007). This strategy was appropriate for preventing the lighting conditions in the area from influencing the results.

Additionally, YDM is a small plant that requires a high spatial resolution (<10 cm per pixel) for identification. And its identification can be complicated by differences in canopy height and forest density, both of which should be taken into account in analyses (Cruzan *et al.* 2016). The ability to decipher details in photographs of high mountain forest also depends on the elevation of the remote device. The optimal elevation margin established in this study was 5 to 10 meters above the highest point in the study area.

The CRPL algorithm identified pixels that should be excluded from the analysis. For example, dry pine needles sometimes enter into the colorimetric ranges at scattered points and should be taken into account. In this respect, Casado *et al.* (2015) reported that the use of neuronal networks improves the efficiency of programmed algorithms. Hence, the implementation of neuronal networks and pattern recognition strategies in future studies can be complementary in order to eliminate pixels that do not comply with the specifications of the parasitic plant.

The Hawksworth method is the most widely utilised method in the identification of YDM, but the sampling process requires considerable time in forests. However, the application of the CRPL algorithm provides an overall panorama of an infestation in a group of trees at the canopy level in the flight zone of an UAV. Accordingly, this method can be used to obtain a general overview and, if necessary, key areas can be selected for analysis or to confirm the presence of an infestation by means of field verification, thereby decreasing the technical and logistical complications presented by forests, such as those mentioned by Mlambo *et al.* (2017).

Finally, the development of the CRPL algorithm was based on the definition of the color ranges of each phenological stage of YDM in the RGB visible spectrum. In contrast, studies in other environments such as crops have mostly been performed in controlled environments and have relied on existing colorimetric algorithms such as NDVI (Fajardo-Junco 2013; Campo *et al.* 2015; Rincón *et al.* 2015; Navia *et al.* 2016). In the present study, it was necessary to programme the algorithm because of the precision required for identifying the presence of YDM on its host and differentiating it from other environmental elements. In this case, the use of colorimetric decomposition enabled only valid YDM pixels to be identified. Accordingly, this method can be considered a viable alternative in the analysis of parasitic plants in high mountain forests, allowing for the identification of particular traits such as color and form.

Conclusions

It proved feasible to use the CRPL algorithm in the identification of phenological stages of YDM in aerial photographs. This suggests potential for application of this technology in forest health monitoring and in assessment of infestations and their phenological stages. Methods could be tested for using UAV systems to complement, for example, the Hawksworth method that has been used for many years in the identification of YDM infestation. Other opportunities might be discovered for updating existing monitoring and research tools with UAV technologies for enhancement of forest health strategies.

Colorimetric decomposition proved to be a viable method for identifying vegetation. In combination with new algorithms that use remotely sensed data, this method represents an alternative means of observing or evaluating particular forest traits. The evolution of these technologies also provides opportunities for improving the capture of data from aerial images, as shown in the present study in the detection of YDM.

The flight time of our UAV was sufficient for capturing images in a 2-ha plot in a high mountain forest. Staley (2017) reported that UAVs are not ideal for areas larger than 20 ha. To analyse and monitor forest features or health over larger areas, it will probably be necessary to generate and adapt strategic sampling plans that employ remote sensing by UAVs.

The algorithm provided a general overview of the state and maturity of YDM infesting the study area.

The capacities of modern UAVs proved adaptable to varying topographic conditions where UAV technologies might broaden the horizons and potential scope of studies focused on high mountain forests.

References

- Adamsen FJ, Pinter Jr PJ, Barnes EM, La Morte RL, Wall GW, Leavitt SW, Kimball BA (1999) Measuring wheat senescence with a digital camera. *Crop Science*. 39:719–724
- Allen CD, Macalady AK, Chenchouni H, Bachelet D, McDowell N, Vennetier M, Kitzberger T, Rigling A, Breshears DD, Hogg EH, Gonzalez P, Fensham R, Zhang Z, Castro J, Demidova N, Lim JH, Allard G, Running Sw, Semerci A, Cobb N (2010) A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*. 259, 660–684.
- Barnaiaea I, Iacobescu O (2008) Using pixel and object based IKONOS image analysis for studying decay in silver fir stands. *Annals of Forest Research*. 52(1): 151–162
- Berni JAJ, Zarco-Tejada PJ, Suárez L, Fereres E (2009) Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. *IEEE, Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 47, 722–738
- Bunning E, Moser I (1969) Interference of moonlight with the photoperiodic measurement of time by plants, and their adaptive reaction. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 62(4): 1018–1022
- Campo L, Corrales J, Ledezma A (2015) Remote sensing for agricultural crops based on a low cost quadcopter. *Sistemas & Telemática*. 13(34), 49–63
- Casado MR, Gonzalez RB, Kriechbaumer T, Veal A (2015) Automated identification of river hydromorphological features using UAV high resolution aerial imagery. *Sensors*. 15, 27969–27989
- Cedillo AM (2012) Distribución espacial y análisis de la presencia de plagas forestales en el Parque Nacional Nevado de Toluca. Tesis de licenciatura Universidad Autónoma del Estado de México, México.
- Chen ZH, Chen WJ, Leblanc SG, Henry GHR (2010) Digital photograph analysis for measuring percent plant cover in the arctic. *Arctic*. 63(3): 315–326
- Cibrián D, Vázquez I, Cibrián J (2007) Muérdagos enanos del género *Arceuthobium*. En: Cibrián D, Alvarado D, García D (Eds), *Enfermedades forestales en México* (pp 357–395) Montecillo, Estado de México, México: Universidad Autónoma de Chapingo
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal) (2005) *Manual de Sanidad Forestal*. Gerencia de Sanidad Forestal. Coordinación General de Conservación Forestal, México. 51 p.
- CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas) (2017) Programa de Manejo Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca. México, 4–11
- Christensen B (2015) Use of UAV or remotely piloted aircraft and forward-looking infrared in forest, rural and wildland fire management: evaluation using simple economic analysis. *New Zealand Journal of Forestry Science*. 45(1). <https://doi.org/10.1186/s40490-015-0044-9>
- Cruzan MB, Weinstein BG, Grasty MR, Kohn BF, Hendrickson EC, Arredondo TM, Thompson PG (2016) Small unmanned aerial vehicles (Micro-Uavs, Drones) in plant ecology. *Applications in Plant Sciences*. 4(9), <https://doi.org/10.1007/s12572-016-0004-1>
- Danilov AS, Smirnov UD, Pashkevich MA (2015) The system of the ecological monitoring of environment which is based on the usage of UAV. *Russian Journal of Ecology*, 46(1), 14–19. <https://doi.org/10.1134/S1067413615010038>
- Das IC (2004) Spectral signatures and spectral mixture modeling as a tool for targeting aluminous laterite and bauxite ore deposits, Koraput, India. <http://www.gisdevelopment.net/application/geology/mineral/geom0017.htm> consulted
- Dekel G (2016) RGB and CMYK Colour systems, United Kingdom. <http://www.poeticmind.co.uk/research/rgb-cmyk-colour-systems/>
- Dempewolf J, Nagol J, Hein S, Thiel C, Zimmermann R (2017) Measurement of within-season tree height growth in a mixed forest stand using UAV imagery. *Forests*. 8, 231
- Dobbertin M, Rigling A (2006) Pine mistletoe (*Viscum album ssp austriacum*) contributes to Scots pine (*Pinus sylvestris*) mortality in the Rhone valley of Switzerland. *Forest Pathology*. 36:309–32
- Endara A, Franco S, Nava G, Valdez JI, Fredericksen T (2012) Effect of Human Disturbance on the Structure and Regeneration of Forests in the Nevado de Toluca National Park. Mexico, *Journal of Forestry Research*. 1(23): 39–44.

- Fajardo-Junco J (2013) Support for Precision Agriculture in Colombia using images acquired from Unmanned Aerial Vehicles (UAV's). Pontifica Universidad Javeriana, Colombia
- Field A (2013) Discovering statistics using IBM SPSS Statistics. 4th ed. Great Britain: SAGE Publications.
- Franco MS, Regil-García HH, Ordoñez Díaz JA B (2006) Dinámica de perturbación-recuperación de las zonas forestales en el Parque Nacional Nevado de Toluca Madera y Bosques, 12(1), pp 17–28
- Franco MS, Burrola AC (2009) Los hongos comestibles del parque nacional nevado de Toluca. México: Universidad Autónoma del Estado de México
- García-Rodríguez MP, Pérez-González ME, Sanz-Donaire JJ, García-Alvarado JM, Redondo-García MM, Navarro-Madrid A, Guerra-Zaballos A (2016) Aplicaciones de las investigaciones sobre degradación medioambiental y sellado de suelos a la docencia de la geografía, facultad de Geografía e historia, Universidad Complutense de Madrid: 6–7
- Gitelson AA, Kaufman YJ, Stark R, Rundquist D (2002) Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing*. 80:76–87
- González LF, Montes GA, Puig E, Johnson S, Mengersen K, Gaston, KJ (2016) Unmanned aerial vehicles (UAVs) and artificial intelligence revolutionizing wildlife monitoring and conservation. *Sensors (Switzerland)*. 16(1). <https://doi.org/10.3390/s16010097>
- Hawksworth F, Wiens DG (1996) Dwarf Mistletoes: Biology, Pathology, and Systematics Washington, D. C.: United States Department of Agriculture/Forest Service
- Kaliardos B, Lyall B (2014) Human factors of unmanned aircraft system integration in the national airspace system In *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Valavanis, KP, Vachtsevanos, GJ, Eds; Springer Netherlands: Dordrecht, The Netherlands, 2014; pp 2135–2158
- Klosterman S, Richardson AD (2017) Observing spring and fall phenology in a deciduous forest with aerial drone imagery. *Sensors (Switzerland)*. 17(12), 1–17. <https://doi.org/10.3390/s17122852>
- Koh L, Wich SA (2012) Dawn of drone ecology: low-cost autonomous aerial vehicles for conservation. *Tropical Conservation Science*. 5(2):121–132 <http://hdlhandle.net/2440/84717>
- Laliberte AS, Rango A, Herrick JE, Fredrickson EL, Burkett L (2007) An object-based image analysis approach for determining fractional cover of senescent and green vegetation with digital plot photography. *Journal of Arid Environments*. 69, 1–14
- Lehmann JRK, Nieberding F, Prinz T, Knoth C (2015) Analysis of unmanned aerial system-based CIR images in forestry- A new perspective to monitor pest infestation levels. *Forests*. 6, 594–612
- Ludovisi R, Tauro F, Salvati R, Khoury S, Mugnozza Scarascia G, Harfouche A (2017) UAV-Based thermal imaging for high-throughput field phenotyping of black poplar response to drought. *Frontiers in Plant Science*. 8(September), 1–18. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01681>
- Marchal VD (2009) El Muérdago en la Ciudad de México. *Revista de divulgación electrónica Árbol-AMA, Asociación Mexicana de Arboricultura, México*, <http://www.tlalpan.gob.mx/convocatorias/Enfermedades-arbolado.pdf>
- McRoberts RE, Tomppo EO, Czaplewski RL (1992) Diseños de muestreo de las evaluaciones forestales nacionales. *Antología de conocimiento para la evaluación de los recursos forestales nacionales*. FAO, Roma, Italia 21 p
- Méndez MJT, Magaña TOS (2007) Evaluación Externa de los Apoyos de Reforestación, Obras y Prácticas de Conservación de Suelos y Sanidad Forestal, México.
- Mlambo R, Woodhouse IH, Gerard F, Anderson K (2017) Structure from Motion (SfM) photogrammetry with drone data: A low cost method for monitoring greenhouse gas emissions from forests in developing countries. *Forests*. 8, 68
- Navia J, Mondragon I, Patino D, Colorado J (2016) Multispectral mapping in agriculture: Terrain mosaic using an autonomous quadcopter UAV. *International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS*
- Pavelka K, Faltnyova M, Matouskova E, Sedina J (2015) Biodiversity, forest condition mapping and forest harvesting monitoring using UAV. *ACRS 2015—36th Asian Conference on Remote Sensing: Fostering Resilient Growth in Asia, Proceedings*.
- Perry JP (1991) *The pines of Mexico and Central America* Timber Press Portland, Oregon 231 p
- Ramírez-Chávez EJ, Cruz-García A, Lagunas-Pérez AG, Carreño-Reyes OE (2013) Uso de vehículos aéreos no tripulados para la caracterización del paisaje sumergido; Bahía Estacahuite, Universidad de Mar, Oaxaca

- Ramírez DJF, González AJL (2007) Modelización y mapeo de la distribución espacial del muérdago enano (*Arceuthobium* sp) en la ladera sur del Parque Nacional Nevado de Toluca *Revista de Geografía Agrícola* [en línea] 2007, (enero-junio) : [Fecha de consulta: 15 de agosto de 2017] Disponible en: <<http://www.redalyc.org/articuloa?id=75703803>>_ISSN 0186-4394
- Reinoso JF, Gonçalves JE, Pereira C, Bleninger T (2018) Cartography for civil engineering projects: Photogrammetry supported by unmanned aerial vehicles. *Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Civil Engineering*. 42 (1): 91-96.
- Richardson AD, Braswell BH, Hollinger DY, Jenkins JP, Ollinger SV (2009) Near-surface remote sensing of spatial and temporal variation in canopy phenology. *Ecological Applications*. 19: 1417-1428
- Rincón V, Molina A, Torres-León JL, Herazo A (2015) Perspectivas de la tecnología VANT en el cultivo de palma de aceite: monitorización del cultivo mediante imágenes aéreas de alta resolución. *Palmas*. 36(3), 25-41
- Rzedowski J (1978) *Vegetación de México*, Limusa México, 432 p
- Rzedowski J (1981) Principales comunidades vegetales En: Rzedowski, J y Rzedowski, G C DE (eds) *Flora fanerogámica del Valle de México*. Vol I CECOSA México, DF pp 47-54
- Rzedowski J (1998) Diversidad y orígenes de la flora fanerogámica de México, En: Ramamoorthy TP, Bye R, Lot A, Fa J (eds) *Diversidad biológica de México: orígenes y distribución* Instituto de Biología, UNAM, México, pp 129-145
- Saghri JA, Laghar MS, Boujarwah A, Tescher AG (1998) Spectral-signature-preserving compression of multispectral data. *Applications of digital image processing Conference No21, San Diego CA, ETATSUNIS (21/07/1998) 1998, 3460: 399-410*
- Salamí E, Barrado C, Pastor E (2014) UAV flight experiments applied to the remote sensing of vegetated areas. *Remote Sensing of Environment*. 6, 11051-11081
- Staley D (2017) *Remote Sensing and Assessment of Urban Forests with Unmanned Aerial Vehicles, City Trees*, pp 18-23
- Tang LN, Shao GF (2015) Drone remote sensing for forestry research and practices. *Journal of Forestry Research*. 26(4): 791-797
- Vilches A, Gil-Pérez D, Toscano JC, Macías O (2010) *Tecnociencia para la sostenibilidad*. [artículo en línea] OEI ISBN 978-84-7666-213-7 <http://www.oei.es/decada/accionphp?accion=003>
- Ojeda BW, Flores VJ, Unland WHK (2014) *Drones y sistemas de información geográfica en la ingeniería hidroagrícola*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Coordinación de Riego y Drenaje, México
- Wallace L, Lucieer A, Malenovsky Z, Turner D, Vopěnka P (2016) Assessment of forest structure using two UAV techniques: A comparison of airborne laser scanning and Structure from Motion (SfM) point clouds. *Forests*. 7, 62
- Wang BK, Xiang WN, Guo XL, Liu JJ (2012) Remote sensing of forestry studies. *Global Perspectives on Sustainable Forest Management*. 205-216. <https://doi.org/10.5772/32995>
- Watts AC, Ambrosia VG, Hinkley EA (2012) Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: classification and considerations of use. *Remote Sensing*. 4, 1671-1692
- Wulder MA, Hall RJ, Franklin SE (2005) Remote sensing and GIS in forestry. *Remote Sensing for GIS Managers*. 351-362. <https://doi.org/10.1007/s10040-006-0140-2>

5.3 Artículo 2. Uso de Vehículos aéreos no tripulados para la de detección del Nivel de infestación por plantas parásitas a nivel de copa en bosques de *Pinus hartwegii* del centro de México.

25/05/20 20:15

FS [16974] Submission Acknowledgement

Javier Madrigal <forestsystems@inia.es>

Lun 25/05/2020 08:10 PM

Para: Gabino Nava Bernal <gnavab@uaemex.mx>

Dear Gabino Nava Bernal,

Thank you for submitting the manuscript "Use of unmanned aerial vehicles for the diagnosis of parasitic plant infestation at the crown level in *Pinus hartwegii*" to Forest Systems. With the online journal management system that we are using, you will be able to track its progress through the editorial process by logging in to the journal web site:

Manuscript URL:

<https://revistas.inia.es/index.php/fs/author/submission/16974>

Username: egnavab

If you have any questions, please contact forestsystems@inia.es. Thank you for considering this journal as a venue for your work.

Javier Madrigal
Forest Systems

Forest Systems
(formerly Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales)
<http://www.inia.es/forestsystems>
Managing Editor: forestsystems@inia.es

Use of unmanned aerial vehicles for the diagnosis of parasitic plant infestation at the crown level in *Pinus hartwegii*

Luis A. León-Bañuelos^{1,2}, Angel R. Endara-Agramont¹, E. Gabino Nava-Bernal^{1*}, and William Gómez-Demetrio¹

¹Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales (ICAR), México.

²Tecnológico de Estudios Superiores de Valle de Bravo, Estado de México, México.

*Corresponding author: E. Gabino Nava-Bernal

*email: gnavab@uamex.edu.mx

Author contributions

Luis A. León-Bañuelos: Analysis of desktop information and first draft of the manuscript.

E. Gabino Nava-Bernal: Planning and discussion of the manuscript's organization.

Angel R. Endara Agramont: Planning of data collection in the field and selection of the analysis tools.

William Gómez-Demetrio: Analysis and discussion of the presentation of information in the document.

Conflicts of interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Financing

Support was provided by the National Council for Science and Technology (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología [CONACYT]) for the Management Program for the Nevado de Toluca Flora and Fauna Protection Area (No. 3674/2014E).

Abstract

Forest degradation has increased in recent years due to biotic, abiotic, and anthropogenic factors. Pests and parasitic plants are some of the main disturbance agents affecting forest resources. In temperate forests, the most frequent parasitic plants are from the genus *Loranthaceae spp.* Monitoring parasitic plants through traditional methods requires a large amount of time and human resources. Unmanned vehicles (UAVs) as remote sensing tools have increased in popularity in different regions, especially because they can offer perspectives unsurpassed by the satellite scale. In the present study, the presence of yellow dwarf mistletoe (*Arceuthobium globosum*) was identified using two information collection methods in order to estimate the level of infestation in a *Pinus hartwegii* forest. First, the traditional method (Hawksworth) was used to estimate the degree of infestation per individual tree. Second, a remote sensing method using unmanned aerial vehicles (UAVs) was used to capture information at the crown level. Then, the colorimetric decomposition method at the pixel level (CRPL) in conjunction with the k-nearest neighbors (KNN) supervised classification algorithm was used to identify the infested portions of trees. The result of the methods were compared by calculating the equivalency percentages of the pixels identified as infested per level of infestation. The methods coincided in detecting a high level of infestation yet were biased in detecting healthy trees and low levels of infestation. However, the remote sensing method using UAVs remains a viable alternative in the monitoring of mistletoe for its capacity to present an overall diagnosis of the level of infestation.

Keywords: Pattern recognition, CRPL algorithm, *Arceuthobium globosum*, remote sensing, KNN algorithm.

Introduction

Forest degradation has increased in recent years as a result of biotic and abiotic factors but mainly due to anthropogenic activities such as infrastructure development, wood extraction, and agricultural expansion (Lim *et al.*, 2017), consequently leading to a loss of biodiversity and ecosystem services (Bastin *et al.*, 2017). At the same time, this process has been characterized by an increase in tree mortality rates and decrease in tree growth (Dobbertin & Rigling, 2006), affecting the composition, structure, and function of forests (Dale *et al.*, 2001).

Pests and parasitic plants negatively affect the quality of forest resources. Climate change has favored their establishment and expansion (Allen *et al.*, 2010; Wingfield *et al.*, 2016), increasing their frequency and severity. In fact, pests and parasitic plants are estimated to have caused the loss of approximately 2000 million hectares of forested area at the worldwide level (Stanturf *et al.*, 2014b; Roy *et al.*, 2014).

One of the most frequent plant health problems in temperate forests is the parasitic plant mistletoe (*Loranthaceae* spp.), which is the pest with the greatest extension worldwide (Geils *et al.*, 2002; Villa, 2003). Due to its aggressiveness, it can cause the death of its host (López-de Buen *et al.*, 2002). For example, in the Nevado de Toluca Flora and Fauna Protection Area (NTFFPA), which has a *Pinus hartwegii* population of approximately 13000 ha (Rojas *et al.*, 2019), gradual fragmentation has occurred due to the increasing attack of pests and parasitic plants such as mistletoe (Endara *et al.*, 2013).

Three species of parasitic plants were identified in the NTFFPA: yellow dwarf mistletoe (YDM; *Arceuthobium globosum grandicaule*) and black dwarf mistletoe (BDM; *A. vaginatum vaginatum*), for which *P. hartwegii* is the main host, and to a lesser extent, sacred fir dwarf mistletoe (SDM; *Arceuthobium abietis-religiosae*). Cedillo (2017) reported that these parasitic plants affect 47% of the area of *P. hartwegii* forest: 2736 ha are affected by MEA and 2655 by MEN. The prior establishes between 3400 and 3800 masl and the second between 3100 and 4000 masl.

Monitoring and spatial studies have been carried out to analyze the behavior or phenology of parasitic plants in order to recommend prevention strategies or corrective

actions. These studies have included spatial analyses using distance indices (Ramírez-Dávila, 2009), Maxent (Cedillo, 2012), geostatistical methods (Aukema, 2004), or semivariograms (Ramírez-Dávila, 2010). Other studies have been based on in-field observation using the Hawksworth method (1977), which involves monitoring along field transects (Franco & Endara, 2010) or systematic field tours.

The monitoring of pests and parasitic plants can be costly, require large amounts of time, and be dangerous in areas with low accessibility (Sandino *et al.*, 2018). Given these limitations, one of the most utilized techniques for the monitoring and analysis of the spatial distribution of parasitic plants is remote sensing. This technique enables large amounts of spatial data to be easily and rapidly collected and to be complementarily inputted into geographic information systems (GISs) for spatial analysis (Reddy, 2007).

Other monitoring studies have focused on the analysis of satellite images with high spatial resolution (Wulder *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2012). However, these are not suitable for identifying parasitic plants at the canopy level (Barnoiaea & Iacubescu 2008). As a result, new technologies have been developed to surpass this limitation and other limitations related to the complex topography of forests, although these have mainly been applied to measure changes in forest cover (López-García *et al.*, 2017), dasonomic data (Puliti *et al.*, 2017; Guerra-Hernández *et al.*, 2017), forest health (Dash *et al.*, 2017; Tuominen *et al.*, 2009), fires (Ollero, 2006; Thamizhmathi & Usharani, 2014), or to monitor wild life (Allison *et al.*, 2016; Christie *et al.*, 2016).

One alternative for monitoring parasitic plants is the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) to obtain high-resolution spatial data and to identify the specific details or characteristics of individual trees. The use of UAVs has increased in different fields such as precision agriculture, geomorphology, and silviculture and in studies monitoring changes in plant cover or coastal ecosystems, for example (Singh & Frazier, 2018). This method is capable of providing a more local perspective and more detailed information than satellite images (Hall, 2016) and therefore represents a precise means of monitoring pest and parasitic plant infestation at the plot and individual level (Lehmann *et al.*, 2015).

Although UAVs have mostly been used for agricultural applications, this technology opens a new panorama for scientific research in the forest sector because it

can be used to strengthen, complement, or design methodologies for the diagnosis of parasitic plant infestations at the individual tree level. In the present study, UAVs were used to assess the degree of infestation of YDM at the forest crown level in a *P. hartwegii* forest in central Mexico. Images of trees were taken, and their pixels were classified into different infestation categories according to colorimetric and pattern recognition algorithms. Finally, to validate the method, the results were compared to those of the traditional Hawksworth method.

Materials and Methods

UAV platform

The UAV DJI Phantom 3 Standard was used as a remote sensing tool. It has a flight duration of 15 to 25 minutes and a camera integrated to a gimbal stabilization system that takes photographs of 4000×3000 pixels at a resolution of 16 megapixels. It is controlled from a remote control and the DJI GO mobile application developed by the manufacturer.

Study area

The study was carried out in the Nevado de Toluca Flora and Fauna Protection Area (NTFFPA), a mountainous region in central Mexico with an area of 53,590 ha (DOF, 2016). It is known as an aquifer recharge zone and for its natural resources. However, it is experiencing degradation due to anthropic activities and other biotic and abiotic factors (Allen *et al.*, 2010; Endara *et al.*, 2012). YDM is present in approximately 40% of the *P. hartwegii* area in NTFFPA (Figure 1), mainly on northern slopes (Cedillo, 2012; Ramírez-Dávila & Porcayo-Camargo, 2009).

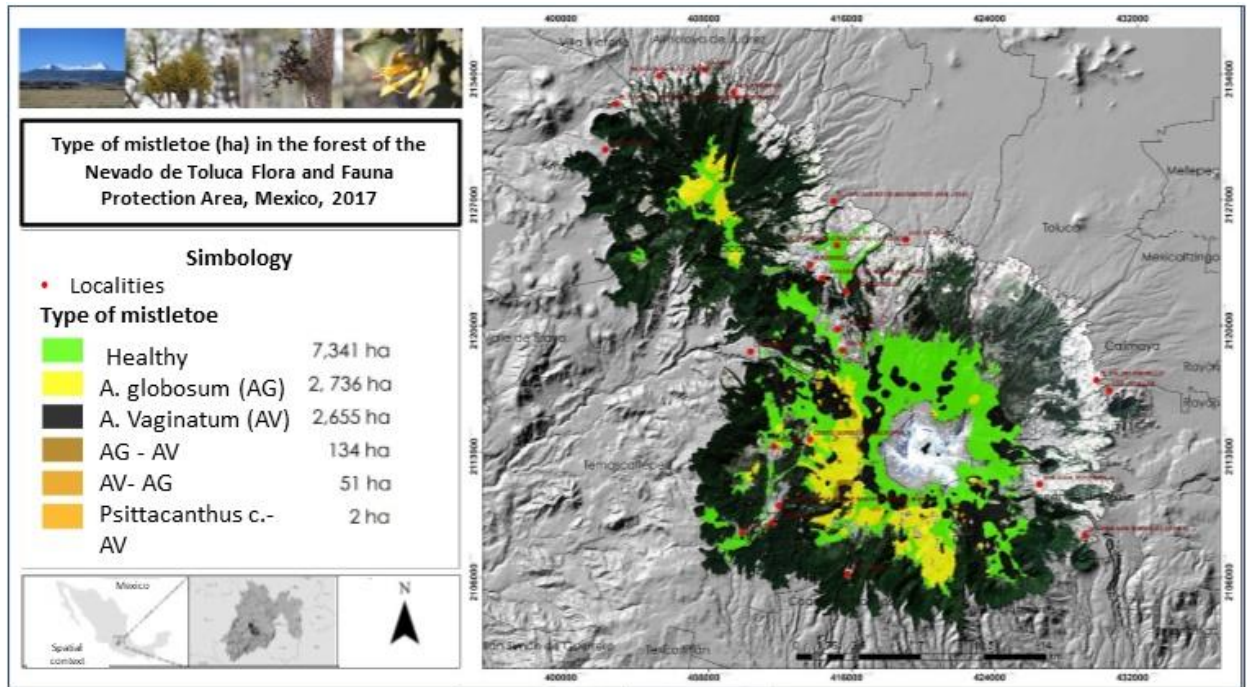


Fig. 1 Infestation by parasitic plants in the Nevado de Toluca Flora and Fauna Protection Area. Source: Cedillo (2017).

Traditional and remote sensing methods for identification of YDM infestation

To have a reference for comparison, two data collection methods were used to identify YDM infestation: the remote sensing method and the traditional method. The methods were divided into five phases, as shown in Table 1.

Table 1. Phases of the UAV and traditional methods for identification of YDM infestation

Phase	UAV method	Traditional method (Hawksworth)
1. Characterization	Definition of the colorimetric ranges of YDM and of <i>P. hartwegii</i> using the colorimetric ranges at the pixel level (CRPL) method (León Bañuelos <i>et al.</i> , 2019).	Selection of the type of sampling to be used in the study area (random, linear, stratified, variable, or systematic transects, etc.).
2. Planning	Plot selection and definition of topographic variables to create a	Marking of the sampling points and definition of the

	flight plan in the DroneDeploy software.	routes in GPS according to the selected type of sampling.
3. Data collection	Execution of the route defined in the flight plan and capture of images.	Field tour of plots by brigades to capture infestation data.
4. YDM identification	Creation of the orthomosaic for the application of the CRPL algorithm on canopy cover and identification of YDM in the regions obtained by the k-nearest neighbor algorithm.	Identification of infestation at the individual level in plots based on the Hawksworth scale.
5. Comparison of results	Calibration to define the percentage of YDM infestation on the Hawksworth scale. Results validated with respect to the data obtained in the field.	

Methodological design

Phase 1: Characterization

Traditional method. All individuals with a diameter at breast height (DBH) in a 2-ha plot of *P. hartwegii* with one of the greatest incidences of YDM were directly sampled around a central sampling point (19.1191, -99.82069) on the eastern slope of the NTFFPA.

UAV method. Photographs were captured by an UAV in October 2018. This period coincides with the drought season, so the vegetation has similar tonalities as YDM. The colorimetric ranges of both YDM and *P. hartwegii* were calibrated based on the CRPL method (León-Bañuelos *et al.*, 2019) considering random pixels from the canopy (Figure 2). All photographs were taken at a height of 45 to 50 meters from the take-off site at a sunlight intensity of 25,000 to 50,000 lux (Bunning & Moser, 1969).



Fig. 2. Extraction of pixels for calibration of colorimetric ranges.

The colorimetric ranges obtained for *P. hartwegii* indicate that the subpixel G determined the color to the greatest extent and was positively correlated with subpixels R and B, which determine the brightness of the tones. The ranges of values obtained for the pixels are shown in Table 2.

Table 2. Pixel ranges and separation between pixels GR and GB of *Pinus hartwegii*.

	R	G	B
Max	203	205	189
Min	72	83	30
G-R	0		
Min			
G-R	27		
Max	8		
G-B	79		
Min			
G-B			
Max			

Phase 2: Planning

Traditional method

In the method proposed by Hawksworth (1997), trees are segmented into three parts and assigned a score on a scale of 0 to 2: 0 = without presence of mistletoe, 1 = with presence of mistletoe, and 2 = abundance of mistletoe. As shown in Figure 3, the sum of the three thirds determines the level of infestation: 0 = healthy, 1–2 = low infestation, 3–4 = medium infestation, and 5–6 = high infestation.

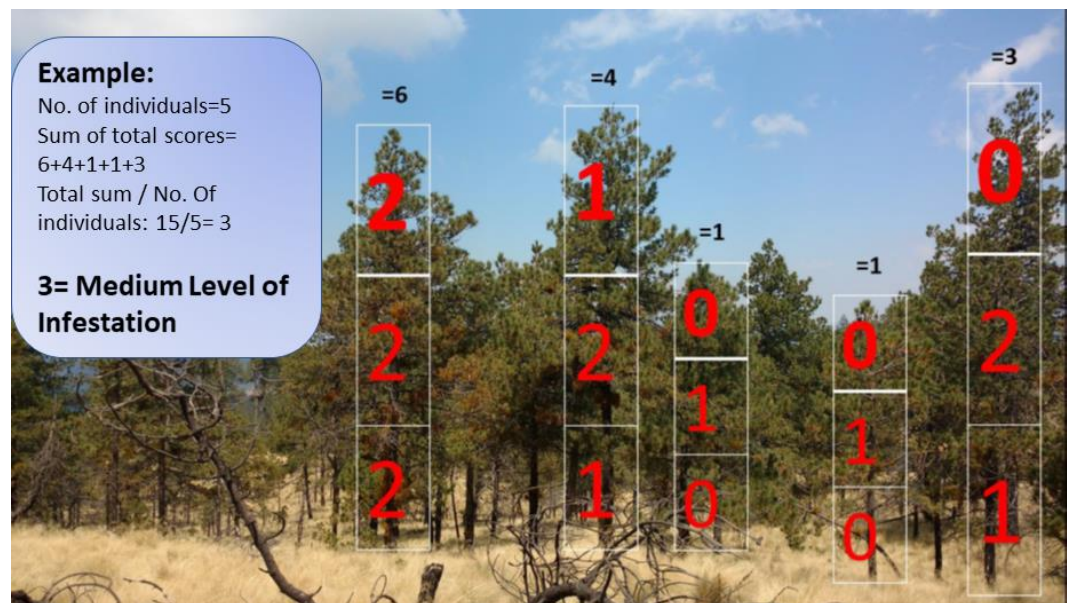


Fig. 3. Evaluation of *Pinus hartwegii* using the Hawksworth method. Source: Cedillo (2017)

UAV Method

The flight plan was developed in the software DroneDeploy. The height, flight area, and path of the tour are preprogrammed, as illustrated in Figure 4. To avoid collisions, the slope of the terrain was considered with respect to the maximum height of the flight, which was 45 m in the present case.



Fig. 4 Flight plan of the plot.

Phase 3: Data collection

Traditional data collection method

The plot was segmented into two subplots of 50×200 meters that were visited by two brigades of three individuals. The variables of each individual tree were recorded: height, location, health (Hawksworth), and DBH.

UAV data collection method

After flight execution, the programmed route in the software DroneDeploy is activated, and the remaining flight duration and progress are indicated in real time. Georeferenced photographs are captured at time lapses determined by the software to obtain the best overlap of images. In the present case, 239 images were obtained, as shown in Figure 5.

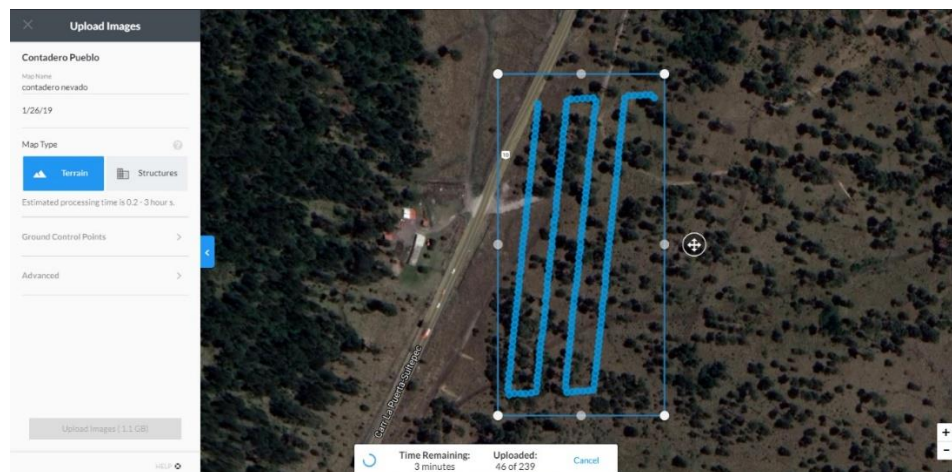


Fig. 5 Georeference for capture of the flight plan.

Results

Phase 4: YDM Identification

Identification of YDM by traditional method

The distribution of infestation by YDM was obtained for the crown (upper third of *P. hartwegii*). According to the field data, 69.4% of total individuals are infested, of which 33.4% had a low infestation and 36% a high infestation on the Hawksworth scale (Figure 6).



Fig. 6 Distribution of mistletoe infestation in the crown of *Pinus hartwegii* by infestation level

The distribution of individuals with a low, medium, or high degree of infestation is shown alongside healthy trees in Figure 6. These categories are dispersed heterogeneously across the sampling plot. However, small groupings are also observed in several regions mainly formed by infested trees (with either low or high infestation). In the following section, we explored whether a similar distribution pattern is found with the UAV method.

Identification of YDM by the UAV method

The Agisoft Photoscan Professional software was used to generate an orthomosaic from the image bank obtained by the UAV. Four ground control points (GCPs) were used to correct for the planimetry and altimetry of the images. The orthomosaic of the plot had a final spatial resolution of 3 cm per pixel (Figure 7).



Figure 7 Orthomosaic generated from the images taken during the flight plan.

The RGB colorimetric ranges obtained in phase 1 were used in the implementation of the CRPL algorithm to identify the range of pixels corresponding with the canopy cover. The invalid

pixels were rendered in grayscale, as shown in Figure 8.

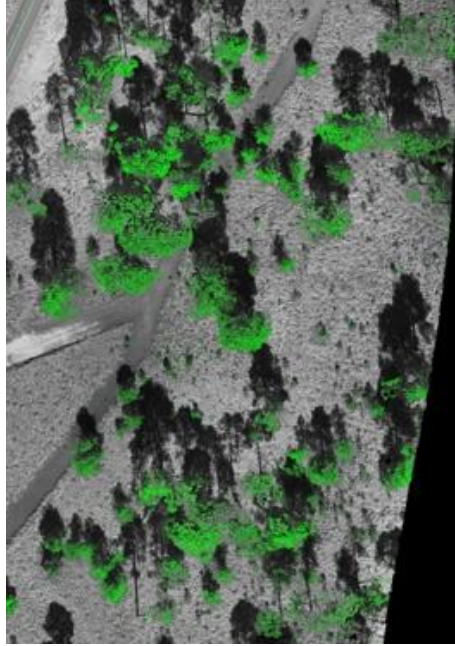


Fig. 8 Identification of canopy cover in the orthomosaic.

Identification of YDM infestation level by the CRPL algorithm

We used the Java programming language to generate the mass recognition pattern in the canopy with the k-nearest neighbors (KNN) algorithm supervised classification method according to the following formula:

$$\hat{f}(x) \leftarrow \operatorname{argmax}_{v \in V} \sum_{i=1}^k \delta(v, f(x_i))$$

Forty-five patterns were used to identify the regions corresponding with the canopy. Once the regions in the orthomosaic were located, the CRPL algorithm was executed to obtain the presence of YDM in each region.

To improve the identification of patterns in *P. hartwegii*, the grayscale portion of the processed orthomosaic was eliminated, leaving only the pixels established as the canopy. After executing the KNN classification algorithm, the regions that delimit the presence of the canopy were determined, as shown in Figure 9.

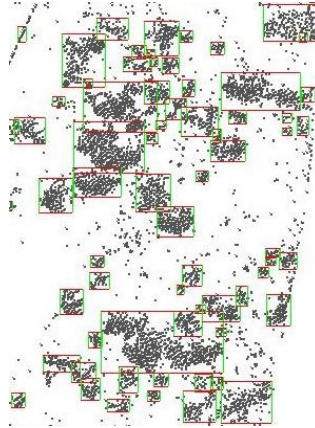


Fig. 9. Regions defined by the KNN method

Phase 5: Comparison of the results of the traditional and UAV method

In the field census, 125 individual trees were recorded. The KNN algorithm generated 59 regions, although these did not delimit individual trees. In some cases, overlapping canopies were generalized as a region and, in other cases, individuals were divided due to the presence of shade, mainly adult trees with broad canopies.

We classified the infestation level according to the percentage of YDM present in a region, as shown in Figure 10.

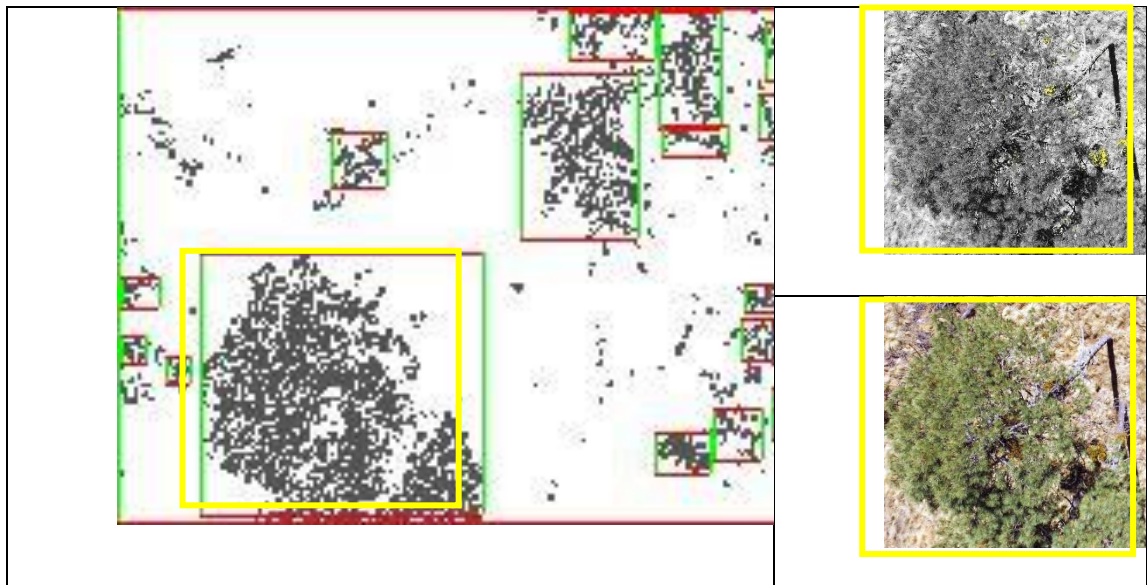


Fig. 10 Infestation of YDM in the region based on the UAV CRPL + KNN method

Given that each region is determined by the pixels identified as *P. hartwegii* canopy, the proportion of *P. hartwegii* pixels with respect to YDM pixels was calculated. The equivalence between the CRPL algorithm and Hawksworth scale was then determined in order to compare the results of each method, as shown in Table 3.

Table 3. Hawksworth equivalence scale with CRPL percentages per region

Infestation level	Hawksworth	CRPL algorithm
Healthy	0	0–2%
Low	1	3–5%
High	2	> 5%

At following, we applied the equivalence with respect to the Hawksworth scale. The results indicated that the infestation levels obtained by the two methods coincided in determining high levels of infestation. However, a difference of 8 to 10 percentage points was found for low levels of infestation and healthy regions, as shown in Table 4.

Table 4. Percentage infestation by YDM

Method	Individuals	Regions	Healthy	Low	High
Traditional	125		30.4%	33.6%	36%
(KNN + CRLP)		59	40%	25%	35%

The regions identified in the orthomosaic have some overlap due to the presence of broad canopies that cover some portions of small individuals: This could have caused the differences between the two methods in the percentages of healthy individuals and those with a low level of infestation. However, even in the evaluation using the traditional method, the loss of details in the upper portion of the crown occurs, which can be compensated for by the UAV method. In this context, the UAV method is still efficient in evaluating most of the crown cover.

Discussion

Remote sensing by UAV was performed in the present study to determine the level of YDM infestation in the crown of *P. hartwegii*. The colorimetric algorithm (CRPL) in conjunction with pattern recognition (KNN) were applied to differentiate pixels with infestation in the generated orthomosaics, which was facilitated by the high spatial resolution of the photographs taken by the UAV. As mentioned by Fritz and collaborators (2013), remote sensing by UAV enables individual trees and their canopy characteristics to be detected.

The height of trees along with the slope of high mountainous terrain is a key factor in the remote sensing by UAV method. Shing & Frazer (2018) mentioned that, to obtain a fine or ultrafine spatial resolution (< 5 cm per pixel), 80% of studies on land are carried out at heights of less than 50 meters. We found that photographs taken from heights between 40 and 50 m enabled a spatial resolution of < 5 cm per pixel to be obtained.

The phenological stages of YDM are also relevant given that its color may change between stages (Cibrián, 2007), resulting in different colorimetric characteristics compared to previous studies (León-Bañuelos *et al.*, 2019). A white correction of the orthomosaic was performed to facilitate the identification of YDM. The seasons during which the color of YDM differs from that of its host would favor the identification of YDM, most notably the flowering season or wet season; these seasons should be taken advantage of for identification purposes (Richardson *et al.*, 2009).

On the other hand, *P. hartwegii* is an evergreen pine (Krause & Raffa, 1996), so its color does not vary considerably with the changing seasons. Accordingly, the CRPL method is viable for the identification of canopy cover of *P. hartwegii* throughout the year. As long as elements may be differentiated from their environment based on their color, the CRPL method is a viable means of identification (León-Bañuelos *et al.*, 2019).

It is also important to note that photographs were captured sunny conditions. According to Nassi *et al.* (2015), these conditions enable better reflectivity and therefore improve the results, even though the CRPL method can be used to identify YDM under cloudy conditions.

Various illumination classifications and special pixels have been used to identify vegetation (Korpela *et al.*, 2011). However, we used all pixels in the orthomosaic to perform the classification of YDM and *P. hartwegii*. Likewise, Puttonen and collaborators (2010) indicated that the using the entire image is favorable for generating detailed classifications.

With respect to differences between the traditional Hawksworth method and remote sensing by the UAV method, the prior contemplates the entire tree, whereas the latter focuses on the canopy. However, identification by UAV is still acceptable because field data indicate that the 45% upper portion of the tree corresponds with the canopy in individuals with a DBH greater than 7.5. Also, considering that the UAV captures diverse angles during its flight path, it covers most of the tree. Finally, the traditional census results indicated that the first third (inferior trunk) of *P. hartwegii* had the least presence of YDM.

The use of classification methods such as neuronal networks, random forest, k-means, and spectral indices can improve the detection of study objects, as mentioned by Poblete-Echeverría and collaborators (2017). In the present case, the KNN method was viable for the classification of determined regions of *P. hartwegii*, limiting the region to which the CRPL algorithm for the identification of YDM would be applied and thereby potentially reducing the number of pixels identified as false positives in comparison to previous studies.

The regions generated through the use of the KNN algorithm, including the crown area and overlap of several *P. hartwegii* trees, were acceptable. In addition, the algorithm can identify subregions within overlapping regions, implying that processing should be carried out from smaller to larger regions to obtain reliable results for the total regions.

The comparison of the traditional method for identifying the YDM infestation level with the proposed remote sensing by UAV method validated the efficiency of UAVs. Although the traditional method is not complex, it requires a large amount of human and economic resources, and the topography of high mountain forests can present difficulties. Meanwhile, the UAV method is more complex in terms of the required algorithms and

calibration; however, once calibrated, it can simply be applied to any orthomosaic obtained for a study area.

However, variation did exist between the methods in the identification of healthy trees and those with a low level of infestation. These differences could be due to the lack of visibility of the UAV of individuals of smaller size due to shade from larger trees, which may be a limiting factor. On the other hand, in the upper portion of trees where the majority of YDM infestation is presented, the two methods coincide, although the UAV has the greatest visibility of the upper portion of trees regardless of the height.

The UAV remote sensing techniques on the visible RGB spectrum are an alternative in comparison with specialized sensors such as near-infrared (NIR), lidar, and multispectral sensors (Nevalainen *et al.*, 2017; Otsu *et al.*, 2018; Saarinen *et al.*, 2018). However, specialized sensors with a greater number of bands provide information that can improve the analysis of pests and parasitic plants in the forest sector.

Conclusions

The use of the present UAV remote sensing method to identify the level of YDM infestation is a feasible alternative for monitoring parasitic plants. Although it does not obtain the same level of detail as the traditional method relying on forest brigades, it does present a general panorama of infestation at the crown level that can be used to identify strategic sites for preventative and/or corrective action plans.

Also, the UAV method considerably reduces the time required for data collection. The flight plan lasted approximately 15 minutes and required two people, whereas the field work had a duration of three hours and required a brigade of six people.

Finally, the CRPL method was found to be adaptable in defining the colorimetric ranges for YDM in the crown of *P. hartwegii*, which vary throughout the year according to season. Therefore, the use of such algorithms alongside pattern recognition (KNN) is a viable technique for the identification of characteristics of aboveground vegetation. The adoption of such techniques is becoming increasingly popular given the evolution of UAV remote sensing technology.

References

Allen C.D., Macalady A.K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N., Vennetier M., Kitzberger T., Rigling A., Breshears D.d., Hogg E.h., Gonzalez P., Fensham R., Zhang Z., Castro J., Demidova N., Lim J.h., Allard G., Running S.w., Semerci A., Cobb N. 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*. 259, 660-684.

Allison R. S., Johnston J. M., Craig G., & Jennings S. 2016. Airborne optical and thermal remote sensing for wildfire detection and monitoring. *Sensors (Switzerland)*, 16(8). <https://doi.org/10.3390/s16081310>

Aukema J.E. 2004. Distribution and dispersal of desert mistletoe is scale dependently hierarchically nested. *Ecography* 27: 137–144. doi.org/10.1111/j.0906-7590.2004.03640.x.

Barnaia I., Iacobescu O. 2008. Using pixel and object based IKONOS image analysis for studying decay in silver fir stands. *Annals of Forest Research*, 52(1): 151-162

Bastin J., Berrahmouni N., Grainger A., Maniatis D., Mollicone D., *et al.* 2017. The extent of forest in dryland biomes. *Science* 358:635-638.

Bunning E., Moser I. 1969. Interference of moonlight with the photoperiodic measurement of time by plants, and their adaptive reaction. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 62 (4): 1018-1022

Cedillo A.M. 2012. Distribución espacial y análisis de la presencia de plagas forestales en el Parque Nacional Nevado de Toluca. Tesis de licenciatura Universidad Autónoma del Estado de México, México.

Christie K. S., Gilbert S. L., Brown C. L., Hatfield M., & Hanson L. 2016. Unmanned aircraft systems in wildlife research: Current and future applications of a transformative technology. *Frontiers in Ecology and the Environment*. <https://doi.org/10.1002/fee.1281>

Dale V.H., Joyce L.A., McNulty S., Neilson R.P., Ayres P., Flannigan M.D., *et al.* 2001. Climate change and forest disturbances. *BioScience*, 51: 723–734.

Dash J. P., Watt M. S., Pearse G. D., Heaphy M., & Dungey H. S. 2017. Assessing very high resolution UAV imagery for monitoring forest health during a simulated disease outbreak. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 131, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.07.007>

Dobbertin M., Rigling A. 2006. Pine mistletoe (*Viscum album ssp austriacum*) contributes to Scots pine (*Pinus sylvestris*) mortality in the Rhone valley of Switzerland. *Forest Pathology*, 36:309-32

DOF, 2016. Acuerdo por el que se da a conocer el Resumen del Programa de Manejo del Área Natural Protegida con categoría de Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Endara A., Franco S., Nava G., Valdez J.I., Fredericksen T. 2012. Effect of Human Disturbance on the Structure and Regeneration of Forests in the Nevado de Toluca National Park. Mexico, *Journal of Forestry Research*, Vol. 1, No. 23, pp. 39-44.

Endara A.A.R., Calderón C.R., Nava B.G., Franco M.S. 2013. Analysis of fragmentation processes in high-mountain forests of the centre of Mexico. *American Journal of Plant Sciences* 4(03): 697-704.

Endara-Agramont A.R., Cedillo-Alonso M. y Nava-Bernal E.G. 2014. Actualización del mapa de plagas y enfermedades forestales del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca. México: Universidad Autónoma del Estado de México. En prensa.

FAO. 2010. Salud y Vitalidad de los Bosques. FRA 2010, <http://www.fao.org/3/a0400s/a0400s05.pdf> consultado 20 de febrero de 2019

Feng Q., Liu J., & Gong J. 2015. Urban flood mapping based on unmanned aerial vehicle remote sensing and random forest classifier-A case of yuyao, China. *Water (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/w7041437>

Franco M.S., Endara A.A.R., Regil G.H.H. y Nava-Dotor, A. 2010. Estudio fitosanitario forestal del parque nacional nevado de Toluca. México: CONANP.

Fritz A., Kattenborn T., Koch B. 2013 Uav-based photogrammetric point clouds—tree STEM mapping in open stands in comparison to terrestrial laser scanner point clouds. *ISPRS Arch* 41(W2):141–146

Geils B.W., Cibrián J.T., Moody B. 2002. Mistletoes of North American Conifers. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-98. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 123 p.

Guerra-Hernández J., González-Ferreiro E., Monleón V. J., Faias S. P., Tomé M., & Díaz-Varela R. A. 2017. Use of Multi-Temporal UAV-Derived Imagery for Estimating Individual Tree Growth in *Pinus pinea* Stands. *Forests*. <https://doi.org/10.3390/f8080300>

Hawksworth, F. G. 1977. The 6- class dwarf mistletoe rating system. USDA. Gen. Tec. Rep. RM-48. Fort Collins, CO. USA. 6 p.

Ramírez-Dávila J.F., Porcayo-Camargo E. 2009. Estudio de la distribución espacial del muérdago enano (*Arceuthobium* sp.) en el Nevado de Toluca México, utilizando el Método del SADIE, México, Madera y bosques, pp 93-112.

Koh I., Wich S.A. 2012. Dawn of drone ecology: low-cost autonomous aerial vehicles for conservation. *Tropical conservation science*, 5(2):121-132 <http://hdlhandle.net/2440/84717>

Korpela I., Heikkinen V., Honkavaara E., Rohrbach F., Tokola T. 2011. Variation and directional anisotropy of reflectance at the crown scale—Implications for tree species classification in digital aerial images. *Remote Sens. Environ.* 115, 2062–2074.

Krause S., & Raffa K. 1996. Differential growth and recovery rates following defoliation in related deciduous and evergreen trees. *Trees - Structure and Function*, 10(5), 308–316.

Lehmann J.R.K., Nieberding F., Prinz T., Knoth C. (2015) Analysis of Unmanned Aerial System-Based CIR Images in Forestry- A New Perspective to Monitor Pest Infestation Levels. *Forests*, 6, 594-612

Lim C. L., Prescott G. W., De Alban J. D. T., Ziegler A. D., & Webb E. L. 2017. Untangling the proximate causes and underlying drivers of deforestation and forest degradation in Myanmar. *Conservation Biology*, 31(6), 1362–1372. <https://doi.org/10.1111/cobi.12984>

López García J., Prado Molina J., Manzo Delgado L., & Peralta Higuera A. 2016. Monitoring changes of forest canopy density in a temperate forest using high-resolution aerial digital photography. *Investigaciones Geográficas*, (90), 59–74. <https://doi.org/10.14350/rig.47360>

López-de Buen L., J.F. Ornelas y J.G. García-Franco. 2002. Mistletoe infection of trees located at fragmented forest edges in the cloud forest of Central Veracruz, Mexico. *Forest Ecology and Management* 164:293-302.

Moore B. y Allard G. 2008. Climate change impacts on forest health. *Forest Health and Biosecurity*, Working Paper FBS/34E. Roma, FAO.

Ollero A., Martínez-de-Dios, J. R., & Merino, L. 2006. Unmanned aerial vehicles as tools for forest-fire fighting. *Forest Ecology and Management*, 234, S263. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.08.292>

Otsu K., Pla M., Vayreda J., Brotons L. 2018. Calibrating the Severity of Forest Defoliation by Pine Processionary Moth with Landsat and UAV Imagery. *Sensors*, 18, 3278

Poblete-Echeverría C., Olmedo G. F., Ingram B., & Bardeen M. 2017. Detection and segmentation of vine canopy in ultra-high spatial resolution RGB imagery obtained from Unmanned Aerial Vehicle (UAV): A case study in a commercial vineyard. *Remote Sensing*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/rs9030268>

Puliti S., Saarela S., Gobakken T., Ståhl G., & Næsset E. 2017. Combining UAV and Sentinel-2 auxiliary data for forest growing stock volume estimation through hierarchical model-based inference. *Remote Sensing of Environment*, (October), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.10.007>

Puttonen E., Litkey P., Hyypä J. 2010. Individual tree species classification by illuminated-shaded area separation. *Remote Sens.* 2, 19–35.

Ramírez-Dávila J. F., & Porcayo-Camargo E. 2010. Estudio comparativo de la distribución espacial del muérdago enano (*Arceuthobium* sp.) en la ladera norte del Parque Nacional Nevado de Toluca, México. *Bosque (Valdivia)*, 31(1), 28-38.

Reddy S. 2007. Remote Sensing and Gis Applications in Biodiversity Studies, (January 2010), 1464–1468. <https://doi.org/10.1081/E-ESS-120014318>

Rossi F. C., Fritz A., & Becker G. 2018. Combining satellite and UAV imagery to delineate forest cover and basal area after mixed-severity fires. *Sustainability (Switzerland)*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/su10072227>

Roy B. A., Alexander H. M., Davidson J., Campbell F. T., Burdon J. J., Sniezko R., *et al.* 2014. Increasing forest loss worldwide from invasive pests requires new trade regulations. *Front. Ecol. Environ.* 12, 457–465. [10.1890/130240](https://doi.org/10.1890/130240)

Safonova A., Tabik S., Alcaraz-Segura D., Rubtsov A., Maglinets Y., Herrera, F. 2019. Detection of Fir Trees (*Abies sibirica*) Damaged by the Bark Beetle in Unmanned Aerial Vehicle Images with Deep Learning. *Remote Sens*, 11, 643.

Saghri J.A., Laghar M.S., Boujarwah A., Tescher A.G. 1998. Spectral-signature-preserving compression of multispectral data. Applications of digital image processing Conference No21, San Diego CA, ETATSUNIS (21/07/1998) 1998, 3460: 399-410

Sandino J., Pegg G., Gonzalez F., & Smith G. 2018. Aerial mapping of forests affected by pathogens using UAVs, hyperspectral sensors, and artificial intelligence. *Sensors (Switzerland)*, 18(4), 1–17. <https://doi.org/10.3390/s18040944>

Singh K. K., & Frazier A. E. 2018. A meta-analysis and review of unmanned aircraft system (UAS) imagery for terrestrial applications. *International Journal of Remote Sensing*, 00(00), 1–21. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1420941>

Stanturf J.A., B.J. Palik, M.I. Williams, R.K. Dumroese, P. Madsen. 2014b. Forest restoration paradigms. *Journal of Sustainable Forestry* 33:161–194.

Thamizhmathi M., & Usharani S. 2014. A survey of forest fire detection techniques. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and*

Applications, 2(12), 31–37. Retrieved from
http://ijarcsa.org/Dec_2014/IJARCSA/1212140c06.pdf

Tuominen J., Lipping T., Kuosmanen V., & Haapane R. 2009. Remote Sensing of Forest Health. *Geoscience and Remote Sensing*, (June 2014).
<https://doi.org/10.5772/8283>

Van der Werf G.R., Morton D.C., DeFries R.S., Olivier J.G., Kasibhatla P.S., Jackson, R.B., Collatz G.J., Randerson, J.T. 2009. Werf CO2 emissions from forest loss. *Nat. Geosci.* Pp. 737–738.

Villa C.J. 2003. Importante contribución a la salud de ecosistemas forestales. *Forestal XXI Noviembre-Diciembre*. Pp. 27-28.

Wang K., Xiang W. N., Guo X., Liu J. 2012. Remote Sensing of Forestry Studies. *Global Perspectives on Sustainable Forest Management*, 205–216.
<https://doi.org/10.5772/32995>

Wingfield M. J., Garnas J. R., Hajek A., Hurley B. P., de Beer Z. W., Taerum S. J. 2016. Novel and co-evolved associations between insects and microorganisms as drivers of forest pestilence. *Biol. Invasions* 18, 1045–1056. 10.1007/s10530-016-1084-7

Wulder M. A., Hall R. J., Franklin S.E. 2005. Remote sensing and GIS in forestry. *Remote Sensing for GIS Managers*, 351–362.
<https://doi.org/10.1007/s10040-006-0140-2>

Wulder, M., and S. Franklin, eds. 2003. *Remote sensing of forest environments: Concepts and case studies*. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers.

An aerial photograph of a forested hillside. The trees are dense and green, with some taller, thinner trees scattered throughout. The ground is covered in grass and small plants. A green rounded rectangle is overlaid on the bottom right of the image, containing the text 'Capítulo VI' and 'Discusión' in white, bold, serif font.

Capítulo VI

Discusión

La mitigación y adaptación al cambio climático, la lucha contra la contaminación, la preservación de hábitats naturales y el mantenimiento de un elevado nivel de biodiversidad exigen acciones globales por parte de los tomadores de decisiones (DOF, 2016). Díaz y colaboradores (2006) indican que los cambios en la biodiversidad repercuten directa o indirectamente sobre la sociedad, ya que comprometen el funcionamiento de los ecosistemas y su capacidad de generar servicios esenciales.

El crecimiento poblacional y la continua urbanización han aumentado la presión sobre los ecosistemas, esto afecta a numerosos servicios ecosistémicos, que están siendo degradados o usados de maneras insustentables (Varis, 1999). El desafío que crean estas problemáticas consiste en generar estrategias reparar el daño ocasionado a los ecosistemas y cómo prevenirlo o mitigarlo en adelante, en un escenario de cambio (Puig, 2010).

Para lograr la mitigación es necesaria la intervención humana para reducir las fuentes y mejorar los sumideros de gases de efecto invernadero (CMNUCC, 2019). Berry (2008) propone que se deben disminuir las fuentes de emisión de esos gases y promocionando el aumento de sumideros de carbono mediante el uso responsable del suelo y el manejo sostenible de paisajes (Berry 2008).

Para afrontar este desafío se toma como base el desarrollo sostenible que tiene como objetivo un cambio gradual y direccional que no destruya los recursos de las generaciones presentes y futuras, de tal forma que se tenga una adaptación a los cambios. De tal manera que se logre la adaptación mediante los ajustes que realizan los sistemas naturales o humanos en respuesta a los estímulos climáticos o a sus efectos para moderar el daño y aprovechar las oportunidades que signifiquen beneficios para los ecosistemas (CMNUCC, 2019).

Parra y Cadena (2010) mencionan que la inclusión de diferentes disciplinas para el análisis de metodologías en la resolución de problemas ambientales debe complementar las metodologías tradicionales para el control del desarrollo tecnológico y la inclusión de los aspectos ambientales desde la perspectiva de la

ciencia, la tecnología y la sociedad. Derivado de esto, surge la necesidad de utilizar tecnologías enfocadas al desarrollo sostenible para resolver problemas como la pobreza, exclusión, desarrollo económico y social, cambio climático, entre otros, asociándolos con el uso racional de los recursos naturales (Ziemba, 2017).

Ejemplo de ello son las TIC que están incrementando su interacción en las diferentes estrategias ambientales. Su capacidad de implementación y adaptabilidad en diferentes áreas han permitido desarrollar y potenciar los sensores y herramientas para la captura de información (Pascuas et al., 2016).

El aprovechamiento de las TIC es tomado en cuenta en los 17 objetivos de desarrollo sostenible de la ONU (2015), como un pilar fundamental para fortalecer las estrategias de apoyo en cada uno. Existe, por tanto, la necesidad de dirigir los esfuerzos de la investigación e innovación hacia el logro de desarrollos tecnocientíficos que favorezcan a un desarrollo sostenible.

Este Punto de vista que es compartido por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) y la Global e-Sustainability Initiative (GeSI), que coinciden en que las TIC y sus soluciones digitales asociadas podrían contribuir de manera directa a cubrir más de la mitad de las 169 metas recogidas en los ODS, ya que es posible contribuir a un futuro sostenible a través de una transformación responsable basada en la colaboración de compañías y organizaciones de TIC alrededor del mundo (GeSI, 2016; ITU, 2018).

Las TIC han combinado los desarrollos tecnológicos en áreas de software, comunicación satelital, sistemas de información geográfica y modelización de datos. Varios de estos instrumentos constituyen la base en la automatización de procesos productivos, la integración y la coordinación de funciones y la simplificación de tareas en los sectores mineros, petroleros, agropecuarios y forestales. Moguillansky (2005) resalta el impacto de las TIC en el sector forestal para el logro de la eficiencia productiva de las empresas y además como una

herramienta fundamental en el monitoreo de los ecosistemas forestales, control de seguridad en los bosques y su manejo sustentable.

Los impactos ambientales y económicos de las plagas y plantas parásitas en los bosques naturales y de plantaciones han sido históricamente catastróficos. Las acciones de vigilancia y control son desafiantes porque son costosas, requieren mucho tiempo y son peligrosas en áreas remotas. Los períodos prolongados de prueba y observación de las pruebas basadas en el área de estudio mediante brigadas tienen limitaciones para verificar la rápida proliferación de patógenos y las tasas de deterioro en los huéspedes (Sandino et al., 2018).

Los enfoques recientes de teledetección han ofrecido encuestas rápidas, a gran escala y asequibles, así como indicadores adicionales que pueden complementar las pruebas en el terreno tomando en cuenta las capacidades de detección remota para detectar y segmentar el deterioro por patógenos en los bosques. Los métodos modernos de vigilancia para mapear hospederos vulnerables y afectados por patógenos exóticos pueden clasificarse, de acuerdo con Lawley y colaboradores (2016), en métodos de teledetección y basados en el sitio.

Los enfoques basados en el sitio son comúnmente regiones pequeñas que se utilizan para recopilar indicadores de la condición de la vegetación. Sin embargo, estos métodos requieren una gran experiencia y tiempo para realizar experimentos, recopilación de datos y validación (Ostendorf, 2011). Un ejemplo claro se es el método tradicional de Hawksworth y Wiens (1996), el cual se realiza por sitios para identificar el nivel de infestación por MEA en bosque de *Pinus hartwegii*, que aunado a las complicaciones logísticas también se agregan las complicaciones topográficas de los bosques de montaña.

El papel de los métodos de teledetección para evaluar y cuantificar los impactos de los patógenos ha aumentado exponencialmente (Lausch, 2016). Los enfoques estándar comprenden el uso de sensores espectrales y de imagen a través de tecnología satelital y tripulada. Sin embargo, estos métodos se centran en la cuantificación y distribución, entre otras propiedades físicas de las especies. Los

estudios satelitales y de aeronaves tripuladas han tenido limitaciones con respecto a los costos operativos y condiciones climáticas desfavorables (por ejemplo, nubosidad y vientos peligrosos) (Salami et al., 2014).

En contraste, el desarrollo continuo de diseños de vehículos aéreos no tripulados (UAV) son herramientas discretas, precisas y versátiles. Muchos estudios han posicionado los UAV para la recolección de imágenes aéreas en aplicaciones como el mapeo de malezas, enfermedades, plagas y monitoreo de vida silvestre (Venegas et al., 2018).

En nuestro caso se realizó el estudio de un método de identificación de la planta parásita MEA, el cual exploró la viabilidad de las imágenes aéreas de alta resolución capturadas por UAV para la obtención de presencia del MEA en bosques de *Pinus hartwegii*; El método tradicional de Hawksworth es el más utilizado en la identificación de MEA, sin embargo, este proceso necesita de un tiempo considerable para su aplicación en bosque.

Aunque el método de Hawksworth incluye la totalidad del pino, la implementación de identificación por UAV es aceptable ya que, de acuerdo con los datos recopilados en campo, indican que el 45% superior del pino corresponde a dosel en individuos con DAP mayor a 7.5 y, tomando en consideración que el UAV captura diversos ángulos del árbol durante el recorrido del plan de vuelo y se cubre la mayoría, además de que los resultados del censo indican que el primer tercio (inferior o fuste) del *Pinus hartwegii* es el que tiene menor presencia de MEA.

Las técnicas de colorimetría basadas en píxeles son limitadas en estudios de bosques, según Lehmann y colaboradores (2015) mencionan que la variabilidad y los parámetros de textura de las imágenes afectados por infrarrojo producen mejores resultados que análisis basado en píxeles; sin embargo la correlación altamente significativa que muestran los subpíxeles del formato RGB de la coloración del MEA, permitieron la identificación de un patrón de relación directa con la fenología para aprovechar la distintiva coloración que lo diferencia de la

tonalidad del *Pinus hartwegii*. Esto resalta que es viable utilizar la información generada por el espectro visible RGB para identificar plantas parasitas, siempre y cuando se identifique un patrón colorimétrico que lo diferencie de los demás elementos del entorno.

Como base para obtener el nivel de infestación de una parcela, obtuvimos que se puede distinguir el MEA a partir de su coloración acorde a la etapa fenológica en la que se encuentre, estas características se pueden identificar implementando métodos de descomposición colorimétricos programados a medida y debido a la alta resolución de las imágenes adquiridas con el UAV (< 10 cm por pixel), que en comparación con los estudios de imágenes de satélite que implementan resolución espacial gruesa y no obtienen detalles del dosel.

Aplicamos un método basado en teledetección con UAV para obtener el nivel de infestación de MEA en copa del *Pinus hartwegii*, el cual conjunta la aplicación del algoritmo colorimétrico (CRPL) y el reconocimiento de patrones (KNN) para diferenciar a la planta parásita de su hospedero, lo que es posible por la alta resolución espacial obtenida por el UAV. Tal como menciona Fritz y colaboradores (2013), la teledetección con UAV permite detectar árboles individuales y sus detalles en el dosel.

Poblete-Echeverría y colaboradores (2017) mencionan que la implementación de métodos de clasificación (redes neuronales, Random Forest, K-means e índices espectrales) mejoran la detección del objeto de estudio; en este caso el método KNN resultó viable para la clasificación de las regiones determinadas como *Pinus hartwegii*, lo cual permitió limitar las regiones de aplicación del algoritmo CRPL para la identificación de MEA, logrando disminuir los píxeles identificados como falsos positivos en comparación con estudios previos.

La definición de regiones generadas mediante el algoritmo KNN son aceptables ya que determina la superficie de copa incluyendo los traslapes de varios árboles y además puede generar subregiones dentro de las regiones con traslapes, esto

implica que el procesamiento de las regiones se debe ejecutar de menor a mayor tamaño para obtener resultados fiables de las regiones totales.

La comparativa del método tradicional para la identificación del nivel de infestación de MEA con el método propuesto de teledetección con UAV validó la eficiencia en las diferentes fases que se desarrollan con el algoritmo KNN. Aunque el proceso tradicional no es tan complejo, requiere de una gran cantidad de recursos humanos y económicos, además de que se enfrenta a las dificultades que presenta la topografía de los bosques de alta montaña. Por su parte, el método con UAV presenta complejidad en los algoritmos y calibración que se realiza al inicio del estudio, sin embargo, una vez calibrado, sólo se aplica sobre los ortomosaicos obtenidos del área de estudio.

Las técnicas de teledetección con UAV en espectro visible RGB son una alternativa en comparación con sensores especializados como el NIR, lidar y multiespectral (Nevalainen *et al.*, 2017; Otsu *et al.*, 2018; Saarinen *et al.*, 2018); sin embargo, los sensores especializados con mayor número de bandas brindan información que puede mejorar los análisis de plagas y plantas parásitas para estudios futuros en el sector forestal.

Capítulo VII

Conclusiones

En este estudio concluimos que las TIC son un complemento que se puede aplicar en los problemas ambientales; específicamente, el sector forestal tiene una gran área de oportunidades que posibilitan crear propuestas para mejorar o complementar los análisis que se realizan con métodos tradicionales.

Las herramientas de análisis han evolucionado para mejorar la precisión de la información que se requiere, aun se tienen dificultades en la obtención de información en tiempo real, siendo este factor importante para la toma de decisiones. Las TIC han evolucionado exponencialmente en los últimos años, de tal forma que es posible adquirir herramientas con costos relativamente económicos que posibilitan la obtención de información precisa.

La implementación de herramientas de teledetección son un ejemplo que demuestra el potencial de análisis en el monitoreo en tiempo real, esto es de vital importancia para el análisis detallado de los bosques de alta montaña, ya que, por las condiciones topográficas y climáticas que presentan, en ocasiones dificultan la recopilación de información, ya sea con brigadas o mediante imágenes satelitales.

El uso de UAV como herramienta de teledetección brinda alternativas en el monitoreo de los bosques y sus aplicaciones se han incrementado en los últimos 5 años; uno de los ámbitos que resalta es el análisis de plagas y plantas parásitas que son los principales agentes de deterioro de bosques templados. En nuestro caso fue viable la identificación de la planta parásita MEA con las imágenes de UAV, procesadas por algoritmos de colorimetría RGB y el algoritmo de clasificación supervisada KNN.

Una limitante durante el trabajo de campo o calibración fue que MEA no tiene un patrón de esparcimiento, por lo que dificultó las labores de identificación en los bosques de alta montaña y, con el método que aplicamos, fue posible identificarlo para calcular el nivel de infestación a nivel de copa en bosque de *Pinus Hartwegii*.

Es importante considerar que los resultados que se obtienen con los métodos colorimétricos RGB son complementos que apoyan a los métodos tradicionales de tal manera que se direccionen los recursos y esfuerzos en lugares estratégicos, ya que la identificación del UAV no cubre la totalidad del Pinus hartwegii y, por lo tanto, se pierden detalles, principalmente de la parte baja.

Los algoritmos de reconocimiento de patrones y clasificación supervisada son herramientas que mejoran los resultados en los mosaicos obtenidos por el UAV; por ello, es necesario complementar y fortalecer estas técnicas con diferentes algoritmos para mejorar la confiabilidad de los resultados. Los análisis RGB son una alternativa económica y, gracias a las condiciones colorimétricas que presentan los bosques de alta montaña y el MEA, fue posible diferenciarlo en el espectro visible, por tanto, el método es viable siempre que se tenga una diferencia en los rangos colorimétricos de los objetos de estudio; en caso contrario, se deberán utilizar sensores de captura con diferentes espectros visibles. De igual forma los UAV siguen siendo una alternativa útil para la captura de imágenes con diferentes sensores.

Las TIC en general son un gran apoyo para la sociedad en general y es posible dirigir las a cualquier ámbito; su constante evolución da opciones para poder implementar estrategias tecnológicas que en algunos casos es imposible por los altos costos. La sinergia que ha tenido la investigación de problemas ambientales, en conjunto con las TIC, fortalecen y complementan las técnicas que se aplican comúnmente para generar resultados que permitan la generación de planes de acción que mitiguen la degradación de los recursos naturales.

BIBLIOGRAFÍA

- Agüera, F., Carvajal, F., & Pérez, M. (2011). Measuring sunflower nitrogen status from an unmanned aerial vehicle B5:B14based system and an on the ground device. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci*, 38, pp 33-37.
- Alonso Pérez M.A., (2009). *Espacios de Color RGB, HSI y sus Generalizaciones a n-Dimensiones*. INAOE, Puebla, México.
- Anderson, K., and K. J. Gaston. (2013). "Lightweight Unmanned Aerial Vehicles Will Revolutionize Spatial Ecology." *Frontiers in Ecology and the Environment* 11 (3): 138–146. doi:10.1890/120150.
- Arce, A. and Long, N. (1992), *Battlefields of knowledge: the interlocking of theory and practice in social research and development*, Routledge, London, chapter The dynamic of knowledge: Interfaces between bureaucrats and peasants, pp. 211–246.
- Arrighi, G. (2001). *Caos y orden en el sistema-mundo moderno*. Madrid: Akal.
- Arroyo, L. A., Pascual, C. y Manzanera, J. A. (2008): Fire models and methods to map fuel types: The role of remote sensing. *Forest Ecology and Management*(2008) 256 1239-1252.
- Asensio, J.L., Pérez, F, Moran P. (2008). UAVs beneficios y límites. *I.A.S.S.* p. 5.
- Askew, S. E., Shamoun, S. F., & van der Kamp, B. J. (2011). Assessment of *Colletotrichum gloeosporioides* as a biological control agent for management of hemlock dwarf mistletoe (*Arceuthobium tsugense*). *Forest Pathology*, 41(6), 444-452. doi: 10.1111/j.1439-0329.2010.00698
- Austin, R., (2010). "Unmanned aircraft systems: UAVs design, development and deployment". Chichester: Wiley, 332 p., ISBN 978-0-470-05819-0
- Bárcena, A. (2012). "Terra": "CEPAL: las TIC son esenciales para impulsar cambios de patrones de producción". Disponible en: <http://noticias.terra.com.mx/mundo/cepal-las-tic-son-esenciales-para-impulsar-cambios-depatrones-de-produccion,1c2bfec13298a310VgnCLD2000000dc6eb0aRCRD.html>
- Barnoiaea I, Iacobescu O (2008) Using pixel and object based IKONOS image analysis for studying decay in silver fir stands. *Annals of Forest Research*, 52(1): 151-162
- Beaman, J. H. (1962). The timberlines of Iztaccíhuatl and Popocatepetl, Mexico. *Ecology*, 43, 377–385. doi:10.2307/1933367

- Bermúdez, L. (2018). Efecto de la extracción forestal sobre la estructura y regeneración del bosque de *Pinus hartwegii* en el Nevado de Toluca. ICAR, UAEMex.
- Berry, P. 2008. Synthesis of interactions between mitigation, adaptation and biodiversity. In: Berry, P; Paterson, J; Cabeza, M; Dubuis, A; Guisan, A; Jäätelä, L; Kühn, I; Midgley, G; Musche, M; Piper, J; Wilson, E. (Eds.). Mitigation and adaptation measures and their impacts on biodiversity. University of Oxford. p. 300-320.
- Bognanni Fabian (2010), La teledetección aplicada al estudio del pasado a una escala inter-regional. Revista Española de Antropología Americana 2010, vol. 40, núm. 2, 77-93
- Borraz, F. (2012). Las tecnologías de la información y el cambio climático en los países en desarrollo. Ensayos de Economía, 22(41), 35-64.
- Braier, G., Esper, N., & Corinaldesi, L. (2004). Estudio de tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina al año 2020: Informe Nacional Argentina (No. 333.75/B814). FAO.
- Bruijnzeel, L.A. (2004). Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? Agriculture, Ecosystems and Environment 104: 185 – 228.
- Bunge, M. (1975), Teoría y realidad, Barcelona.
- Bunge, M. (1980), Epistemología. Ciencia de la ciencia., Barcelona.
- Butt, N., Price, M (eds), (2000). Mountain people, forests and trees: strategies for balancing local management and outside interests. Synthesis of an electronic conference of the Mountain Forum, April 12-May 14, 1999. The Mountain Institute and the Mountain Forum, Harrisonburg, 56pp.
- Cabero, J. (2001): Tecnología educativa. Diseño y utilización de medios en la enseñanza, pp 11, Barcelona, Paidós.
- Cabero, J. (2007): Las nuevas tecnologías en la Sociedad de la Información, en Cabero, J. (coordinador): Nuevas Tecnologías Aplicadas a la Educación. pp 11, McGrawHill. Madrid.
- CAIBI (Conferencia de Autoridades Iberoamericanas de Informática) (2001). Indicadores de Tecnologías de la Información en países de la CAIBI. Primer seminario sobre indicadores de la sociedad de la información y cultura científica. Lisboa, Portugal, p.5.
- Canada Centre for Remote Sensing (CCRS), (2016). Fundamentals of remote Sensing

https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/resource/tutor/fundam/pdf/fundamentals_e.pdf

- Capital Sustentable, S.C. 2011. Guía para el desarrollo local sustentable. Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento, Banco Mundial Departamento de México y Colombia, Región de América Latina y El Caribe. México.
- Cardero, R. Y., (2011). Desarrollo Sostenible a partir de los enfoques de los problemas sociales de la ciencia y la tecnología, en Contribuciones a las Ciencias Sociales, www.eumed.net/rev/cccss/14/
- CEPAL (2003) Ciencia y tecnología para el desarrollo sostenible: una perspectiva latinoamericana y caribeña, Serie Seminarios y Conferencias 25, Comisión Económica para América Latina y el Caribe: Santiago.
- CEPAL, (2007). Monitoreo del eLAC2007: avances y estado actual del desarrollo de las Sociedades de la Información en América Latina y el Caribe. OSILAC.
- CEPAL, (2015). TIC y medio ambiente. Newsletter eLaC no. 14, disponible en <https://www.cepal.org/socinfo/noticias/paginas/9/30389/newsletter14.pdf>
- Chacón Castillo M.C., Juan Orlando Gil. (2011). DIAGNOSTICO SOBRE LA UTILIZACIÓN DE LA MODALIDAD DE APRENDIZAJE EN LÍNEA POR LOS FUNCIONARIOS CON PUESTO DE JEFATURA EN LAS ÁREAS DE SALUD DE LA REGIÓN HUETAR ATLÁNTICA DURANTE EL PERÍODO SETIEMBRE A NOVIEMBRE DEL 2010. INSTITUTO CENTROAMERICANO DE ADMINISTRACIÓN PÚBLICA, COSTA RICA.
- Challenger A. (1998). Utilización y Conservación de los Ecosistemas Terrestres de México, Pasado, Presente y Futuro. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, D.F.
- Challenger, A., y Soberón, J. (2008). Los ecosistemas terrestres. En Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (Eds.), Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad (pp.87–108). México: CONABIO.
- Chambers, R., Pacey, A. & Thrupp, L. (1991), Farmer First: Farmer Innovation and Agricultural Research, IT Publications, London.
- Chianucci, F., Disperati, L., Guzzi, D., Bianchini, D., Nardino, V., Lastrì, C., ... Corona, P. (2016). Estimation of canopy attributes in beech forests using true colour digital images from a small fixed-wing UAV. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 47, 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.12.005>

CMNUCC Glosario en línea de la (en inglés; Glossary of climate change acronyms) http://unfccc.int/essential_background/glossary/items/3666.php#M accesado 20 mayo 2019 .

Comisión de Comunidades Europeas, (2001). Comunicación de la Comisión al Consejo y al Parlamento Europeo; Tecnologías de la información y de la comunicación en el ámbito del desarrollo. El papel de Las TIC en la política comunitaria de desarrollo; Bruselas,770 final; p.3.

CONABIO. 2009. Catálogo taxonómico de especies de México. En Capital Natural de México. CONABIO, Mexico.

CONAFOR (2015) "Criterios para la ejecución de proyectos de saneamiento forestal". Lineamientos del Programa de Sanidad. Anexo 1. México: CONAFOR.

CONAFOR (2011). Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Informe 2004-2009. Conafor. México.

Concklin, D. A., & Geils, B.W. (2008). Survival and sanitation of dwarf mistletoe-infected ponderosa pine following prescribed underburning. *Western Journal of Applied Forestry*, 23(4), 216-222. doi: https://www.fs.fed.us/rm/pubs_other/rmrs_2008_concklin_d001.pdf

Coops, N.C.; Johnson, M.; Wulder, M.A., (2006). White, J.C. Assessment of QuickBird high spatial resolution imagery to detect red attack damage due to mountain pine beetle infestation. *Remote Sens. Environ.* 103, 67–80.

Coria, V. M., Vázquez, I., Muñoz, H. J., & Villa, J. (2010). Impacto de tierra de diatomeas sobre *Arceuthobium globosum* Hawksworth & Wiens subsp. *grandicaule* en *Pinus pseudostrobus* Lind. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1(1), 39-46.

Davenport, T. & Prusak, L. (1998), *Working Knowledge*, Harvard Business Scholl Press, Boston.

Deléage, J. P., (2000). "L'environnement au vingtieme siecle", DEA Environment: temps, espaces, societies, Dep.de Geographie, Orleans, Université d'Orleans, mimeo

Díaz, E. & Heler, M. (1985), *El conocimiento científico*, Buenos Aires.

Diaz, S.; J. Fargone; F.S. Chapin III Y Tilman, D. 2006. Biodiversity loss threatens human well-being. *PLoS Biology* 4 (8): e277. doi:10.1371/journal.pbio.0040277

Dykstra D.P. (1997). Sistemas de información en el sector forestal. *Revista internacional de silvicultura e industrias forestales. Unasyuva*, vol 48.

Echeverría, C., L. Cayuela, R.H. Manson, D.A. Coomes, A. Lara, J.M. Rey-Benayas, A.C. Newton. (2007). Spatial and temporal patterns of forest loss and fragmentation in Mexico and Chile. In: Newton A.C. (ed.) Biodiversity Loss and Conservation in Fragmented Landscapes: The Forests of Montane Mexico and Temperate South America. CAB International.

eLAC (2015). Las TIC como herramientas para la sustentabilidad ambiental. <https://www.cepal.org/socinfo/noticias/paginas/9/30389/newsletter14.pdf>

FAO (2020). Conjunto de Herramientas para la Gestión Forestal Sostenible (GFS), recuperado de <http://www.fao.org/sustainable-forest-management/toolbox/modules/mountain-forests/basic-knowledge/es/> mayo 2020.

FAO. (2009). Los bosques y el agua. In Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación. ROMA.

FAO. (2015). Recursos Forestales Mundiales 2015. Retrieved from www.fao.org/3/a-i4793s.pdf

Ferrari, B. (2012). Declaración del actual Secretario de Economía reportada por el portal digital de noticias “El Golfo”: “México tercer exportador de servicios en Tecnología de la Información”. Disponible en: <http://www.elgolfo.info/elgolfo/nota/142538-mexico-tercer-exportador-en-servicios-de-tecnologias-de-la-informacion/>

Foster, P. (2001). The potential negative impacts of global climate change on tropical montane cloud forests. *Earth-Science Reviews* 55: 73 – 106.

Fraioli, L. (1999). La historia de la tecnología. pp. 51-55, Florencia: Editex.

Funtowicz, S. y Ravetz, J. (1997). "Problemas ambientales, ciencia post normal y comunidades evaluadoras extendidas". En: González, M.; López Cerezo, J. A. y Luján, J. L. (Editores) (1997). *Ciencia, tecnología y sociedad* Barcelona: Ariel, pp. 151-160.

Gallopín G., (2003). *Sostenibilidad y desarrollo sostenible: un enfoque sistémico*, Santiago de Chile, 46 p.

Garca C. E. and F. A. Herrera, (2015). “Percepción remota en cultivos de caña de azúcar usando una cámara multiespectral en vehículos aéreos no tripulados,” in XVII Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, ser. 1, INPE, Ed., vol. 1, INPE. Av. dos Astronautas, 1758, Sao Jose dos Campos, Brazil: INPE, 3 2015, pp. 4450–4457.

García Franco, M. (2018). Los ODS: qué son y cómo pueden contribuir las TIC, <https://blog.everis.com/es/blog/responsabilidad-social/los-ods-qu%C3%A9-son-y-c%C3%B3mo-pueden-contribuir-las-tic>

- García, E. (1973). Modificaciones al sistema de clasificación de Koopen. Instituto de Geofísica. Universidad Nacional Autónoma de México. 246
- García, J. C. (1965). Los primitivos. Pp. 4-5, Bogotá: Voluntad
- Gartner Inc. (2008). Gartner estimates ICT industry accounts for 2 percent of global CO2 emissions. Disponible en: <http://www.gartner.com/it/page.jsp?id=503867>.
- Gaynor, G. (1999). Manual de gestión en tecnología. Una estrategia para la competitividad de las empresas. Colombia: Mc Graw Hill
- Gebhard, J. (2002). Introducción al procesamiento digital de imágenes. Cátedra de Aerofotointerpretación, FCN y M, UNLP, La Plata, MS.
- Gehrke R. and A. Greiwe, (2013). "Multispectral image capturing with foveon sensors," ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, no. 2, pp. 151–156.
- GESI. 2016. Enabling the Global Goals. Recuperado a partir de <http://digitalaccessindex-sdg.gesi.org/>
- Giannuzzo, A. N. (2010). Los estudios sobre el ambiente y la ciencia ambiental. *Scientia & Studia*, 8(1), 129-56. <https://doi.org/10.1590/S1678-31662010000100006>
- Gibbons, M.; Limoges, C.; Nowotny, H.; Schwartzman, S.; Scott, P.; y Trow, M. (1994). *The New Production of Knowledge: The Dynamics of Science and Research in Contemporary Societies*; Sage: Londres.
- Goettle, A., y Sene, E. H. (1997). Funciones protectoras y ambientales de los bosques. FAO.
- Goillot, C.H. (1976). Rapport de Synthese, C. R. Table ronde C.N.R.S. Ecosystems bocagers, Rennes
- González, M., López, J.A. y Luján, J.L. (1996): "Ciencia, tecnología y sociedad: una introducción al estudio social de la ciencia y la tecnología". *Revista bibliográfica de geografía y ciencias sociales*. Universidad de Barcelona. Nº 126, pág 324.
- González. J. (2011). Formación de colores. <https://sites.google.com/site/660formaciondecolor/home/como-obtiene-los-colores-un-televisor-o-monitor/modelo-de-color-rgb>
- Grabherr, G., M. Gottfried y H. Pauli. (1994). Climate change on mountain plants. *Nature* 369:448.

- Gregersen H.M., (2000). Income from mountain timber and wood products, in Price M.F. and Butt N. (eds.), *Forests in Sustainable Mountain Development. A State of Knowledge Report*. IUFRO Research Series N°5, Cabi Publishing, Wallingford, 590 p.
- Griffin, A. L., Robinson, A. C., & Roth, R. E. (2017). Envisioning the future of cartographic research. *International Journal of Cartography*, 3(sup1), 9-31.
- Guzman F, T. (2009). *Las tecnologías de la información y la comunicación en la universidad autónoma de querétaro: propuesta estratégica para su integración*. Tesis doctoral, Universitat Rovira I Virgili, MÉXICO.
- Gavito, M. E., Wal, H. V. D., Aldasoro, E. M., Ayala-Orozco, B., Bullén, A. A., Cach-Pérez, M., ... & Martínez, P. (2017). Ecología, tecnología e innovación para la sustentabilidad: retos y perspectivas en México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 88, 150-160.
- Hall, R. J., Castilla, G., White, J. C., Cooke, B. J., & Skakun, R. S. (2016). Remote sensing of forest pest damage: a review and lessons learned from a Canadian perspective. *The Canadian Entomologist*, 148(S1), S296–S356. <https://doi.org/10.4039/tce.2016.11>
- Hamilton L.S., Juvik J.O. y Scatena F.N. Eds. (1995). *Tropical Montane Cloud Forests*. Ecological Studies 110, Springer-Verlag, Nueva York.
- Hawksworth, F. y D. G. Wiens (1996). *Dwarf Mistletoes: Biology, Pathology, and Systematics*. Washington, D. C.: United States Department of Agriculture/Forest Service.
- Hellström, C. (1993). GPS/GIS forestry applications in Sweden - experiences and possibilities. *Skog Forsk Results* N° 5, 4 págs.
- Herrera G. R., Gutiérrez G. JM. (2011). *Conocimiento, Innovación y Desarrollo*, 1ª ed. San José, Costa Rica: Impresión Gráfica del Este, 290p.; ISBN: 978-9968-900-10 1.
- Hessen, J. (1926), *teoría del conocimiento*, Argentina.
- Heurich, M.; Ochs, T.; Andresen, T.; Schneider, T., (2010). Object-orientated image analysis for the semi-automatic detection of dead trees following a spruce bark beetle (*Ips. typographus*) outbreak. *Eur. J. Forest Res.*, 129, 313–324.
- Hiriart Le Bert, G. (2011). *Evaluación de la Energía Geotérmica en México*. Informe para el Banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía. Distrito Federal, México.
- Howell, T. L., K. K. Singh, and L. Smart. (2018). "Structure from Motion Techniques for Estimating the Volume of Wood Chips." In *High Spatial Resolution Remote*

Sensing: Data, Techniques, and Applications, edited by Yuhong He and Qihao Weng. Boca Raton, FL: CRC Press.

Huber O. Ed. (1986). La Selva Nublada de Rancho Grande Parque Nacional "Henry Pittier": El Ambiente Físico, Ecología Vegetal y Anatomía Vegetal. Fondo Editorial Acta Científica Venezolana/Seguros Anauco C.A., Caracas.

Iglesias, A. L. G., y Tivo, F. Y. (2006). Caracterización morfométrica de la población de *Pinus hartwegii* Lindl. del Cofre de Perote, Veracruz, México. *Ra Ximhai*, 2, 449–468. Retrieved from <http://www.revistas.unam.mx/index.php/rxm/article/view/6883>

Iglesias, L., Tivo, Y., y Casas, J. (2006). *Pinus hartwegii* Lindl. del Cofre de Perote en Veracruz México. *Cuadernos de Biodiversidad*, 20(1993), 10–16. Retrieved from https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/1091/1/cuadbiod20_3.pdf

Iglesias Jiménez, M. Á. (2016). Diseño e implementación de un Dron Para la detección de incendios forestales. Universidad Oberta de Cataluña, España.

INEGI, (1996). Carta Topográfica E14A37, E14A38, E14A47 y E14A48 escala 1:50,000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). Fourth Assessment Report, Climate Change 2007: Synthesis Report. (<http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-syr.htm>) International Tropical Timber Organization (ITTO). 2005. Consecución del objetivo 2000 y la ordenación forestal sostenible en México. Yokohama, Japón. 112 pp.

ITU. 2018. ICTs for a Sustainable World #ICT4SDG. Recuperado 14 de octubre de 2018, a partir de <https://www.itu.int/en/sustainable-world/Pages/default.aspx>

J. Harlow et al., (2013) "A Review of Utopian Themes in Sustainable Development Discourse," *Sustainable Development*, vol. 21, n.º 4, pp. 270-280.

Jhonson, M. (2011). Como las TIC pueden ayudar a enfrentar el cambio climático. <https://www.cepal.org/socinfo/noticias/paginas/9/30389/newsletter14.pdf>

Jones, C. (2004), *Handbook of Economic Growth*, Vol. 1, Elsevier, University of California, Berkeley and NBER, chapter Growth and Ideas, pp. 1063–1111.

Ju C. and H. I. Son, (2018). "Discrete event systems based modeling for agricultural multiple unmanned aerial vehicles: Automata theory approach," in *Proc. 18th Int. Conf. Control, Autom. Syst. (ICCAS)*, pp. 258–260.

Komiyama, H.; Takeuchi, K.; Shiroyama, H. y Mino, T. eds. (2011). *Sustainability Science: A Multidisciplinary Approach*, United Nations University Press: Tokio.

- Körner, C., and J. Paulsen. (2004). A world-wide study of high altitude treeline temperatures. *J. Biogeogr.* 31: 713-732.
- Larrouyet, M. C. (2015). *Desarrollo sustentable: origen, evolución y su implementación para el cuidado del planeta*. Universidad Nacional de Quilmes. Argentina.
- Lauer, W. (1973). The altitudinal belts of the vegetation in the central Mexican highlands and their climatic conditions. *Arctic and Alpine Research*, 5, A99–A113. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/1550159>
- Lausch, A.; Erasmi, S.; King, D.J.; Magdon, P.; Heurich, M. Understanding Forest Health with Remote Sensing -Part I –A Review of Spectral Traits, Processes and Remote-Sensing Characteristics. *Remote Sens.* 2016, 8, 1029, doi:10.3390/rs8121029
- Lawley, V.; Lewis, M.; Clarke, K.; Ostendorf, B. (2016). Site-based and remote sensing methods for monitoring indicators of vegetation condition: An Australian review. *Ecol. Indic.*, 60, 1273–1283
- Lemarchand, G. A. (2016). Los ritmos de las políticas CTI y de sus paradigmas tecno-económicos/organizacionales en ALC (1945–2030).
- Lillesand, T.M. and Kiefer, R.W. (1994) *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley and Sons Inc., New York.
- Linchant, J., J. Lisein, J. Semeki, P. Lejeune, and C. Vermeulen. (2015). “Are Unmanned Aircraft Systems (Uass) the Future of Wildlife Monitoring? A Review of Accomplishments and Challenges.” *Mammal Review* 45 (4): 239–252. doi:10.1111/mam.12046.
- Lobera, J. (2008). "Insostenibilidad: aproximación al conflicto socioecológico", *Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad CTS*, Vol. 4, (11), pp. 53-80. Disponible en Internet: <http://oeibolivia.org/files/Volumen%204%20-%20N%C3%BAmero%2011/doss02.pdf>
- Long, J. (1989), *Cognitive ergonomics and human-computer interaction*, Cambridge series on human-computer interaction, Cambridge University Press, Cambridge, chapter Cognitive ergonomics and human-computer interaction, pp. 4–11.
- López Ornat, A. (2004), «Estrategias de sostenibilidad: pocas noticias, pero sustanciales lecciones», en *Quórum* núm. 10
- Lu J., Y. Miao, Y. Huang, W. Shi, X. Hu, X. Wang, and J. Wan, (2015). “Evaluating an unmanned aerial vehicle-based remote sensing system for estimation of

- rice nitrogen status,” in *Agro-Geoinformatics (Agro- geoinformatics)*, 2015 Fourth International Conference on, July 2015, pp. 198–203.
- Luna-Vega I., Alcántara-Ayala O., Ruíz-Jiménez C.A. y Contreras-Medina R. (2006). Composition and structure of humid montane oak forests at different sites in central and eastern Mexico. En: Kappelle M. Ed. *Ecology and Conservation of Neotropical Montane Oak* , pp. 101-112, Springer-Verlag, Berlín.
- Madrid, L., Núñez, J., Quiroz G., y Rodríguez, Y., (2009). La propiedad social forestal en México. *Investigación Ambiental. Ciencia y Política Pública*, 1 (2), 179-196
- Maggi, A. (2003) «Características de los principales sensores utilizados para el estudio de los recursos naturales», en *Sensores remotos aplicados al estudio de los recursos naturales*, S. Navone, coord., pp. 19-39. Universidad de Buenos Aires.
- Martínez T, T., W. Todd W., L. Islas R., (2007). “Muérdago americano. Un problema potencial en bosques urbanos”, en *Arbórea*, 8 (22-23), pp. 6-12, Asociación Mexicana de Arboricultura, México.
- Martínez, F. (1996): “Tecnología educativa y diseño curricular”, en GALLEGO, D. y otros (Coords.): *Integración curricular de los recursos tecnológicos* . Oikos - Tau. Barcelona. Pág. 13-30.
- Mascaro, J., Asner, G.P., Davies, S.J., Dehgan, A., Saatchi, S. (2014). These are the days of lasers in the jungle. *Carbon Balance Manage.* 9.
- Matese, A.; Toscano, P.; Di Gennaro, S.F.; Genesio, L.; Vaccari, F.P.; Primicerio, J.; Belli, C.; Zaldei, A.; Bianconi, R.; Gioli, B. (2015). Intercomparison of UAV, aircraft and satellite remote sensing platforms for precision viticulture. *Remote Sens.* 7, 2971–2990.
- Meadows, D. - Randers, J. - Meadows, D. (2006) *Los límites del crecimiento 30 años después*. Barcelona, Galaxia-Gutenberg.
- Meadows, D. H. - Meadows, D. L. – Randers, J. - Behrens, E. (1972) *Los límites del crecimiento*. Informe del club de Roma. México, F. C. E.
- Meadows, D. H. - Meadows, D. L. - Randers, J. (1993) *Más allá de los límites del crecimiento*. Madrid, País-Aguilar
- Mesas-Carrascosa, F.-J., M. D. N. Notario García, J. E. M. De Larriva, and A. García-Ferrer. (2016). “An Analysis of the Influence of Flight Parameters in the Generation of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Orthomosaicks to Survey Archaeological Areas.” *Sensors* 16 (11): 1838. doi:10.3390/ s16111838.

- Mogili, U. M. R., & Deepak, B. B. V. L. (2018). ScienceDirect ScienceDirect Review on Application of Drone Systems in Precision Agriculture. *Procedia Computer Science*, 133, 502–509. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.063>
- Moguillansky G. (2005). La importancia de la tecnología de la información y la comunicación para las industrias de recursos naturales. CEPAL, Santiago de Chile.
- Moreira J.M. (2005). Ortofotos digitales de Andalucía, un valor ambiental en alza. *Revista Medio Ambiente* 49: 35-37.
- Muchiri N. and S. Kimathi, (2016). “A review of applications and potential applications of UAV,” in *Proc. Sustain. Res. Innov. Conf.*, Jun., pp. 280–283.
- Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, 114(4), 358-371, DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009.
- Mullerová, J., Bartaloš, T., Brůna, J., Dvořák, P., & Vítková, M. (2017). Unmanned aircraft in nature conservation: an example from plant invasions. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8–10), 2177–2198. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1275059>
- Mumford, L. (2000): *Técnica y Civilización*. Alianza Editorial. Madrid.
- Muñoz, C., A. Guevara, J.M. Bulás, J.M. Torres, J. Braña. (2006). Pagar por los servicios hidrológicos del bosque en México. En: Pagiola A., J. Bishop, N. Landen-Mills (Eds), *La venta de servicios ambientales forestales. Mecanismos basados en el mercado para la conservación y el desarrollo*. SEMARNAT/INE, pp 165 –206.
- Muñoz-Villers, L.E., J. López-Blanco. (2007). Land use/cover changes using Landsat TM/ETM images in a tropical and biodiverse mountainous area of central-eastern Mexico. *International Journal of Remote Sensing* 29: 71-93.
- Navas, M.M. (2008). El uso de las TIC para el aprendizaje de la Programación; Available from: <http://www.monografias.com/trabajos55/tic-en-programacion/tic-en-programacion.shtml>.
- Neves, L. (2011). TIC una fuerza para el cambio. Gesi, www.gesi.org
- Nonaka, I. & Takeuchi, H. (1995), *The knowledge creating company: How Japanese companies create the dynamics of innovation*, Oxford University Press, Oxford.
- Nonaka, I. (1994), ‘A dynamic theory of organizational knowledge creation’, *Organizational Science* 5(1), 14–37.

- Novo, M. (2009) El desarrollo sostenible. Su dimensión ambiental y educativa. Madrid, Humanitas.
- OECD, (2003). WORKING PARTY ON INDICATORS FOR THE INFORMATION SOCIETY -WPIIS- , "A proposed classification of ICT goods",
- Oltra Algado, C. (2006). "Sociedad y medio ambiente. Ciudadanos y científicos frente al proceso de reforma mediambiental de la sociedad", tesis doctoral, Universidad de Barcelona. Disponible en Internet: <http://www.tesisenxarxa.net/TDX-1005107-113944/>
- Ontoria, A. (2006). Aprender con mapas mentales: una estrategia para pensar y estudiar. pp 67-68, Madrid: Narcea.
- ONU, (1987). Nuestro futuro común. Madrid: Alianza. p. 67.
- ONU. (2000). Declaración del milenio. (A/RES/55/2). Recuperado de: <http://www.un.org/spanish/milenio/ares552.pdf>
- ONU. (2015). Proyecto de documento final de la cumbre de las Naciones Unidas para la aprobación de la agenda para el desarrollo después de 2015(A/69/L.85). Recuperado de: http://www.objetivosdedesarrollodelmilenio.org.mx/Doctos/TNM_2030.pdf
- Organización de Estados Iberoamericanos para la educación (OEI) (2004). Educar para el desarrollo sostenible. Década 2005-2014 (consulta 15 de marzo de 2010 en www.oei.es/decada)
- Organización de Estados Iberoamericanos para la Educación, la Ciencia y la Cultura (OEI), (2012). Ciencia, tecnología e innovación para el desarrollo y la cohesión social. Madrid, España, ISBN: 978-84-7666-240-3
- Ortiz, S. M., Breidenbach, J., & Gerald K?ndler., (2013). Early detection of bark beetle green attack using terrasars-x and rapideye data. Remote Sensing, 5(4), 1912-1931.
- Ostendorf, B. Overview: Spatial information and indicators for sustainable management of natural resources. Ecol. Indic. 2011, 11, 97–102.
- Panico, F., Ascencio, M. T. L., Aguila, M. E., del Rosario Pineda-López, M., & Sánchez-Velásquez, L. R. (2014). Una visión integral de las TIC desde la sustentabilidad humana: retos y oportunidades para la universidad del siglo XXI.
- Pardos, J. A. (2010). Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global (Vol. 20). INIA. Madrid: Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, 253.

- Parra Romero, A., & Cadena Díaz, Z. (2010). El medio ambiente desde las relaciones de ciencia, tecnología y sociedad: un panorama general. *CS*, (6), 331-360.
- Pascuas-Rengifo, Y., González, M., & Perdomo, K. (2016). Estrategias tecnológicas para el fomento de la conservación ambiental. *Revista científica*, 3(26), 29-34.
- Peñuelas, J., Filella, I., Zhang, X., Llorens, L., Ogaya, R., Lloret, F., Comas, P., Estiarte, M., Terradas, J. (2004). Complex spatiotemporal phenological shifts as a response to rainfall changes. *New Phytologist*, 161(3): 837-846. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01003.x>
- Pérez Ceballos A. E., (2007), *Ciencia y tecnología al alcance de todos. Una propuesta comunicativa para la apropiación social de la ciencia y de la tecnología por los indígenas ecuatorianos: La experiencia Otavalo.* Universidad Iberoamericana. México.
- Pettorelli, N.; Laurance, W.F.; O'Brien, T.G.; Wegmann, M.; Nagendra, H.; Turner, W. (2014) Satellite remote sensing for applied ecologists: Opportunities and challenges. *J. Appl. Ecol.* 2014, 51, 839–848.
- Primicerio J., S. F. Di Gennaro, E. Fiorillo, L. Genesio, E. Lugato, A. Matese, and F. P. Vaccari, (2012). "A flexible unmanned aerial vehicle for precision agriculture," *Precision Agriculture*, vol. 13, no. 4, pp. 517–523. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/s11119-012-9257-6>
- PROBOSQUE (1990). Segundo estudio dasonómico del Estado de México (SEDEMEX). Toluca, México 334
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (1994). Informe sobre Desarrollo Humano, Santa Fe de Bogotá, CIDEAL, Madrid, ISBN 968-16-4489-1.
- Puig, A. (2010). El Proyecto de biodiversidad IABIN como estrategia para el abordaje de cambios globales en ecosistemas de América. *Estrategias Integradas de Mitigación y Adaptación a Cambios Globales. Contr. Red CYTED y PIUBACC.* Carybeedita. Prov. Buenos Aires, 21, 29.
- Ramírez-Marcial N., González-Espinosa M. y Williams-Linera G. (2001). Anthropogenic disturbance and tree diversity in montane rain forests in Chiapas, Mexico. *Forest Ecology and Management* 154:311-326.
- Ramírez-Marcial, N. (2003). Survival and growth of tree seedlings in anthropogenically disturbed Mexican montane rain forests. *Journal of vegetation Science* 14: 881 – 890.
- Reyes, G.E. (2009) Teorías de desarrollo económico y social: articulación con el plantemiento de desarrollo humano. *Revista Tendencias.* Volumen X, nº1. pp. 117-142.

- Riaño, D., Moreno Ruiz, J.A., Isidoro, D., Ustin, S.L. (2007). Global spatial patterns and temporal trends of burned area between 1981 and 2000 using NOAA-NASA Pathfinder. *Global Change Biology*, 13(1), 40-50. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01268.x>
- Richards, P. (1985), *Indigenous Agricultural Revolution: Ecology and Food Production in West Africa*, Hutchinson, London.
- Ricker, M., Gutiérrez-García, G., & Daly, D. C. (2007). Modeling long-term tree growth curves in response to warming climate: Test cases from a subtropical mountain forest and a tropical rainforest in México. *Canadian Journal of Forest Research*, 37, 977–989. doi:10.1139/X06-304
- Riechtmann y Fernández, (1994). “Redes que dan libertad: Introducción a los nuevos movimientos sociales”, Edit. Paidós Ibérica, Barcelona, 132-133.
- Roberts, S. (2004). *OECD work on measuring the Information Society*, OECD, p.3.
- Rockström J. et al., (2015). “Sustainable Development and Planetary Boundaries.” presentado en High Level Panel on the Post-2015 Development Agenda 2013, pp. 46.
- Rodríguez, E. (2006). “Incidencia de las nuevas tecnologías en el aprendizaje autónomo de lenguas extranjeras” en *Memorias del 6° Encuentro Nacional e Internacional de Centros de Autoacceso de Lenguas. La autonomía del aprendiente: escenarios posibles*. En línea. Página consultada el 9 de agosto de 2018. México: CELE, UNAM. Disponible en:<http://cad.cele.unam.mx/memorias6> ISBN 970-32-4198-0.
- Roxburgh, L. and NICOLSON, S. (2005). Patterns of host use in two African mistletoes: The importance of mistletoe-host compatibility and avian disperser behaviour. *Functional Ecology*. 19. 865 - 873. 10.1111/j.1365-2435.2005.01036.x.
- Rullan Silva C. D., (2015). *APLICACIÓN DE LA TELEDETECCIÓN SATELITAL EN EL SEGUIMIENTO DE LA DEFOLIACIÓN POR INSECTOS FORESTALES*. Universidad de Valladolid. Palencia, España.
- Russ, J. C. (1995). *The Image Processing Handbook*. 2nd edition. CRC Press, Boca Raton.
- Salami, E.; Barrado, C.; Pastor, E. UAV flight experiments applied to the remote sensing of vegetated areas. *Remote Sens*. 2014, 6, 11051–11081
- Salvatierra M. I. (2011), *EL DESARROLLO SOSTENIBLE COMO PARADIGMA DEL SIGLO 21*, Universidad Ecotec, https://www.ecotec.edu.ec/documentacion/investigaciones/estudiantes/trabajos_de_clases/9723_2011_MKT_RFUENTES_00275.pdf

- Santana Cruz E. E. (2017). Clasificación de función del método de sustentación utilizado. Universidad Autónoma de Barcelona.
- Santillán Gómez J. A., Daniel Villaseñor Chávez, Christopher Réne Torres San Migu y Guillermo Urriolagoitia Calderón (2015). IMPORTANCIA DE LA TELEDETECCIÓN EN LA EXPLORACIÓN DE RECURSOS NATURALES. XII encuentro de participación de la mujer en la ciencia.
- SANTILLÁN, P.J. 1991. Silvicultura de las coníferas de la región central. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma de Chapingo. División de Ciencias Forestales. Chapingo, México. 305 p.
- SEMARNAT. 2010. Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. México. 30 de diciembre de 2010.
- Short, N. M. (2010). The remote sensing tutorial [web site]. National Aeronautics and Space Administration (NASA), Goddard Space Flight Center.
- Short, N.M., (2010). "The Remote Sensing Tutorial"
<http://www.fas.org/irp/imint/docs/rst/Front/tofc.html>
- Shulman, L. (1986). La investigación de la enseñanza I., Paidós, Barcelona, chapter Paradigmas y programas de investigación en el estudio de la enseñanza: una perspectiva contemporánea.
- Sobrino, J. (ed.) (2000). Teledetección. Valencia: Universidad de Valencia.
- Solano, I. (2003). La videoconferencia como Recurso Didáctico en la Enseñanza Superior. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia.
- Solis, M.A. 1994. Monografía de Pinus hartwegii Lindl. Tesis Profesional para obtener el Título de Ingeniero Forestal Universidad Autónoma de Chapingo. División Ciencias Forestales. Chapingo, México. 130 p
- Somodi, I., Čarni, A., Ribeiro, D., and Podobnikar, T., (2012). Recognition of the invasive species Robinia pseudacacia from combined remote sensing and GIS sources. Biological conservation, 150, pp. 59–67.doi: 10.1016/j.biocon.2012.02.014.
- Soudan J., Zingari P.C., (2000). Mountain Forests and Employment in Savoy, France. Mountain Research and Development 20(2) 132-135

- Spender, J.C. (2000), Knowledge Horizons: The present and promise of knowledge management, Butterworth-Heinemann, chapter Managing knowledge systems, pp. 149– 167.
- Stadtmüller T. (1987). Cloud Forests in the Humid Tropics. A Bibliographic Review. United Nations University/Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba.
- Stumpo, G. and Rovira, S. (2013). Entre mitos y realidades. TIC, políticas públicas y desarrollo productivo en América Latina.
- Sveiby, K. (1997). The New Organisational Wealth Managing and measuring KnowledgeBased Assets, Berrett-Koehler, San Fransisco.
- Tello (2008), Las tecnologías de la información y comunicaciones (TIC) y la brecha digital
- Tirado C. (2018). Introducción a la teledetección. <https://www.uprm.edu/labs3417/wp-content/uploads/sites/176/2018/08/Introducci%C3%B3n-a-la-teledetecci%C3%B3n.pdf>, Recinto Universitario de Mayaguez
- Torres-Rojo J.M., (2020). Estudio de tendencias y perspectivas, Estudio de tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina al año 2020. FAO, México.
- Trupia G. (2010). Desarrollo tecnológico y sustentabilidad, disponible en http://www.vocesenelfenix.com/sites/default/files/pdf/8trupia_2.pdf
- UNCTAD, X. (2008). Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo.
- Valdiviezo B, A.G. (2011). Los residuos tecnológicos, un problema socio-ambiental. <https://www.cepal.org/socinfo/noticias/paginas/9/30389/newsletter14.pdf>
- Varis, O. 1999. Water resources management: Vicious and virtuous circles. *Ambio* 28 (7):599-603.
- Vázquez-García J.A. (1995). Cloud forest archipelagos: Preservation of fragmented montane ecosystems in tropical America. En: Hamilton L.S., Juvik J.O. y Scatena F.N. Eds. *Tropical Montane Cloud Forests*, pp. 315-332, Springer-Verlag, Nueva York.
- Vanegas, F.; Bratanov, D.; Powell, K.; Weiss, J.; Gonzalez, F. A novel methodology for improving plant pest surveillance in vineyards and crops using UAV-based hyperspectral and spatial data. *Sensors* 2018, 18, e260, doi:10.3390/s18010260.

- Vilches, A., Gil Pérez, D., Toscano, J.C. Y Macías, O. (2014). «Ciencia y Tecnología para la Sostenibilidad» [artículo en línea]. OEI. ISBN 978-84-7666-213-7.
- Villers L, García L, López J (1998). Evaluación de los bosques templados en México: una aplicación en el parque nacional Nevado de Toluca. *Investigaciones Geográficas*36: 7-21.
- Vivas, I., Rumbo, L., Paredes, F., & La Cruz, F. (2015). Caracterización De Cambios En Cobertura Boscosa En El Estado Cojedes Entre 1990 Y 2008 *. *Rev. Unell. Cienc. Tec.*, 33(November), 46–52.
- Von H. A. (2006). Los Sistemas de Información Geográfica, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos, *Geoenseñanza*, vol. 11, núm. 1, 107-116, Venezuela
- Wartofsky, M. (1978). *Introducción a la Filosofía de la Ciencia*, Madrid
- Williams-Linera, G. (2002). Tree species richness complementarity, disturbance and fragmentation in a Mexican tropical montane cloud forest. *Biodiversity and Conservation* 11: 1825–1843.
- World Information Technology and Services Alliance (WITSA). (2008). *Digital Planet 2008-Executive Summary*. Disponible en: http://www.witsa.org/k108/DigitalPlanet2008ExecSummary_cover.pdf.
- Yi, L. and H.R.Thomas. (2007). A review of research on the environmental impact of e-business and ICT. *Environment International*, Vol. 33, Issue 6. p 841–849.
- Yuan, Y., and Hu, X. (2016). Random forest and objected-based classification for forest pest extraction from uav aerial imagery. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 2016-Janua(July), 1093–1098. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B1-1093-2016>
- Zhang, C. H., and J. M. Kovacs. (2012). “The Application of Small Unmanned Aerial Systems for Precision Agriculture: A Review.” *Precision Agriculture* 13 (6): 693–712. doi:10.1007/s11119-012- 9274-5
- Ziemba, E. 2017. The Contribution of ICT Adoption to the Sustainable Information Society. *Journal of Computer Information Systems*, 00(00), 1-11. <http://doi.org/10.1080/08874417.2017.1312635>
- Ziman, J. (1981) *El Conocimiento público*. Alianza Editorial.