



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

**CAMPUS MONTECILLO
POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS**

**CARACTERIZACIÓN FENOLÓGICA DE LA
VEGETACIÓN USANDO INFORMACIÓN ESPECTRAL**

MARCOS CASIANO DOMINGUEZ

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2014

LA PRESENTE TESIS TITULADA: **CARACTERIZACIÓN FENOLÓGICA DE LA VEGETACIÓN USANDO INFORMACIÓN ESPECTRAL**; REALIZADA POR EL ALUMNO **MARCOS CASIANO DOMINGUEZ**, BAJO LA DIRECCIÓN DEL CONSEJO PARTICULAR INDICADO, HA SIDO APROBADA POR EL MISMO Y ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS

HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



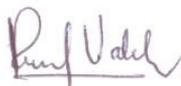
DR. FERNANDO PAZ PELLAT

ASESOR



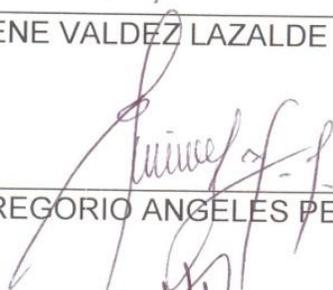
DR. MARTÍN BOLAÑOS GONZÁLEZ

ASESOR



DR. RENE VALDEZ LAZALDE

ASESOR



DR. GREGORIO ANGELES PEREZ

ASESOR



DR. ABEL QUEVEDO NOLASCO

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO, AGOSTO DE 2014

CARACTERIZACIÓN FENOLÓGICA DE LA VEGETACIÓN USANDO INFORMACIÓN ESPECTRAL

Marcos Casiano Domínguez, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2014

El conocimiento de las épocas de floración y fructificación es importante para la conservación de la biodiversidad genética de recursos vegetales; sin embargo, dada la sensibilidad de la fenología floral a efectos del calentamiento global, cada vez más se muestran los riesgos ecológicos en las interacciones animal-planta y suelo-planta-atmosfera. La temporalidad, duración, frecuencia y sincronía, definen los patrones de floración, sin embargo, estas interactúan entre sí para formar la diversidad de patrones de floración que observamos en la naturaleza, dificultando su estudio, máxime cuando no se cuenta con registros consistentes y confiables en campo, lo que incrementa el desconocimiento acerca de los ecosistemas, particularmente en México. El presente trabajo tuvo como objetivo realizar una aproximación de los eventos de floración que ocurren en un bosque tropical caducifolio o vegetación caducifolia en general, por lo que se desarrolló un experimento en el que se recrearon 11 estadios hipotéticos de floración en la naturaleza (simulaciones) y de los que se obtuvieron datos radiométricos (485, 560, 660, 830, 1650 nm). Con el uso de flores de colores blancas, amarillas, lilas(violeta) y la mezcla de todos éstos colores, los resultados mostraron incrementos y decrementos simultaneos en las bandas Rojo (660 nm) e Infrarrojo (860 nm) en presencia de floración, contrario al patrón de comportamiento que se utiliza actualmente en la generación de índices de vegetación IVIS e IVISn (Paz *et. al*, 2011 y 2014); esta evidencia experimental indica que la fenología floral es detectable utilizando información espectral.

Palabras clave: Sensores Remotos, Simulación, Fenología floral e Índice de Vegetación.

PHENOLOGICAL CHARACTERIZATION OF VEGETATION, USING SPECTRAL INFORMCIÓN DATA.

Marcos Casiano Domínguez, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2014

Knowing the times of flowering and fruiting is important for the conservation of genetic biodiversity of plant resources; however, given the sensitivity of the floral phenology to global warming effects, increasingly ecological risks are shown in animal-plant interactions and soil-plant-atmosphere. The timing, duration, frequency and timing, defined flowering patterns, however, these interact to form the diversity of flowering patterns we observe in nature, making it difficult to study, especially when you do not have consistent and reliable records field, increasing ignorance about ecosystems, particularly in Mexico. This study aimed to obtain an approximate flowering events occurring in a tropical deciduous forest or deciduous vegetation in general, so that an experiment in which 11 hypothetical flowering stages were recreated in nature (simulations) developed and that radiometric data (485, 560, 660, 830, 1650 nm) were obtained. Using colors of white flowers, yellow, lilac (violet) and the mixture of all these colors, results showed simultaneous increases and decreases in red (660 nm) and infrared bands (860 nm) in the presence of flowering, otherwise the pattern of behavior that is currently used to generate vegetation indices (IVIS e IVISn (Paz *et al.*, 2011 and 2014). This experimental evidence indicates that flowering phenology is detectable using spectral information.

Keywords: Remote Sensing, Simulation, floral Phenology and Vegetation Index.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar toda mi gratitud a Dios, por haberme permitido realizar este servicio de investigación y que además puso a gente buena entorno a este para que llegue a un buen principio.

Valga un agradecimiento muy especial al Dr. Fernando Paz Pellat, al maestro, a la persona quien más que apoyo material, me ha permitido en lo profesional el privilegio de compartirme su conocimiento sobre sensores remotos insistentemente desde otro punto de vista, a pesar de mis limitaciones. Que Dios le bendiga siempre.

A mi consejo de tesis, al Dr. Martín Bolaños, Dr. J. René Valdez, Dr. Gregorio Ángeles y al Dr. Abel Quevedo, por su apoyo incondicional en la realización de este trabajo.

Un agradecimiento especial a Patricia Ibarra, por su importante apoyo en la gestión administrativa.

Al LaNGIF de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, especialmente a la Dra. Ma. Guadalupe Galindo, Dr. Carlos Contreras, a la Sra. Gladys Orozco por su apoyo por el tiempo dispuesto para finalizar este trabajo.

A mi país, México, quien a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) financió estos estudios de postgrado.

Al Colegio de Postgraduados, por el apoyo académico brindado.

DEDICATORIA

Además de agradecer, deseo dedicarle este trabajo a mi grupo de apoyo de B.V. San Luis y Texcoco, quienes me han sostenido por gracia divina en momentos complicados, Dios les bendiga. Valga un reconocimiento especial a Rosario M., Carlos R. y Ricardo E.

Este trabajo tuvo un conductor, pero esencialmente tuvo dos motores chiquitos pero suficientemente enormes para mover mi vida, Gracias Milena... Gracias Macarena dedico este trabajo a Uds. mis hijas...

Aprecio la honestidad, la valentía y la sabiduría de la Sra. Albertina Zarate y su esposo Don Fernando García, gracias por su apoyo incondicional.

A mis herman@s y cuñad@s, Joaquín y Angélica, Ezequiel y Oliva, Alfonso y Francisca, Lorenzo, Margarita y Arnulfo, Valentina y Mario, Julia...en las buenas y malas, gracias por el apoyo y el aliciente de seguir adelante como familia.

Si hay algo que aprecio en la vida con todo el corazón son a mis amigos, Gracias Ma. Jesús (Chuy), Edgardo Medrano, Magda Vanegas y los Jamiles Cia. (Jamil, Elvira y Samuel).

CONTENIDO

	Página
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN GENERAL	12
1.1 LA FENOLOGÍA Y LOS PROCESOS DE FLORACIÓN.....	12
1.2 EL CAMBIO FENOLÓGICO DE LAS PLANTAS COMO RESPUESTA AL CALENTAMIENTO GLOBAL.....	16
1.3 IMPLICACIONES DE LA FENOLOGÍA EN EL CICLO GLOBAL DEL CARBONO 19	19
1.4 IDENTIFICACIÓN DE PROBLEMA.....	20
1.5 ESTRUCTURA DE LA TESIS	21
1.6 LITERATURA CITADA.....	23
CAPITULO II: CARACTERIZACIÓN FENOLÓGICA DE LA VEGETACIÓN A NIVEL DE CAMPO Y SATELITAL.	27
2.1 INTRODUCCIÓN	28
2.2 OBJETIVOS	28
2.3 HIPÓTESIS	29
2.4 REVISIÓN DE LITERATURA.....	29
2.4.1 Crecimiento.....	30
2.4.2 Desarrollo	30
2.4.3 Fases del desarrollo.....	30
2.4.3.1 Fase vegetativa	30
2.4.3.2 Fase reproductiva.....	31
2.4.4 Etapas del desarrollo	31
2.4.5 Estadios.....	31
2.4.6 Escala Fenológica BBCH.....	31
2.4.6.1 Organización de la escala.....	32
2.4.7 Patrones fenológicos de floración en ecosistemas áridos y caducifolios	34
2.4.8 Patrones de floración en selvas tropicales	37
2.5 PROBLEMÁTICA	42
2.5.1 La fenología a escala del ecosistema y global: sensores remotos	42
2.5.2 Seguimiento espectral de la vegetación natural.	43
2.6 MATERIALES Y MÉTODOS	46
2.7 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	51



2.8	CONCLUSIONES	56
2.9	LITERATURA CITADA.....	57
CAPITULO III: SOBRE LA CARACTERIZACIÓN FENOLÓGICA DE BOSQUES TROPICALES USANDO INFORMACIÓN ESPECTRAL: EXPERIMENTOS CON COMPONENTES..... 64		
3.1	INTRODUCCIÓN	65
3.2	REVISION DE LITERATURA.....	67
3.2.1	Patrones temporales y espectrales de la vegetación.....	67
3.2.2	Crecimiento y decrecimiento del follaje.....	67
3.2.3	Floración	72
3.3	MATERIALES Y MÉTODOS	74
3.4	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	77
3.5	CONCLUSIONES	79
3.6	LITERATURA CITADA.....	81
CAPITULO IV: CARACTERIZACIÓN FENOLÓGICA DE LA FLORACIÓN: EVIDENCIA EXPERIMENTAL Y DE CAMPO. 87		
4.1	INTRODUCCIÓN	88
4.2	OBJETIVOS	89
4.3	HIPÓTESIS	89
4.4	REVISIÓN DE LITERATURA.....	89
4.4.1	Los Índices de Vegetación y el ciclo fenológico de la floración.	90
4.4.2	Modelo semi-empírico de fenología de la floración.....	92
4.5	MATERIALES Y MÉTODOS	94
4.6	Ubicación del lugar de medición.....	94
4.6.1	Observaciones del comportamiento del IFVIS en campo.....	97
4.7	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	99
4.7.1	Seguimiento espectral en árboles de huizache (<i>Acacia farnesiana</i>)	102
4.8	CONCLUSIONES	106
4.9	LITERATURA CITADA.....	107
CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES 112		
5.1	CONCLUSIONES	112
5.2	RECOMENDACIONES	113

LISTA DE CUADROS

	Página
Cuadro 2.1 Estadios principales de crecimiento (Hack <i>et al.</i> , 1992).....	32
Cuadro 2.2 Codificación Fenológica de especies Caducifolias, en la escala de la BBCH (Hack <i>et al.</i> , 1992)	47
Cuadro 2.3 Escenarios hipotéticos sobre fenología de la floración en selvas tropicales	49
Cuadro 3.1 Estadios simulados en los experimentos	75
Cuadro 4.1 Adaptación de la escala BBCH para el árbol 1.	103

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1 Ciclo fenológico de un árbol caducifolio. (Tomado y adaptado de www.budburst.org)	12
Figura 1.2 Patrones temporales de floración, observados durante 144 meses (Newstrom <i>et al.</i> , 1994) 14	14
Figura 2.1 El ciclo de desarrollo de plantas mono y dicotiledóneas dividido en estadios de desarrollo principales y secundarios (a) y en estadios de desarrollo principales, mesoestadios y secundarios (1b). Los mesoestadios están insertados entre los estadios principales y secundarios. Esquemas modificados de un esquema de Witzenberger (Hack <i>et al.</i> , 1992). 33	33
Figura 2.2 Patrón de floración de plantas vasculares de “El Comitán”, en la Bahía de la Paz, B.C.S., para los años 1988 y 1989 (Parada <i>et al.</i> , 2012).....	37
Figura 2.3 Fenología de las especies arbóreas. (A) Número de especies en floración, (B) Número de especies en fructificación, y (C) Distribución del promedio de temperatura y precipitación de 2003-2005 (Ochoa-Gaona, 2008).....	38
Figura 2.4 Fotograma del ciclo fenológico de floración <i>Tabebuia rosea</i> (Bertol.). a) Foliación y desarrollo vegetativo, b) Defoliación, c) Brotación, d) Floración, e) Foliación y desarrollo vegetativo. Elaboración propia con fotografías (d y e) del Smithsonian Tropical Research Institute (http://www.stri.si.edu/ , 8/08/2014)	40
Figura 2.5 Patrones de fenológicos de floración de una selva tropical (Borchert, 1983).....	41
Figura 2.6 Patrón de crecimiento de un pastizal durante el transcurso de año caracterizado por la variación del índice espectral NDVI _{cp} (Paz <i>et al.</i> , 2011)	43
Figura 2.7 Esquema del modelo paramétrico general del crecimiento de la vegetación natural, índice espectral IVg. P, se refiere a puntos máximos de crecimiento y DII, se refiere a decrecimiento o bien a senescencia dados en el transcurso de un año.....	44
Figura 2.8 Etapas de floración y del crecimiento vegetativo de la vegetación natural.	45



Figura 2.9 Fotograma del ciclo fenológico de floración con base a su estacionalidad. a) Foliación y desarrollo vegetativo, b) Defoliación, c) Brotación, d) Floración, e) Foliación y desarrollo vegetativo. Elaboración propia con fotografías de campo. 46

Figura 2.10 Esquema de mediciones de reflectancias y toma de fotografías a una altura de 120 cm con diferentes coberturas de suelo-vegetación..... 50

Figura 2.11 Escenarios que simularon las etapas fenológicas de floración utilizando: a) Flores blancas, b) Flores lilas, flores amarillas, c) Mezcla de flores. 52

Figura 2.12 Simulaciones radiativas del crecimiento de un cultivo, que muestra los patrones espectrales asociados al espacio del R-IRC. 53

Figura 2.13 Comportamiento espectral e IVIS en las bandas espectrales Azul 485nm (A), Verde 560nm (V), Rojo 660nm (R) e IRC 830nm (IRC). Donde el escenario 4 correspondió al inicio e incremento de la floración hasta alcanzar su máximo en el escenario 6. Los escenarios 7 y 8 correspondieron a disminución paulatina de color como proceso de finalización de la etapa fenológica de floración..... 54

Figura 3.1 Patrones esquemáticos de la evolución temporal de un índice de vegetación en bosques: (a) perennes y (b) caducifolios..... 67

Figura 3.2 Simulaciones radiativas del crecimiento de un cultivo, que muestra los patrones espectrales asociados al espacio del R-IRC. 68

Figura 3.3 Simulaciones radiativas del crecimiento de un cultivo, que muestran los patrones espectrales asociados al espacio del Rn-IRCn estandarizado por geometría sol-sensor..... 70

Figura 3.4 Evolución temporal de Rn, IRCn e IVISn para el caso de un cultivo de frijol.. 70

Figura 3.5 Evolución temporal de Rn, IRCn e IVISn para el caso de un cultivo de maíz, con suelo relativamente oscuro, que muestra el efecto de la etapa reproductiva. 71

Figura 3.6 Evolución temporal de Rn, IRCn e IVISn para el caso de un cultivo de maíz, con suelo claro, que muestra el efecto de la etapa reproductiva..... 71

Figura 3.7 Estadios pre floración simulados en los experimentos. 76

Figura 3.8 Estadios de la floración simulados en los experimentos..... 76

Figura 3.9 Estadios de la floración donde estadio 1 = inicio, 3 = pico y 5 = final. Rn IRCn son reflectancias normalizadas y estandarizadas del Rojo e Infrarrojo respectivamente, que toman valores de 0.8 a 2.30 para ángulos de iluminación de $>0^\circ$ hasta 30° y pueden alcanzar valores de 3.98 a 60° de iluminación. 77

Figura 3.10 Índice IVISn para los diferentes tipos de flores, en los estadios de pre-floración, floración y post floración. 78

Figura 3.11 Esquemización de los estadios de la floración en un bosque tropical caducifolio. 79

Figura 4.1 Estadios de la floración donde estadio 1 = inicio, 3 = pico y 5 = final. Rn IRCn son reflectancias normalizadas y estandarizadas del Rojo e Infrarrojo respectivamente, que toman valores de 0.8 a 2.30 para ángulos de iluminación de $>0^\circ$ hasta 30° y pueden alcanzar valores de 3.98 a 60° de iluminación. 92



Figura 4.2	Ubicación geográfica del experimento.	94
Figura 4.2	Utilización de <i>Salsola collina</i> (a), conocida como radadora (b) y flores blancas de crisantemo (<i>Chrysanthemum Parthenium var. Satimex</i>) (c), así como margaritas (<i>Chrysanthemum leaucanthemum</i>) (d), en el desarrollo del experimento (e).....	95
Figura 4.3	Puntos de muestreo, con base a proporción suelo-vegetación.....	96
Figura 4.4	El encabezado vertical se refiere a parcelas fijas de <i>Salsola collina</i> bajo diferente cobertura del dosel, sobre las que se hizo variar diferentes porcentajes de flor en dos arreglos: al azar (a) y agrupados (b). El encabezado horizontal indica la variación gradual de la cobertura floral.....	97
Figura 4.5	Ejemplares de huizache (<i>Acacia farnesiana</i>), bajo seguimiento fenológico.	98
Figura 4.6	Localización de las unidades de muestreo de árboles de huizache (<i>Acacia farnesiana</i>).98	
Figura 4.7	Localización de huizaches dentro de la unidad de muestreo 1.	99
Figura 4.8	Conjunto fotográfico de AEM's, para patrones aleatorios y agrupados de medición. 99	
Figura 4.9	Patrón de comportamiento del IFVIS, al incremento de floración.	101
Figura 4.10	Comportamiento del IFVIS, variando el fondo subyacente de los escenarios..	102
Figura 4.11	102
Figura 4.12	Fotograma de seguimiento fenológico para árboles 4, 5, 8, 9 y 10 de Huzache (<i>Acacia farnesiana</i>).....	103
Figura 4.13	Patrón del IFVIS, en el seguimiento fenológico de la floración del huizache; caso arboles con flores.	104
Figura 4.14	Patrón de comportamiento del IFVIS, al incremento de floración. Fotograma de seguimiento fenológico para árboles 2, 3, 6 y 7 de huizache (<i>Acacia farnesiana</i>)	105
Figura 4.13	Patrón del IFVIS, en el seguimiento fenológico de la floración del huizache; caso arboles sin flores.	105

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 LA FENOLOGÍA Y LOS PROCESOS DE FLORACIÓN

Las plantas tienen eventos periódicos como la pérdida de hojas, la floración, la fructificación y la senescencia. En zonas templadas dicha actividad está bastante diferenciada en especies latifoliadas, con una marcada pérdida de hojas en el otoño, una actividad fotosintética baja o nula en invierno y nuevamente un período de crecimiento con la recuperación del área foliar en la primavera que alcanza el máximo en verano (Figura 1.1). El estudio de estos eventos que se repiten año tras año de forma periódica se conoce como fenología y sus métodos se fundamentan en trabajo de campo exhaustivos. Los estudios fenológicos son una aproximación importante a la detección de cambios en los ecosistemas terrestres (De Beurs y Henebry, 2005) y, por tanto, permiten analizar la dinámica de la vegetación y el carbono.

La fenología es la disciplina que estudia los eventos biológicos que se presentan periódicamente en los ciclos de plantas y animales. Dichos eventos se encuentran acomodados a ritmos estacionales influenciados por las variaciones de la temperatura y precipitación, entre otros factores, que ocurren en el curso anual del tiempo atmosférico de un determinado lugar (Cleland *et al.*, 2007; Menzel *et al.*, 2006; Kathuroju *et al.*, 2007; Rosenzweig *et al.*, 2008, Busetto *et al.*, 2010).

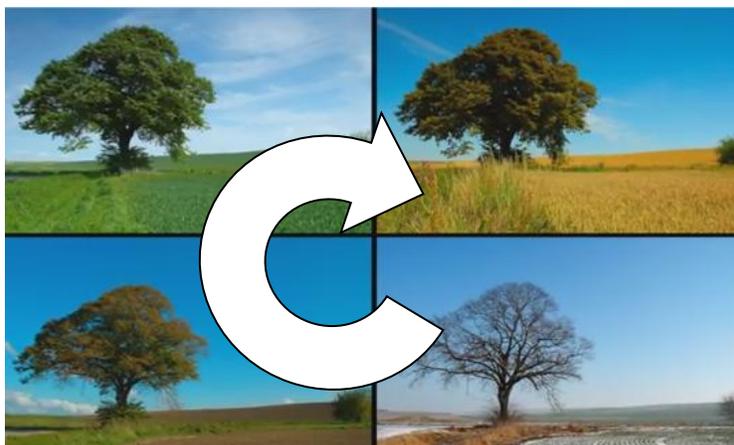


Figura 1.1 Ciclo fenológico de un árbol caducifolio. (Tomado y adaptado de www.budburst.org)



La fenología vegetativa de individuos perennes y caducifolios se encuentra íntimamente relacionada con la disponibilidad de agua como factor causal del proceso de síntesis. Las etapas fenológicas son relativamente fáciles de predecir en el corto o mediano plazo. Por el contrario, la fenología reproductiva o floral (desarrollo de flores y frutos) depende de la compleja interacción de una serie de factores endógenos y exógenos, como temperatura ambiental, fotoperiodo, humedad ambiental entre otros. En las plantas anuales mientras exista agua disponible; la floración y fructificación pueden concebirse como el resultado de la madurez del individuo, pero estas etapas son moduladas por factores del medio ambiente. Dichas etapas son consecuencia de las interacciones entre factores bióticos y abióticos que determinan el tiempo más adecuado para el crecimiento y la reproducción de las plantas (Kearns e Inouye, 1993; van Schaik *et al.*, 1993). Entre los eventos fenológicos, la floración es una etapa importante que influye en las plantas mediante procesos reproductivos tales como la polinización, la formación de frutos, el desarrollo de la semilla, la dispersión, la germinación y la sobrevivencia (Newstrom *et al.*, 1994; Sakai, 2001; Parada *et al.*, 2012). Tradicionalmente, se han realizado estudios fenológicos en selvas caducifolias con estaciones secas muy marcadas, donde las variables climáticas influyen directa o indirectamente en los patrones fenológicos de la comunidad lo que propicia que la estacionalidad de las etapas sean cíclicas y estén sincronizadas a las épocas más favorables del año (Liuth *et al.*, 2010); sin embargo, en selvas tropicales la etapa fenológica de floración no es propiamente estacional o única (Newstrom *et al.*, 1994; Morellato *et al.*, 2000; Zimmerman *et al.*, 2000; Sakai, 2001; Liuth *et al.*, 2010). Con base en trabajos realizados por Newstrom *et al.* (1994), los patrones de floración en selvas tropicales son altamente diversos, irregulares y complejos. Cada patrón de floración, atiende a descriptores como temporalidad, duración, frecuencia y sincronía, lo que permite a su vez caracterizar a los patrones de floración a nivel individual, de población y de comunidad en cuatro clases o patrones básicos de floración: continuo, sub anual, anual y supra-anual; Figura 1.2.

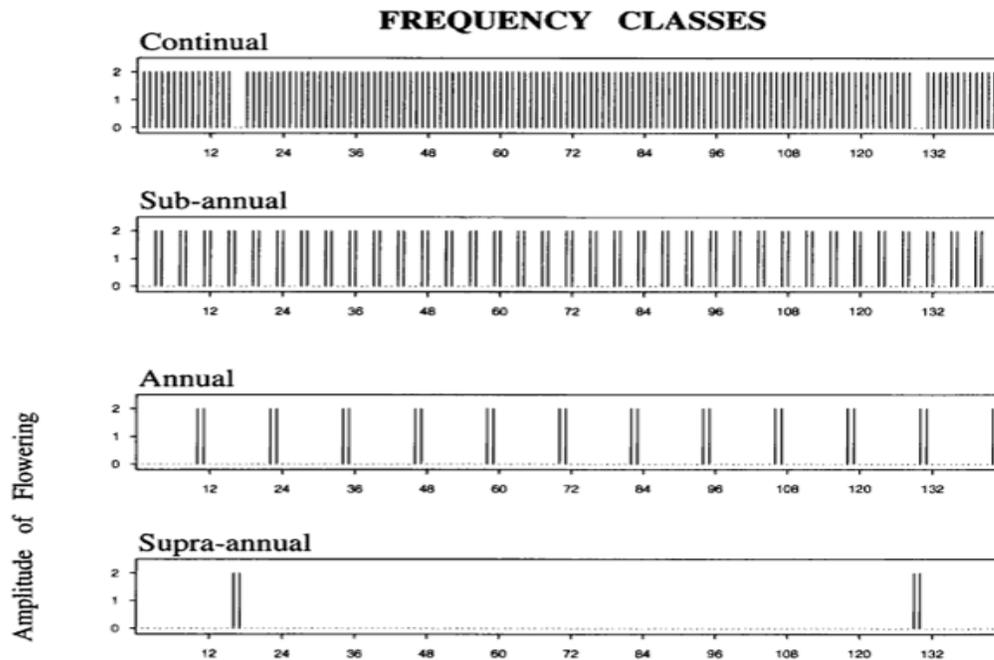


Figura 1.2 Patrones temporales de floración, observados durante 144 meses (Newstrom *et al.*, 1994)

El sistema de Newstrom *et al.* (1994) para la clasificación de patrones de floración permite realizar comparaciones de manera cuantitativa entre diferentes comunidades vegetales, mostrando que las mayores diferencias en los patrones de floración de una selva tropical y un bosque templado radica, básicamente, en que en una selva tropical, dada la gran diversidad de especies, un nivel de análisis del patrón de floración conduce a otro (gran interrelación de especies y sincronía entre especies) lo cual no sucede en un bosque templado. Además los patrones fenológicos de floración de las especies tropicales varían ampliamente sobre un rango geográfico, lo que no logran las especies de bosques templados.

En las plantas existe una amplia variedad de patrones de floración, particularmente en los trópicos donde estos ocurren de manera no estacional y en cualquier momento del año. La temporalidad, duración, frecuencia y sincronía definen los patrones de floración, sin embargo, estas son razones para suponer que estos cuatro parámetros interactúan entre sí para formar la diversidad de patrones de floración que observamos en la naturaleza (Bawa *et al.*, 2003). De acuerdo con Sakai (2001), los patrones de floración en las selvas tropicales pueden



ser atribuibles a factores bióticos que incluyen a las plagas, animales herbívoros, polinizadores y otras plantas que comparten polinizadores comunes, incluso predadores y dispersores de frutos y semillas. Las hipótesis sugieren que las especies que comparten polinizadores comunes separan temporalmente su floración para minimizar el traslape interespecífico que ocurriría si sucede floración simultánea, evitando con ello una ineficiente polinización o competencia por polinizadores (Stiles, 1977). Sin embargo estas hipótesis casi nunca son probadas en experimentos o campos de estudio. La mayoría de las pruebas estadísticas que separan las etapas de floración, muestran que éstas pueden ser agregadas o indistinguibles dentro de un patrón aleatorio. Otros estudios sugieren que la sincronización de la floración podría facilitar a través del aumento de la densidad de los recursos, la atracción de los polinizadores locales. La floración puede ocurrir, sin embargo, completamente fuera de fase con la abundancia de polinizadores (Zimmerman *et al.*, 1989).

La importancia de la etapa fenológica de la floración no solo es ecológica, dada su relación con la apicultura, su relevancia es de trascendencia social y económica en el sector primario, pues representa ingresos económicos y genera divisas (Güemes *et al.*, 2003).

Como se puede observar, la fenología de las plantas, particularmente la etapa de floración, está íntimamente relacionada con el clima y los animales, en consecuencia, se ha convertido en uno de los bioindicadores más confiables del efecto del calentamiento global sobre los ecosistemas (Busetto *et al.*, 2010; Gordo y Sanz, 2010; Cleland *et al.*, 2007; White *et al.*, 2006)



1.2 EL CAMBIO FENOLÓGICO DE LAS PLANTAS COMO RESPUESTA AL CALENTAMIENTO GLOBAL.

La fenología es un aspecto muy importante de la ecología vegetal y es frecuentemente subestimada desde la escala individual a todo el ecosistema. La temporalidad del cambio entre la fase vegetativa y reproductiva ocurre con la aparición de la floración, la cual es crucial para asegurar la permanencia biológica individual y de las poblaciones. La variación fenológica interespecífica de las especies es un mecanismo importante para mantener a las especies coexistiendo en diversas comunidades de plantas, mediante la reducción de competencia por polinizadores y otros recursos; en todo el ciclo fenológico de los ecosistemas está implicado la captura anual de carbono.

Los ciclos de vida de la mayoría de los organismos están fuertemente influenciados por la temperatura y la precipitación. Las condiciones actuales y futuras sobre el calentamiento global es probable que alteren las actividades estacionales de plantas y animales que responden a grados días de desarrollo (temperatura acumulada), tales como la floración o la fructificación en plantas o a los patrones migratorios de los animales. Esas posibles variaciones interanuales en la fenología podrían constituir indicadores observables altamente sensibles a los cambios de la biosfera en respuesta al actual cambio climático (IPCC, 2001).

Pero es posible que esos cambios sean, además, de importancia ecológica crítica, ya que éstos pueden afectar la estructura de los ecosistemas y su funcionalidad por la alta capacidad competitiva de las especies y/o la producción primaria neta. Datos recientes de reportes indican cambios en la etapas fenológicas de plantas, insectos, aves y anfibios (Schwartz, 2000; Menzel *et al.*, 2006; Parmesan y Yohe, 2003; Peñuelas *et al.*, 2002, Gordo y Sanz 2005), los cuales son evidencias de que los ecosistemas están respondiendo al cambio climático, aunque las bases de datos sean limitadas a ciertas regiones del planeta y para pocas especies (Peñuelas *et al.*, 2001). Existen registros históricos confiables sobre observaciones fenológicas en plantas silvestres, frutales y cultivos agrícolas. Los registros más amplios y mejor conocidos son los del Lejano Oriente y Europa, que incluyen 5000 años de registros sobre eventos fenológicos, clima y actividades agrícolas en China (Chen *et al.*, 2009), aproximadamente 1300 años de registros de floración de cerezo en Kioto (Menzel *et al.*, 2006), más de 670 años con datos sobre cosechas de uva en Europa Central,



aproximadamente 200 años de registros con datos fenológicos de plantas y animales en Reino Unido. Estos datos pueden funcionar como una referencia donde no existen datos de temperatura. El cambio en la fenología se comenzó a detectar desde mediados del siglo XX a la fecha, gracias a una red de observadores en el Lejano Oriente (Matsumoto *et al.*, 2003), Norte América (Schwartz *et al.*, 2000) y Europa (Menzel *et al.*, 2006). La mayoría de las observaciones sobre cambios fenológicos se reportan para ecosistemas templados, sin embargo, para selvas tropicales los datos son escasos, lo cual no quiere decir que los cambios fenológicos sean menores (Morellato *et al.*, 2000).

Parmesan y Yohe (2003) indican que la primavera se viene adelantando a una tasa de 2.3 días por década, mientras que Root (2003) menciona que esta tasa es de 5.1 días por década, considerando solo datos fenológicos para Europa. El estudio incluye a más de 125 000 series de observaciones de 542 plantas y 19 animales, analizados en un periodo de 1971 a 2000. Los resultados son consistentes al mostrar un adelanto de la primavera (primavera temprana) observándose en el desarrollo temprano de la etapa vegetativa y aparición de la floración y, por tanto, un adelanto del verano el cual se refleja en la maduración temprana de las frutas. Más del 75% de las especies han acelerado su fenología sobre su periodo de tiempo normal (significancia estadística para un tercio del total de las especies). La variación fenológica entre las especies tiende a atribuirse al tipo de polinización, a la forma de vida y a la época del año. Las especies que suelen aparecer en épocas tempranas de las estaciones son las que muestran mayor aceleración; y es posible que respondan al deshielo temprano (dada la selección que realizan los agricultores sobre las variedades de cultivos que respondan a la condiciones ambientales), donde el cambio que se ha observado en su fenología es de apenas 0.4 días por década, mucho menor que las especies silvestres (Menzel *et al.*, 2006).

En la zona del mediterráneo occidental algunas especies vegetales han adelantado notablemente su foliación, floración y fructificación y han alargado su fase de crecimiento desde mediados de los años setenta. Los eventos primaverales se han adelantado a tasas entre 6.5 y 7 días por grado centígrado, siendo significativamente superiores a los observados en otras áreas de Europa (Gordo y Sanz, 2010). Otros autores muestran adelantos en la foliación con promedios superiores a 20 días y retrasos en la caída de la hoja de cerca de dos semanas,



lo que implica un incremento de la duración del periodo foliar de más de un mes en promedio; coincidiendo con la variabilidad temporal observada de la coloración y caída de las hojas que muestra un retraso del otoño (Estrella *et al.*, 2006). Los adelantos en la floración se han calculado en un promedio de 22 días para el conjunto de especies con modificaciones y adelantos de la fructificación cercanos a 19 días en promedio para el último medio siglo, en diferentes especies. El adelanto de la floración y fructificación observados se aproxima o supera, en muchos casos, el mes. Los cambios más fuertes han sucedido en los últimos 25 años de registro, y no se encontraron diferencias significativas en el comportamiento de las especies según su origen natural, cultivado o exótico, o según sus calendarios fenológicos originales (Peñuelas *et al.*, 2002).

Las aves parecen estar respondiendo al calentamiento climático modificando sus comportamientos migratorios a gran velocidad. Peñuelas *et al.*, (2002) han detectado un retraso en 15 días promedio en la llegada de 6 especies de aves migrantes transaharianas a España durante los últimos 50 años (Abubilla *Upupa epos*, Golondrina común *Hirundo rustica*, Cuco *Cuculus canorus*, Ruiseñor común *Luscinia megarhynchos*, Codorniz *Coturnix coturnix* y Vencejo común *Apus apus*, todas menos la codorniz “de interés especial”). Se observa que 5 de las 6 especies muestran un retraso estadísticamente detectable, y que en 4 especies existe una relación con cambios temporales en temperatura, y en una especie existe una relación con cambios temporales en la precipitación. Este retraso en la llegada a las áreas de reproducción en España contrasta con el adelanto generalizado observado en el mismo periodo para la fenología de plantas e insectos. Durante las últimas décadas la fenología de algunas especies de insectos fitófagos podría haberse desacoplado, por efecto del cambio climático, de la de las plantas que consumen (Peñuelas *et al.*, 2002, Gordo y Sanz 2005); además los cambios fenológicos de las especies animales (polinizadores y consumidores) son diferentes a los que sufren las plantas (fechas de floración, de producción de frutos, etc.), lo que podría conducir a desacoples entre diferentes niveles tróficos y afectar a los ecosistemas y los sectores productivos (Gordo y Sanz 2009, 2010). Por todo ello, los estudios fenológicos son una poderosa herramienta para el seguimiento de la respuesta biótica al cambio climático (Moreno *et al.*, 2005).



1.3 IMPLICACIONES DE LA FENOLOGÍA EN EL CICLO GLOBAL DEL CARBONO

Uno de los objetivos en la investigación sobre el cambio climático es detectar si las plantas responden al calentamiento global amortiguando o incrementando la concentración de CO₂. Con base en Cleland *et al.*, (2007), se conoce que la cantidad de CO₂ atmosférico oscila en un ciclo anual, disminuyendo su concentración durante el verano del hemisferio norte cuando la mayor parte de la cobertura vegetal de la superficie terrestre está fijando activamente carbono mediante la fotosíntesis. Con el incremento importante de la concentración de CO₂ atmosférico, en décadas recientes se ha ampliado el ciclo estacional de crecimiento de manera significativa, apareciendo de manera temprana. En ecosistemas de altas latitudes, el adelanto de la primavera y en consecuencia la captura de CO₂ está estrechamente relacionado con el momento de la descongelación, como lo muestra McDonald *et al.*, (2004). La variación interanual de la aparición y prolongación de la estación de crecimiento influye sobre la magnitud de la producción primaria de un ecosistema (Randerson *et al.*, 2004), pero el calentamiento global propicia veranos más secos en años recientes que suprimen tal producción; una compensación potencial en la producción terrestre es la que se espera con la prolongación de la estación de crecimiento.

Uno de los métodos para medir los flujos de CO₂ atmosférico, es mediante la medición de los componentes de aire y sus movimientos ascendentes y descendentes a través de torres Eddy-Covariance, cuyos datos pueden ser usados para medir el carbono capturado por el crecimiento de las plantas y el carbono liberado por la respiración. Éste método es ventajoso sobre la colecta de muestras en frascos ya que se colectan datos continuos sobre una escala de tiempo, separando los componentes de los flujos sobre los datos discretos y aleatorios que proporcionan la colecta de muestras independientes. Con la red de torres Eddy-Covariance en Europa (EuroFlux), se ha encontrado que se incrementa la producción con el aumento de las temperaturas (que coincide con la prolongación de la estación de crecimiento) desplazando la ocurrencia incremental por respiración en el suelo (Janssens *et al.*, 2001), lo que sugiere que un mayor crecimiento de las plantas y por ende una mayor captura de carbono por la prolongación de la estación de crecimiento ocasiona un desplazamiento mucho mayor de pérdida de carbono por descomposición debido a que el calentamiento global está provocando estaciones invernales mucho más cortas.



1.4 IDENTIFICACIÓN DE PROBLEMA

Las observaciones de la superficie terrestre se han incrementado de manera importante para los estudios fenológicos y ecológicos que muestran una respuesta de cambio en el ambiente espacial y temporalmente (Pettorelli *et al.*, 2005). Los análisis multi-temporales en fenología tradicionalmente se han realizado mediante procesos de regresión o correlación entre los eventos observados y sus variables asociadas, tales como tiempo o temperatura y con mucho menos frecuencia se ha utilizado el análisis de series temporales. Los métodos tradicionales no pueden detectar cambios abruptos en la fenología que pueden ocurrir como consecuencia del cambio climático; sin embargo otras técnicas basadas en Análisis de Puntos de restauración o Puntos Cambiantes, técnicas Bayesianas, permiten una representación cuantitativa de la respuesta fenológica no lineal y asociada a tasas de cambio. Aunque las fases fenológicas específicas como la floración y fructificación no pueden distinguirse en las imágenes de satélite, la medición exhaustiva de la cubierta vegetal sobre el suelo bajo repetidas observaciones ofrecen la oportunidad de un monitoreo fenológico global, el cual no es posible con otro medio. Varios indicadores fenológicos derivan de datos satelitales disponibles, cuya dinámica está asociada a cambios en las características físicas y químicas de las plantas, específicamente en la estructura de las hojas y en los procesos fotosintéticos. Existen diversos índices para representar el verdor, los más populares son el índice de vegetación normalizado NDVI y el índice de vegetación mejorado EVI, los cuales se basan en la reflectividad de longitudes de onda pertenecientes a la parte óptica del espectro electromagnético. En estudios de contexto regional y global se han utilizado datos AVHRR y MODIS para calcular los índices de vegetación (IV) que frecuentemente son utilizados como una aproximación para la producción de las plantas (Zhang *et al.*, 2004). A pesar de la promesa de la información satelital, la interpretación de esas mediciones aún son un desafío (Huete *et al.*, 2006). Los dos mayores problemas que han impedido progreso en el desarrollo y aplicación de mediciones fenológicas derivadas de datos satelitales son: la interferencia atmosférica y la escasez de datos fenológicos de campo a nivel de bioma.

En México, se han realizado estudios utilizando a la temperatura ambiente como insumo para la generación de modelos fenológicos como una aproximación para el pronóstico de etapas en los cultivos agrícolas, basados en la metodología de grados días de desarrollo (GDD,



temperatura acumulada). Dichos modelos buscan la relación entre las variables meteorológicas y el desarrollo de plagas y enfermedades (Gillespie y Sentelhas, 2008). En particular, se usan para estimar la tasa de desarrollo de cultivos, plagas y enfermedades, en función de la temperatura ambiental (Damos y Savopoulou-Soultani, 2012), los cuales permiten pronosticar eventos desfavorables para el cultivo, a través del monitoreo de variables meteorológicas como temperatura, radiación y humedad relativa (Agrawal y Metha, 2007). En cuanto a frutales, se han implementado metodologías para evaluar adaptación de genotipos a su respectiva estacionalidad de las etapas fenológicas para buscar zonas de mejor adaptación. De los aspectos fenológicos de las comunidades vegetales naturales o inducidas, en México sólo las especies de mayor valor comercial han sido estudiadas detalladamente para su manejo, por ello resulta de particular importancia profundizar en el conocimiento de la fenología de la flora leñosa nativa y sus posibles relaciones con la precipitación y otras variables.

En México no existe una continuidad de registros sobre la fenología de la vegetación natural ni de cultivos. Dada la importancia ecológica y económica (apícola) de la floración se requiere de su caracterización en términos de presencia y duración, así como de su intensidad. Adicionalmente, se requieren metodologías para caracterizar la fenología de ecosistemas de selvas tropicales en México, los cuales almacenan las mayores cantidades de carbono en la biomasa viva de los ecosistemas del país (de Jong *et al.*, 2010), por lo que resulta indispensable conocer los patrones de evolución fenológicos ante el cambio climático y las intervenciones humanas.

1.5 ESTRUCTURA DE LA TESIS

El presente documento se encuentra escrito en formato de capítulos. Cada capítulo hace énfasis en un tema en particular de la siguiente manera:

El Capítulo I, contextualiza la investigación desarrollada, tomando como referencia el marco conceptual de la fenología y la importancia de su estudio. De la misma manera hace énfasis en la problemática del cambio climático global y su relación con la fenología, y a su vez la relación de este concepto con otros seres vivos y pone de relieve la necesidad de realizar



aportes científicos en ésta materia en el contexto nacional y su relación con la diversidad biológica del país y los ciclos biogeoquímicos, particularmente el del carbono.

En el Capítulo II, sobre la caracterización fenológica de la vegetación a nivel de campo y satelital, se analizan los principales conceptos y terminología utilizada en estudios de la fenología vegetal. Se enfoca en las metodologías de referencia para la búsqueda de patrones de floración en los diferentes ecosistemas que brinden sustento al desarrollo experimental. Se plantean escenarios simulados para obtener patrones espectrales de la floración de modo artificial pero congruente con los actuales desarrollos y apoyado con datos obtenidos mediante sensores remotos multiespectrales.

El Capítulo III, hace referencia acerca de la caracterización fenológica de bosques tropicales usando información espectral a partir de experimentos con componentes. De la misma manera brinda elementos para la generación de índices que identifiquen y caractericen la fenología de la floración.

En el Capítulo IV se plantea la generación de un Índice de Vegetación y Floración a partir de evidencias experimentales y datos de campo.

Finalmente, se realiza una discusión sobre los resultados obtenidos en esta investigación, en el tema de la caracterización fenológica de la vegetación usando información espectral.

1.6 LITERATURA CITADA

- Agrawal, R., and S. C. Metha. 2007. Weather based forecasting of crop yields, pests and diseases - IASRI models. *J. Ind. Soc. Agric. Stati.* 61(2), 255-263.
- Bawa, K. S., Kang, H., y Grayum, M. H. 2003. Relationships among time, frequency, and duration of flowering in tropical rain forest trees. *American Journal of Botany*, 90(6), 877-887.
- BBCH (Centro Federal de Investigaciones Biológicas para Agricultura y Silvicultura). 2001. *Estadios de las Plantas Mono y Dicotiledóneas*. Monografía. 149 p.
- Busetto, L., Colombo, R., Migliavacca, M., Cremonese, E., Meroni, M., Galvagno, M., y Pari, E. 2010. Remote sensing of larch phenological cycle and analysis of relationships with climate in the Alpine region. *Global change biology*, 16(9), 2504-2517.
- Chen, J., M. Shen, X. Zhu, and Y. Tang. 2009. Indicator of flower status derived from in situ hyperspectral measurement in an alpine meadow on the Tibetan Plateau. *Ecological Indicators* 9:818-823.
- Cleland, E. E., Chuine, I., Menzel, A., Mooney, H. A., y Schwartz, M. D. 2007. Shifting plant phenology in response to global change. *Trends in ecology y evolution*, 22(7), 357-365.
- Damos, P. and M. Savopoulou-Soultani. 2012. Temperature-driven models for insect development and vital thermal requirements: *Psyche* 2012. doi:10.1155/2012/123405.
- De Beurs, K. M. y Henebry, G. M. 2005: "A statistical framework for the analysis of long image time series", *International Journal of Remote Sensing*, 26 (8), 1551-1573.
- De Jong, B., C. Anaya, O. Maser, M. Olguín, F. Paz, J. Etchevers, R. Martínez, G. Guerrero, and C. Balbontín. 2010. Greenhouse gas emissions between 1993 and 2002 from land-use change and forestry in Mexico. *Forest Ecol. Manag.* 260, 1689–1701.
- Gillespie, T. J., and P. C. Sentelhas. 2008. Agrometeorology and plant disease management - A happy marriage. *Scientia Agricola* 65, 71-75.



- Güemes, R. F., G. C. Echazarreta, G. R. Villanueva, F. J. Pat y A. R. Gómez. 2003. La apicultura en la península de Yucatán. Actividad de subsistencia en un entorno globalizado, RMC, 16, pp.117-132.
- Huete, A.R.; Didan, K.; Shimabukuro, Y.E.; Ratana, P.; Saleska, S.R.; Hutyyra, L.R.; Yang, Wenze Y.; Nemani, R.R. y Myneni, R. 2006: "Amazon rainforest green-up with sunlight in dry season", Geophysical research letters. 33, pp. 1-4.
- IPCC. 2007. Climate change 2007: the physical science basis. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.), Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom/New York, NY, USA, 996 pp.
- Janssens, I. A., Lankreijer, H., Matteucci, G., Kowalski, A. S., Buchmann, N., Epron, D., ... y Valentini, R. 2001. Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests. *Global Change Biology*, 7(3), 269-27.
- Kathuroju, N., White, M. A., Symanzik, J., Schwartz, M. D., Powell, J. A., y Nemani, R. R. 2007. On the use of the advanced very high resolution radiometer for development of prognostic land surface phenology models. *ecological modelling*, 201(2), 144-156.
- Liuth, H. S., Talora, D. C., y Amorim, A. M. 2013. Phenological synchrony and seasonality of understory Rubiaceae in the Atlantic Forest, Bahia, Brazil. *Acta Botanica Brasilica*, 27(1), 195-204.
- Magaña Magaña, Miguel A., y Leyva Morales, Carlos E. 2011. Costos y rentabilidad del proceso de producción apícola en México. *Contaduría y administración*, (235), 99-119.
- Matsumoto, K., Ohta, T., Irasawa, M., y Nakamura, T. 2003. Climate change and extension of the Ginkgo biloba L. growing season in Japan. *Global Change Biology*, 9(11), 1634-1642.
- McDonald, K. C., Kimball, J. S., Njoku, E., Zimmermann, R., y Zhao, M. 2004. Variability in springtime thaw in the terrestrial high latitudes: Monitoring a major control on the



- biospheric assimilation of atmospheric CO₂ with spaceborne microwave remote sensing. *Earth Interactions*, 8(20), 1-23.
- Menzel, A., Sparks, T. H., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, R., Züst, A. N. A. 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global change biology*, 12(10), 1969-1976
- Morellato, L. P. C., Talora, D. C., Takahasi, A., Bencke, C. C., Romera, E. C., y Zipparro, V. B. 2000. Phenology of Atlantic Rain Forest Trees: A Comparative Study. *Biotropica*, 32(4b), 811-823.
- Newstrom, L.E., Frankie G.W. And Baker H.G. 1994. A new classification for plant phenology based on flowering patterns in lowland tropical rain forest trees at La Selva, Costa Rica. *Biotropica* 26:141–159
- Parada-Quintero, M., Alarcón-Jiménez, D., y Rosero-Lasprilla, L. (2012). Fenología de la floración de especies ornitófilas de estratos bajos en dos hábitats altoandinos del Parque Natural Municipal Ranchería (Paipa-Boyacá-Colombia). *Caldasia*, 34(1), 139-154.
- Parmesan C. and Yohe G. 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421, 37–42.
- Peñuelas, J., y Filella, I. 2001. Responses to a warming world. *Science*, 294(5543), 793-795
- Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J. M., Tucker, C. J., y Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in ecology y evolution*, 20(9), 503-510.
- Randerson, J. T., Field, C. B., Fung, I. Y., y Tans, P. P. 1999. Increases in early season ecosystem uptake explain recent changes in the seasonal cycle of atmospheric CO₂ at high northern latitudes. *Geophysical Research Letters*, 26(17), 2765-2768.
- Sánchez-Azofeifa, A., Rivard, B., Wright, J., Feng, J. L., Li, P., Chong, M. M., y Bohlman, S. A. 2011. Estimation of the distribution of *Tabebuia guayacan* (Bignoniaceae) using high-resolution remote sensing imagery. *Sensors*, 11(4), 3831-3851.



- Sakai, S. 2001. Phenological diversity in tropical forests. *Population Ecology*, 43(1), 77-86.
- Schwartz, M. D., y Reiter, B. E. 2000. Changes in north American spring. *International Journal of Climatology*, 20(8), 929-932.
- White, M. A., y Nemani, R. R. 2006. Real-time monitoring and short-term forecasting of land surface phenology. *Remote Sensing of Environment*, 104(1), 43-49.
- Wouters, N., De Ketelaere, B., De Baerdemaeker, J., y Saeys, W. (2013). Hyperspectral waveband selection for automatic detection of floral pear buds. *Precision Agriculture*, 14(1), 86-98.
- Zhang, P. and B. Anderson. 2004. Climate-related vegetation characteristics derived from moderate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) leaf area index and normalized difference vegetation index. *Journal of Geophysical Research*. doi:10.1029/2004JD004720.
- Zimmerman, J. K., Wright, S. J., Calderón, O., Pagan, M. A., y Paton, S. 2007. Flowering and fruiting phenologies of seasonal and aseasonal neotropical forests: the role of annual changes in irradiance. *Journal of Tropical Ecology*, 23(2), 231-251.



CAPITULO II: CARACTERIZACIÓN FENOLÓGICA DE LA VEGETACIÓN A NIVEL DE CAMPO Y SATELITAL.

RESUMEN

El conocimiento de las épocas de floración y fructificación es importante para la conservación de la biodiversidad genética de recursos vegetales. En las plantas existe una amplia variedad de patrones de floración, particularmente en los trópicos donde estos ocurren de manera no estacional y en cualquier momento del año. La temporalidad, duración, frecuencia y sincronía, definen los patrones de floración, sin embargo, estas interactúan entre sí para formar la diversidad de patrones de floración que observamos en la naturaleza. Con el objetivo de aproximar el evento de floración en un bosque tropical caducifolio o vegetación caducifolia en general, se desarrolló un experimento recreando estadios hipotéticos de floración en la naturaleza. Con los datos obtenidos de los escenarios simulados en el segmento del Rojo (660 nm) e Infrarrojo (860 nm) de espectro electromagnético y se muestra evidencia experimental a través del índice de vegetación IVIS que el patrón de crecimiento de la vegetación es sensible a la presencia de floración. Los resultados indican que posible realizar la identificación fenológica floral, utilizando información espectral.

Palabras clave: sensores remotos, simulación, fenología e índice de vegetación.



2.1 INTRODUCCIÓN

El conocimiento de las épocas de floración y fructificación es importante para la conservación de recursos genéticos y el manejo forestal de bosques primarios y secundarios pues marca los meses en los que ocurre, ayudando a la planificación de colectas de semilla y la detección de las mejores procedencias de germoplasma (Plana, 2000; Vélchez *et al.*, 2004). El conocimiento de los sistemas de reproducción de las especies es muy importante en los trópicos, ya que en éstos muchas especies presentan baja densidad natural, la cual se acentúa por actividades de extracción selectiva (Plana, 2000). Por otra parte, se sabe que los ritmos anuales de los árboles responden a los cambios en el tiempo o condiciones climáticas, por ello, el estudio de la fenología es de interés especial por los efectos de calentamiento climático sobre la condición del bosque (Chuine y Beaubien, 2001). A pesar de la gran importancia del conocimiento fenológico de las especies, éste aún es muy escaso, particularmente en las regiones tropicales (Fournier y Charpantier, 1975; Mantovani *et al.*, 2003). Esta disciplina ha recibido mucha atención durante las últimas décadas debido a que muchos organismos están cambiando sus ciclos de vida en respuesta al cambio climático actual (Parmesan y Yohe, 2003; Menzel *et al.*, 2006; Rosenzweig *et al.*, 2008). La fenología de las plantas está fuertemente controlada por el clima y, en consecuencia, se ha convertido en uno de los bioindicadores más confiables del cambio climático actual (Gordo y Sanz, 2010). En el presente capítulo se aborda el tema de la fenología desde el punto de vista conceptual para cultivos agrícolas y en ecosistemas naturales, de este último se hace énfasis a la etapa fenológica de floración tomando como antecedente las observaciones realizadas en comunidades vegetales árido-tropicales (León, 1996), selvas caducifolias y selvas perenenifolias, que en el presente trabajo de investigación se intenta sustentar los resultados de la investigación doctoral como un aporte a la ciencia en el ámbito de caracterización fenológica de la vegetación usando información espectral.

2.2 OBJETIVOS

- Integrar un marco conceptual para la caracterización fenológica de la vegetación.
- Identificar patrones fenológicos de floración en ecosistemas terrestres.
- Identificar patrones fenológicos de floración simulados usando información espectral.



2.3 HIPÓTESIS

El uso de datos espectrales permite derivar información fenológica de la vegetación de manera multitemporal, que incluya la identificación de etapas vegetativas y reproductivas de las plantas.

2.4 REVISIÓN DE LITERATURA

Un ciclo debe su origen a algo que gira iniciando en un punto y terminando en el mismo donde inició, como la descripción de un círculo. De éstos derivan los términos monociclo, triciclo, etc.; por lo tanto es el ciclo de vida de un individuo, más específicamente de una planta, que comienza y termina en el punto de origen. Las especies de plantas de acuerdo con el ciclo de desarrollo pueden ser anuales, las que cumplen todo su desarrollo dentro de un año o perennes, cuyos individuos permanecen con vida durante varios años. Las especies perennes también se agrupan en las plantas que intercalan años de latencia y plantas que en un mismo año requieren de un periodo de latencia; obviamente, el medio ambiente debe ser lo suficientemente adecuado para cumplir los requisitos de la especie, de modo que el individuo permanezca con sus ciclos en forma ininterrumpida. En el segundo grupo están las especies que, aunque perennes, llevan a cabo un ciclo anual, como las plantas eminentemente anuales. Así, surge la necesidad de estudiar y describir lo que sucede en los ciclos biológicos. La fenología es la disciplina que estudia los fenómenos biológicos que se presentan periódicamente, acomodados a ritmos estacionales y que tienen relación con el clima y con el curso anual del tiempo atmosférico en un determinado lugar (Font Quer, 1970).

El conocimiento y la comprensión de los patrones fenológicos de especies arbóreas en ecosistemas naturales son de interés básico en estudios ecológicos sobre biodiversidad, productividad y organización de las comunidades y de las interacciones de las plantas con la fauna; además, reviste gran importancia en programas de conservación de recursos genéticos, manejo forestal y planificación de áreas silvestres.

Para un mayor entendimiento de la fenología de las plantas es necesario conocer las relaciones de suelo-planta-atmosfera. Hasta el momento se conocen con aproximación los factores climáticos, edáficos y bióticos que afectan a las plantas, pero no así su morfología. Tal situación ha sido la principal causa para utilizar una escala de tiempo (DDS, Días



Después de la Siembra) y referir a ella, entre otras, las observaciones fenológicas y prácticas que se llevan a cabo en el cultivo. Al respecto, es necesario aclarar que el ciclo biológico de una planta cambia según su genotipo y los factores del clima y, por ende, plantas de un mismo genotipo sembradas en condiciones climáticas diferentes (*e.g.* 17°C y 25°C) no pueden estar en el mismo estado de desarrollo 40 DDS. De esta manera, sin desconocer la utilidad que tiene la escala de tiempo, cada vez es de mayor importancia la escala basada en la morfología de la planta y en los cambios fisiológicos que le suceden durante su desarrollo. A esta escala, que permite referir las observaciones y prácticas de manejo a etapas del desarrollo fisiológico, permitiendo realizar comparaciones con otras fuentes, se denomina escala fenológica (CIAT, 1983). Para el mayor entendimiento de esta escala es necesario definir algunos términos conceptuales tales como:

2.4.1 Crecimiento

Generalmente se entiende al crecimiento como el cambio en el volumen o en peso. Es un fenómeno cuantitativo que puede ser medido con base en algunos parámetros tales como anchura, longitud, acumulación de materia seca, longitud, número de nudos, índice de área foliar, etc.

2.4.2 Desarrollo

El desarrollo es cualitativo; se refiere a procesos de diferenciación o cambios estructurales y fisiológicos conformados por una serie de fenómenos o eventos sucesivos. Por ejemplo, la aparición de botones florales o racimos marca el cambio entre la fase vegetativa a la reproductiva de las plantas.

2.4.3 Fases del desarrollo

La aparición, transformación o desaparición rápida de los órganos vegetales se llama fase.

El ciclo biológico de las plantas se divide en dos fases sucesivas: la fase vegetativa y la fase reproductiva.

2.4.3.1 Fase vegetativa

La fase vegetativa se inicia cuando se le brindan a la semilla condiciones para iniciar la germinación y termina cuando aparecen los primeros botones florales. En esta fase se



desarrolla la estructura vegetativa necesaria para iniciar la actividad reproductiva de la planta. En la fase vegetativa el desarrollo de los meristemos terminales del tallo y de las ramas produce nudos en los cuales se forman complejos axilares susceptibles de un desarrollo posterior.

2.4.3.2 Fase reproductiva

Esta fase se encuentra comprendida entre el momento de la aparición de los botones florales ó racimos y la madurez a cosecha. En plantas con crecimiento indeterminado continúa la aparición de estructuras vegetativas, lo cual hace posible que una planta esté produciendo simultáneamente hojas, ramas, tallos, flores y frutos.

2.4.4 Etapas del desarrollo

Una etapa está delimitada por dos o más estadios sucesivos. Dentro de ciertas etapas se presentan períodos críticos, que son el intervalo breve durante el cual la planta presenta la máxima sensibilidad a determinado elemento, de manera que las oscilaciones en los valores de este fenómeno meteorológico se reflejan en el rendimiento del cultivo; estos periodos críticos se presentan generalmente poco antes o después de las fases, durante dos o tres semanas. El comienzo y fin de fases y etapas sirven como medio para juzgar la rapidez del desarrollo de las plantas (Torres, 1995).

2.4.5 Estadios

Son divisiones dentro de un sub periodo que caracteriza una etapa. Son momentos específicos dentro del ciclo de un individuo, mas no necesariamente de transformación como son las fases, es decir pueden encargarse de la descripción del número de hojas durante la fase de desarrollo vegetativo. Los estadios sugieren la necesidad de escalas fenológicas para caracterizar de manera correcta las fases, por ejemplo la de emergencia de las plantas o la de floración.

2.4.6 Escala Fenológica BBCH

Uno de los vocabularios fenológicos comunes necesarios es la descripción uniforme de los estadios de crecimiento de las plantas, basada en sus características fenológicas. La agricultura, la agrometeorología y las aseguradoras agrícolas usan estadios fenológicos de



plantas con objetivos diferentes. También las ciencias botánicas aplicadas usan estadios de desarrollo fenológicos. La escala extendida BBCH (Hack *et al.*, 1992) es un sistema para una codificación uniforme de identificación fenológica de estadios de crecimiento para todas las especies de plantas mono y dicotiledóneas. Este sistema utiliza un código decimal basado en Zadocks *et al.*, (1974), se divide principalmente entre los estadios de crecimiento principal y secundario. Esta escala se considera como general para todas las especies, elaborándose las escalas individuales a partir de ella. La escala general puede ser aplicada en aquellas especies para las cuales no existe una escala individual.

2.4.6.1 Organización de la escala

El ciclo completo de desarrollo de las plantas se subdivide en diez fases principales de desarrollo claramente distinguibles. Estos *estadios principales de crecimiento*, son descritos usando números del 0 al 9 en orden ascendente (ver Figuras 2.1a y 2.1b). Los estadios principales de crecimiento son descritos en el cuadro 2.1.

Cuadro 2.1 Estadios principales de crecimiento (Hack *et al.*, 1992)

Estadio	Descripción
0	Germinación, brotación, desarrollo de la yema
1	Desarrollo de las hojas (brote o tallo principal)
2	Formación de brotes laterales / macollamiento (ahijamiento)
3	Crecimiento longitudinal del tallo o crecimiento en roseta, desarrollo de brotes (retoños)/ encañado (tallo principal)
4	Desarrollo de las partes vegetativas cosechables de la planta o de órganos vegetativos de propagación / embuchamiento
5	Emergencia de la inflorescencia (tallo principal) / espigamiento
6	Floración (tallo principal)
7	Desarrollo del fruto
8	Coloración o maduración de frutos y semillas
9	Senescencia, comienzo

Los estadios secundarios son usados para describir con precisión fases cortas del desarrollo de plantas. En contraste a los estadios principales de crecimiento, estos son definidos en pasos cortos de desarrollo de las respectivas especies de plantas, ocurriendo durante un determinado estadio principal de desarrollo. Estos también son codificados usando números de 0 a 9. La combinación de los números de un estadio principal de crecimiento y el número de un estadio secundario de crecimiento conducen al código digital de 2 cifras. En el caso

de la escala BBCH, la descripción de un estadio de crecimiento está basada en las características principales de una planta individual. Si la escala es usada para describir un estadio de desarrollo de una población de plantas, la descripción debe por lo menos describir el 50% de la población de plantas.

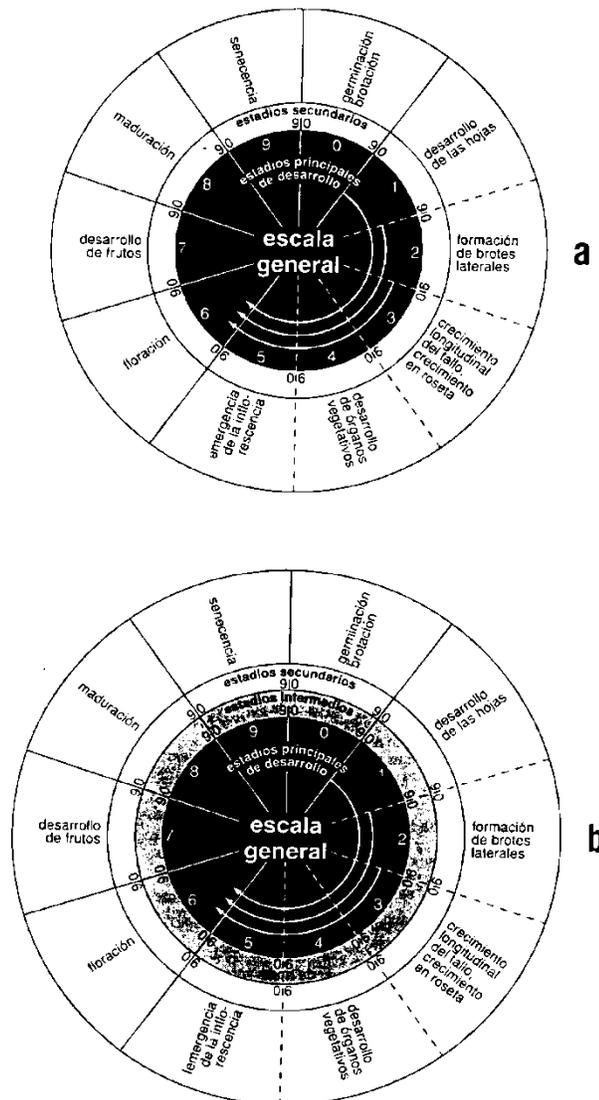


Figura 2.1 El ciclo de desarrollo de plantas mono y dicotiledóneas dividido en estadios de desarrollo principales y secundarios (a) y en estadios de desarrollo principales, mesoestadios y secundarios (1b). Los mesoestadios están insertados entre los estadios principales y secundarios. Esquemas modificados de un esquema de Witzemberger (Hack *et al.*, 1992).



2.4.7 Patrones fenológicos de floración en ecosistemas áridos y caducifolios

La producción periódica de las estructuras vegetativas y reproductivas (fenología) es resultado de las interacciones entre factores bióticos y abióticos que determinan el tiempo más adecuado para el crecimiento y la reproducción de las plantas (van Schaik *et al.*, 1993). Entre los eventos fenológicos, la floración es un proceso importante al influir en la formación de los frutos y al afectar a muchos animales que dependen del néctar como recurso energético (Parada *et al.*, 2012). Se ha tratado de probar que la incidencia y la intensidad de la floración regula selectivamente variables como la abundancia de fauna (polinizadores y sus predadores), así como la competencia intra e interespecífica de insectos por polen y néctar (Waser, 1979; Thomson, 1980; Zimmerman *et al.*, 1989, 2007; Gross y Werner, 1983; Fenster, 1991, Newstrom *et al.*, 1994). Adicionalmente, se ha abordado el efecto que los factores ambientales ejercen sobre este evento (Hodgkin y Quinn, 1978; Dieringer, 1991); las interacciones mutualistas planta-insecto (Waser y Real, 1979; Herrera, 1993; Scott *et al.*, 1993; Peñuelas *et al.*, 2002; Gordo y Sanz 2005, Sakai, 2001); y la relación entre la dispersión de polen y el entrecruzamiento genético de los vegetales (Waller, 1979; Gordo y Sanz, 2009, 2010). La fenología vegetativa (botones foliares y posteriormente hojas, ramitas, tallos y cortezas) de individuos perennes se encuentra íntimamente relacionada con la disponibilidad de agua como factor causal del proceso de síntesis (Lieberman y Lieberman, 1984; Fanjul; Parada *et al.*, 2012) y por tanto es relativamente fácil de predecir, en tanto que la fenología reproductiva o floral (desarrollo de flores y frutos) depende de la compleja interacción de una serie de factores endógenos y exógenos que intervienen en la inducción de la floración tales como temperatura ambiental, fotoperiodo, humedad ambiental, etc. Uno de los factores que más intervienen en los patrones y duración de la floración es la disponibilidad de agua en selvas tropicales caducifolias y en ambientes árido-tropicales (Parada *et al.*, 2012), lo que permite establecer tres categorías para dichos patrones (Croat, 1975):

1. **Floración inducida por las lluvias.** Como efecto de la incidencia de la precipitación pluvial estas especies presentan una rápida respuesta de floración, inclusive con la formación de estructuras vegetativas. Dentro de la clase caben, desde luego, las especies anuales, las herbáceas que se mantienen latentes en bulbos y raíces, varias



leñosas y casi todas las trepadoras. Las que son estrictamente anuales inician su ciclo de vida en condiciones de disponibilidad de ciertos niveles mínimos de agua en el suelo, generalmente las ubicadas en sitios con sombra pueden alargar la floración y fructificación durante dos o tres meses. Trabajos en México de Shreve (1951), permitieron distinguir entre las anuales del Desierto Sonorense las "efímeras de invierno" y las "efímeras de verano", clasificación que hace alusión a las que en mayor proporción aparecen en la temporada referida en respuesta a las precipitaciones, sin excluir totalmente su presencia en la otra.

2. **Floración en la temporada de sequía.** Comprende casi íntegramente especies leñosas que desarrollan sus flores y frutos, de manera preferente durante la temporada seca y cálida (marzo-julio), y en menor grado en la más "fresca" (octubre-diciembre). La aparición de órganos reproductores sexuales de las especies de esta clase es altamente predecible, por no responder directamente a la incidencia de las lluvias. Es posible que el patrón y los niveles de precipitación pluvial de la temporada previa participen en cierta medida en la intensidad de la floración en los años de observación, como ha demostrado Beatley (1974) en especies leñosas de ambientes desérticos y Keeley (1987) para ciertas plantas de la vegetación de chaparral. Ambos autores coinciden en que, al menos en esas comunidades, la influencia ambiental del patrón térmico y la fotoperiodicidad pueden tener también incidencia como agentes disparadores y reguladores de los procesos fenológicos. Siendo la lluvia un factor climático de difícil predictibilidad, la regularidad de la floración y fructificación de las especies que pertenecen a esta categoría es de considerable importancia en el sostenimiento de la fauna de la localidad. En México, gran parte de estas plantas prolongan sus eventos fenológicos por varios meses; por ejemplo, las cactáceas *Lophocereus schottii*, *Stenocereus thurberi*, *S. gummosus* y *Pachycereus pringlei*, así como el "mezquite" (*Prosopis spp*), se mantienen en floración de dos a cinco meses, y en fructificación de uno a tres meses.
3. **Floración sostenida.** En esta clase caben especies leñosas y herbáceas perennes en las que es posible encontrar individuos en floración siguiendo un patrón irregular. Algunas de estas plantas producen órganos de reproducción sexual durante todo el año, otras en la mayor parte de los meses, y unas más en períodos poco predecibles.

Ante la precipitación, varias de estas plantas intensifican su floración y crecimiento vegetativo, tal es el caso de *Encelia californica* y *Melochia tomentosa*. Los individuos de *Bursera microphylla* (especie poligamodioica) presentan varios episodios de antesis, anteriores y posteriores al período de lluvias. La floración de *Fouquieria diguetii* ocurre generalmente a lo largo del año; su intensidad y duración podrían depender del nivel de las precipitaciones de las estaciones previas. En *Cyrtocarpa edulis*, el fenómeno en cuestión se presenta reiteradamente, hasta 2 ó 3 veces por individuo, dentro del período abril-septiembre.

Con base en los resultados de Parada *et al.*, (2012) de un estudio sobre fenología floral de una comunidad árido-tropical de Baja California Sur, México; con observaciones realizadas de 1988 y 1989, (Figura 1.2), se obtuvo un patrón fenológico reproductivo, mostrando que para las "herbáceas", dadas las precipitaciones invernales de principios de 1989, se pudieron restablecerse notablemente, lo que coincide con Beatley (1974), que menciona que en el Desierto de Mojave (Suroeste de Estados Unidos) se requieren niveles mayores de 25 mm de lluvia (de patrón invernal) para iniciar procesos fenológicos vegetativos y reproductivos en especies anuales.

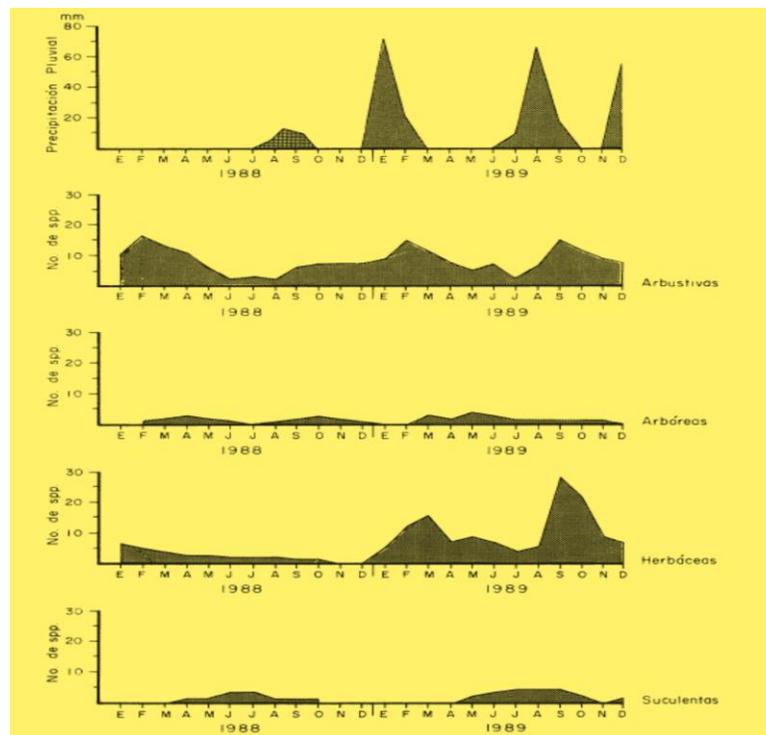


Figura 2.2 Patrón de floración de plantas vasculares de “El Comitán”, en la Bahía de la Paz, B.C.S., para los años 1988 y 1989 (Parada *et al.*, 2012).

Parada *et al.*, (2012) encontró que el grupo de las plantas arbustivas se mantiene en floración durante todo el año y es en el otoño y el invierno cuando se manifiesta su máximo. En las arbóreas, el fenómeno es casi continuo a través del ciclo anual. En ambos estratos se puede considerar que ésta continuidad floral puede ser resultado de dos estrategias: 1) período individual continuo, con la floración de cada miembro de la especie "x" prolongándose por meses, con o sin pico de mayor sincronía (denominado "floración extendida" por Scott y Hews [1995]); 2) período individual discontinuo, en el cual la época de floración de la especie "y" es la adición del lapso de cada uno de sus individuos, ya sea corto o largo, dando como resultado un relativamente extenso período fenológico para la especie. Aunque se encontraron especies perennifolias y facultativas (árboles y arbustos); el resto es francamente decíduo durante el período de marzo a julio. Casi todas las suculentas presentan un solo período reproductivo en el año, su máximo se registra durante la temporada seca y cálida, prolongándose el fenómeno con menor frecuencia en la época caliente y húmeda.

Otro estudio realizado en una selva baja caducifolia de Chamela, Jalisco, México (Bullock y Solís-Magallanes, 1990), monitoreada por más de tres años, se encontró una elevada sincronía de la floración en el estrato arbóreo, misma que se presentó después de las primeras lluvias hacia la mitad del año; en éste ecosistema donde más del 50% de las especies se mantienen en floración por espacio de 1 a 2 meses, produciendo a la vez hojas y flores. Parada *et al.*, (2012) comparó los periodos de floración entre el ecosistema árido-tropical y la selva baja caducifolia de Chamela, éste último tiene periodo de floración que no va más allá de 5 meses como el sitio de El Comitán, B.C.S.

2.4.8 Patrones de floración en selvas tropicales

Con base en Ochoa-Gaona *et al.*, (2008), los factores abióticos que pueden influir en la variación temporal de la fenología reproductiva de las especies, se ha enfatizado en las horas de brillo solar, la humedad relativa, la temperatura y la precipitación, siendo ésta última la principal variable estudiada en la fenología tropical (Vílchez y Rocha 2004). Ochoa-Gaona *et al.*, (2008) caracterizaron la fenología reproductiva de las especies de árboles más comunes

de los bosques de Tenosique, Tabasco para sentar bases para el manejo y conservación de la selva alta perennifolia. Sus resultados indican un patrón de floración bimodal, con un periodo mayor en marzo y abril que corresponden a meses con menor precipitación, que de acuerdo con Sun *et al.*, (1996) es el periodo con mayor insolación. En julio se presentó el segundo pico de floración correspondiendo igualmente a un decremento de la precipitación.

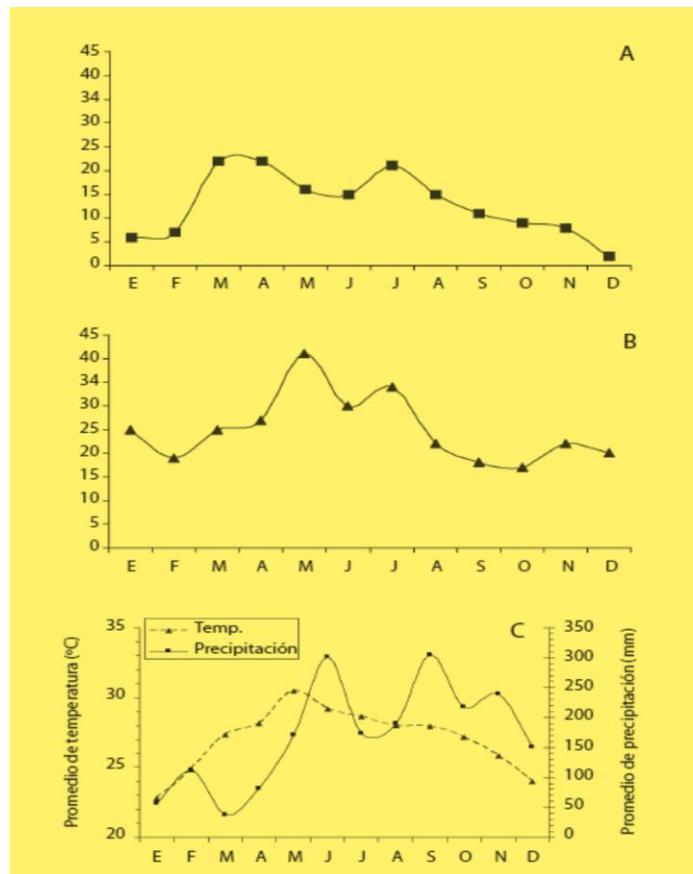


Figura 2.3 Fenología de las especies arbóreas. (A) Número de especies en floración, (B) Número de especies en fructificación, y (C) Distribución del promedio de temperatura y precipitación de 2003-2005 (Ochoa-Gaona, 2008).

Aunque no se encontró una relación significativa entre la fenología reproductiva y la precipitación, el pico de floración coincide en la época de menor precipitación, lo cual concuerda con lo reportado para especies arbóreas por Ochoa-Gaona y Domínguez-Vázquez. (2000) en la Selva Lacandona, Chiapas en condiciones tropicales similares. Por otra parte, Wright y van Schaik (1994) reportan la coincidencia de un periodo de mayor floración en árboles en el periodo de mayor sequía que se corresponde con una fase de mayor irradiación



y de menores niveles de plagas por insectos. Morellato *et al.*, (2000) en un estudio realizado con especies arbóreas en el sureste de Brasil, encontraron que el periodo de floración y de producción de hojas nuevas ocurrió poco antes del periodo de mayor humedad, relacionándolo con la longitud del día y temperatura.

Aunque la secuencia estacional de la floración es sumamente variable, de acuerdo con lo reportado por Borchert (1983), los patrones de floración se relacionan mejor con gradientes altitudinales, por ejemplo, en tierras de bajas altitudes como una selva caducifolia de Guanacaste (Costa Rica), la caída de hojas seguida de la floración en *Tabebuia rosea* (Bertol.) al inicio de la época seca, mientras que a altas elevaciones donde ocurre menor evaporación durante la época seca, la caída de las hojas y subsecuente floración alcanzó su máximo en febrero a 800 msnm, a los 900 msnm ocurrió posteriormente en marzo y a los 1200 msnm en mayo y junio (Fournier, 1969). En sitios menos húmedos, las hojas cayeron al inicio de la época de secas y la humedad de lluvias aisladas posteriores desencadenó una abundante floración en árboles desnudos. En sitios con humedad intermedia, los árboles arrojaron sus hojas lentamente durante al inicio de la época seca, presentando una floración moderada durante la temporada seca, la cual continuó hasta después de la época lluviosa. En sitios húmedos de vegetación ribereña, las hojas nuevas emergieron antes que las hojas viejas hubieran caído y la floración no ocurrió en la temporada de observación. En lugares a gran altitud con mediana evaporación (*T. neochrysa* como *T. rosea*) ocurre la floración inmediatamente después de la caída de hojas. Para esta especie, independiente de los efectos del gradiente altitudinal, la secuencia de la fenología de la floración puede tomarse como inicio la caída de hojas (Figura 2.5, A-D).

Con base en Borchert (1983), así como trabajos realizados por Figueroa y Fournier (1996), la detonación más importante de la brotación en *T. rosea* ocurre al inicio de la época lluviosa (Figura 2.4 a) y se completa dos o tres meses después. Al interior del árbol, algunas ramas se someten a una segunda detonación de brotación. Muchos brotes llevan consigo yemas florales que permanecen en latencia por varios meses. Cuando las hojas se separan (abscisión) del árbol en la época seca (Figura 2.4 b), las yemas florales se hinchan y se alargan (Figura 2.4 c) para que las flores rosas se desplieguen (Figura 2.4 d).

Frecuentemente, las hojas de la parte superior de la copa del árbol, caen antes que las de la parte de abajo, por tanto las flores aparecen primero en la parte superior del árbol. El desarrollo de frutos sucede durante los siguientes meses posteriores a la antesis (periodo estrictamente de florescencia o floración, el tiempo en que se expande la flor hasta llegar a su estado funcional y pueda polinizarse), frecuente está acompañado simultáneamente por el crecimiento de las hojas y de nuevos brotes (Figura 2.4 e)

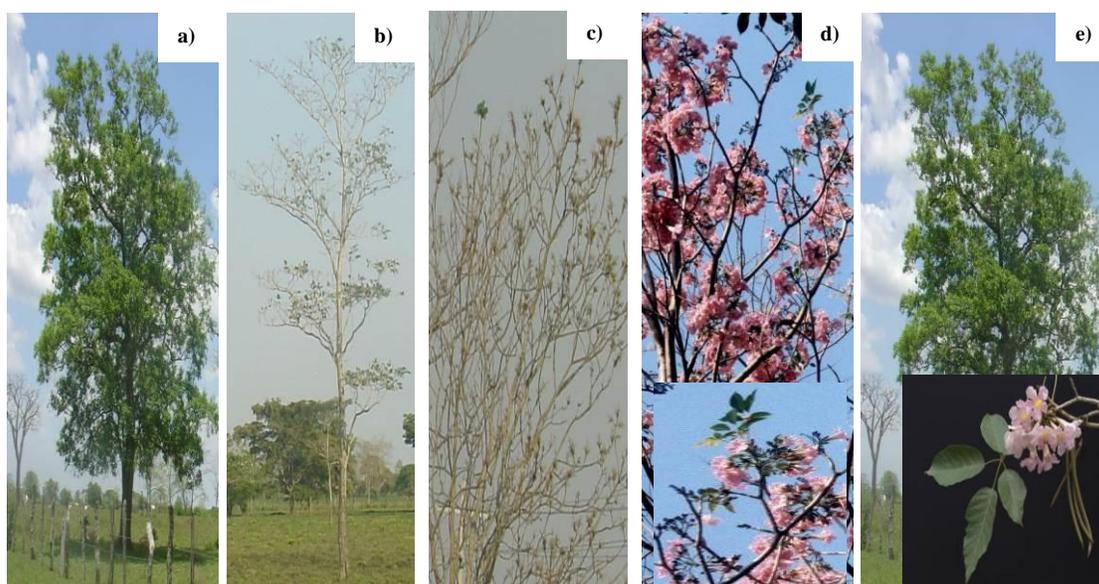


Figura 2.4 Fotograma del ciclo fenológico de floración *Tabebuia rosea* (Bertol.). a) Foliación y desarrollo vegetativo, b) Defoliación, c) Brotación, d) Floración, e) Foliación y desarrollo vegetativo. Elaboración propia con fotografías (d y e) del Smithsonian Tropical Research Institute (<http://www.stri.si.edu/>, 8/08/2014)

Ochoa-Gaona (2008) señala que en las montañas de Tenosique no se presenta una estacionalidad marcada que favorezca la pérdida del follaje, por lo que el bosque tropical de esta región se puede caracterizar como perennifolio. Al respecto Borchert (1998) señala que en la Amazonia, reducciones de la precipitación anual de >2 500 mm a alrededor de los 1 800 mm no afectaría la fisonomía del bosque. No obstante, algunas especies pueden perder sus hojas totalmente (*e.g. Cedrela odorata*) durante el período de menor precipitación (marzo-abril), en tanto que la brotación ocurre después de lluvias pronunciadas (*e.g. Cedrela mexicana*). La brotación estacional finaliza con la aparición de las inflorescencias seguidas de la apertura de numerosas florecillas (Figura 2.5 I); de acuerdo con este mismo autor y para las condiciones climáticas de San José, Costa Rica, caída de las hojas, la floración para

Erythrina poeppigiana son marcadamente asincrónicas entre los árboles de la misma población, lo que sugiere un fuerte control endógeno del desarrollo del árbol. Durante un año, los árboles pasan a través de dos ciclos, por la caída de las hojas y la aparición de brotes. La periodicidad endógena del desprendimiento de las hojas, principalmente, es el resultado de la senescencia foliar y no de un mecanismo para disminuir la evapotranspiración. La fenología de *Erythrina* responde de igual manera a un gradiente altitudinal y al déficit de humedad mostrando la transición de un árbol de hoja perenne a uno de hábito caducifolio. Con el aumento creciente de la sequía, las etapas de desarrollo consecutivas tienden a estar más separados en el tiempo y más sincronizadas (Figura 2.5 K a la M). En los climas tropicales húmedos, que se caracteriza por la ausencia de estrés ambiental significativo, el desarrollo periódico de *Erythrina* se caracteriza principalmente por variables como la edad de la hoja y el tamaño de los árboles, lo cual afecta el equilibrio funcional interno del árbol. El aumento de estrés ambiental en ambientes tropicales más probable la sequía, puede sincronizar en segundo lugar ciertas fases de la ritmicidad endógena básica con los cambios climáticos estacionales.

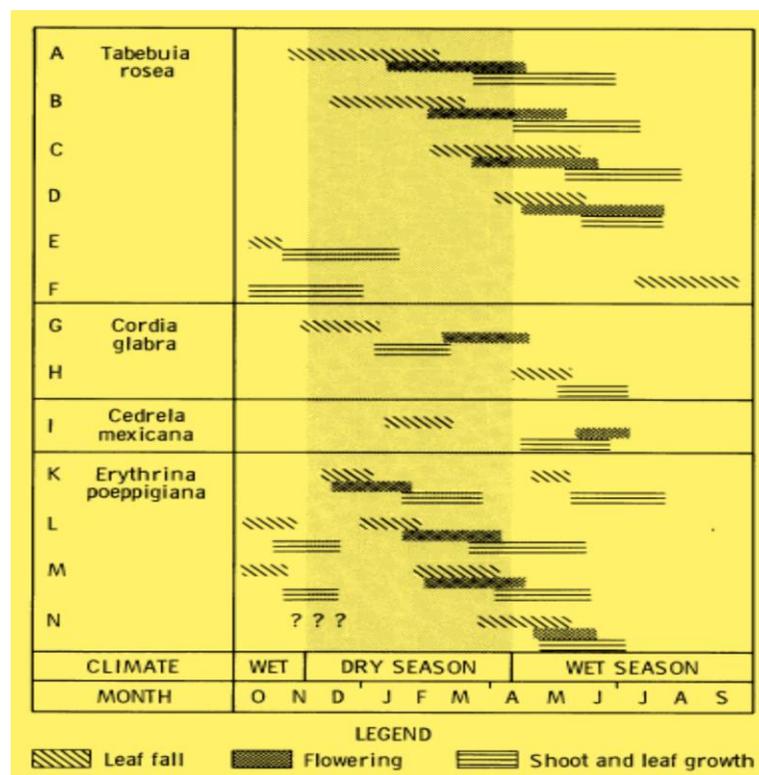


Figura 2.5 Patrones de fenológicos de floración de una selva tropical (Borchert, 1983)



2.5 PROBLEMÁTICA

A pesar de la gran importancia del conocimiento fenológico de las especies, éste aún es muy escaso y fragmentado, particularmente en las regiones tropicales (Fournier y Charpantier, 1975; Mantovani *et al.*, 2003). A la fecha, en México sólo las especies de mayor valor comercial han sido estudiadas detalladamente para su manejo, por ello resulta de particular importancia profundizar en el conocimiento de la fenología de la flora leñosa nativa y herbácea, así como sus posibles relaciones con el ambiente y su respuesta al cambio climático.

2.5.1 La fenología a escala del ecosistema y global: sensores remotos

Las observaciones de la superficie terrestre se han incrementado de manera importante para los estudios fenológicos y ecológicos que muestran una respuesta de cambio en la parte espacial y temporal (Pettorelli *et al.*, 2005). Aunque las fases fenológicas específicas como la floración y fructificación no pueden distinguirse aparentemente en las imágenes de satélite, la medición exhaustiva de la cubierta vegetal sobre el suelo bajo repetidas observaciones ofrecen la oportunidad de un monitoreo fenológico global, el cual no es posible con cualquier otro medio. Varios indicadores fenológicos derivan de datos satelitales disponibles, cuya dinámica está asociada a cambios en las características físicas y químicas de las plantas, específicamente, en la estructura de las hojas y en los procesos fotosintéticos. Existen diversos índices para representar el verdor, los más populares son el índice de vegetación de diferencias normalizadas NDVI y el índice de vegetación mejorado EVI, los cuales se basan en la reflectancia en longitudes de onda corta del espectro electromagnético (Zhang *et al.*, 2004). En estudios de contexto regional y global se han utilizado datos de los sensores AVHRR y MODIS para calcular los índices de vegetación (IV). AVHRR tiene una serie temporal que data desde 1978, lo cual permite generar una serie de tiempo suficientemente larga para estudiar la dinámica de la vegetación y sus cambios (Myneni *et al.*, 1998; 2001 y Brown *et al.*, 2006). Por su parte, MODIS se diseñó para realizar estudios de vegetación, con mejores características en resolución espacial, exactitud horizontal y corrección atmosférica. La desventaja de MODIS frente a AVHRR es su serie temporal, que apenas supera su primera década. Las siguientes ecuaciones pertenecen a los índices de vegetación NDVI y EVI, utilizados en estudios de caracterización de la vegetación:



$$NDVI = [(IRC - Rojo) / (IRC + Rojo)] \tag{1}$$

$$EVI = G * [(IRC - Rojo) / (C1 + IRC + C2 * Rojo - C3 * Azul)] \tag{2}$$

Donde,

IRC: Infrarrojo cercano

NDVI: Normalized difference vegetation index

EVI: Enhanced Vegetation Index

C1 = 1.0 Factor ajustado para suelo desnudo

C2 = 6.0 Coeficiente de resistencia atmosférica

C3 = 7.5 Coeficiente de resistencia atmosférica

G = 2.5 Gain factor.

Las ecuaciones fueron tomadas de la guía del usuario de los IV MODIS (Solano *et al.*, 2010).

2.5.2 Seguimiento espectral de la vegetación natural.

Con base en Paz *et al.*, (2011), el desarrollo de curvas de crecimiento de la vegetación (pastizales y matorrales) plantea retos importantes por la falta de datos en México. La tecnología de sensores remotos en plataformas espaciales, por medio de índices de vegetación o IV, permite realizar una aproximación, en este sentido, por lo que generaron curvas de crecimiento de la biomasa a partir de modelación paramétrica (mediciones indirectas) con imágenes AVHRR y MODIS. Las curvas resultantes, en términos históricos, se pueden usar en estudios de cambio climático y manejo de agostaderos en México.

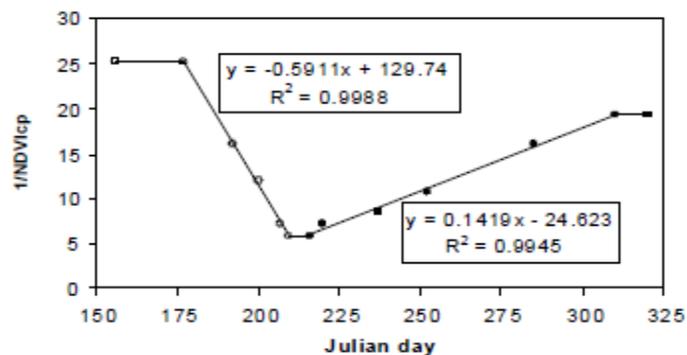


Figura 2.6 Patrón de crecimiento de un pastizal durante el transcurso de año caracterizado por la variación del índice espectral NDVIcp (Paz *et al.*, 2011)

En el caso de la floración de la vegetación, los patrones se han estudiado poco a nivel satelital. Considerando lo anterior, Paz *et al.*, (2011) reportó la evolución temporal de un índice de vegetación (IVg) asociado a vegetación natural, que de manera esquemática se presenta en la Figura 1.6. El esquema muestra las observaciones realizadas a nivel de pixel de la selva de Yucatán, en el que se puede ver una curva de crecimiento de la vegetación en dos etapas (picos). Del IVg en relación al tiempo (día juliano o DJ), donde la letra D representa una depresión y la P un pico. El modelo general tiene tres depresiones y tres picos, con un inicio (II) y un final (FF).

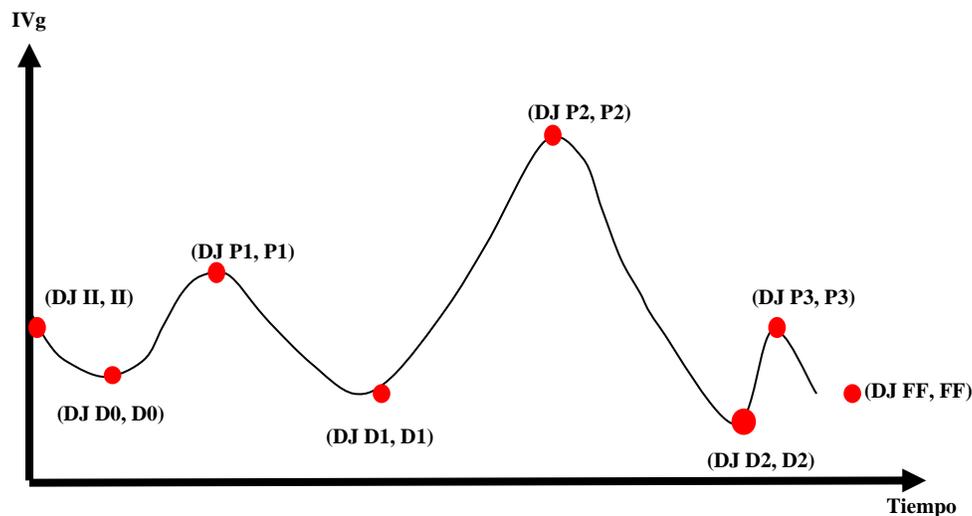


Figura 2.7 Esquema del modelo paramétrico general del crecimiento de la vegetación natural, índice espectral IVg. P, se refiere a puntos máximos de crecimiento y DII, se refiere a decrecimiento o bien a senescencia dados en el transcurso de un año.

El patrón de crecimiento de la vegetación representado como una línea curva con picos y depresiones que implican un “avance” o “retroceso” del color verde de la biomasa de la vegetación. En el caso de la floración, usando el IVg, la curva sufre un retroceso (depresión de la curva) esta es detectada por el cambio del color (bandas del visible) de las flores, principalmente (Figura 2.8).

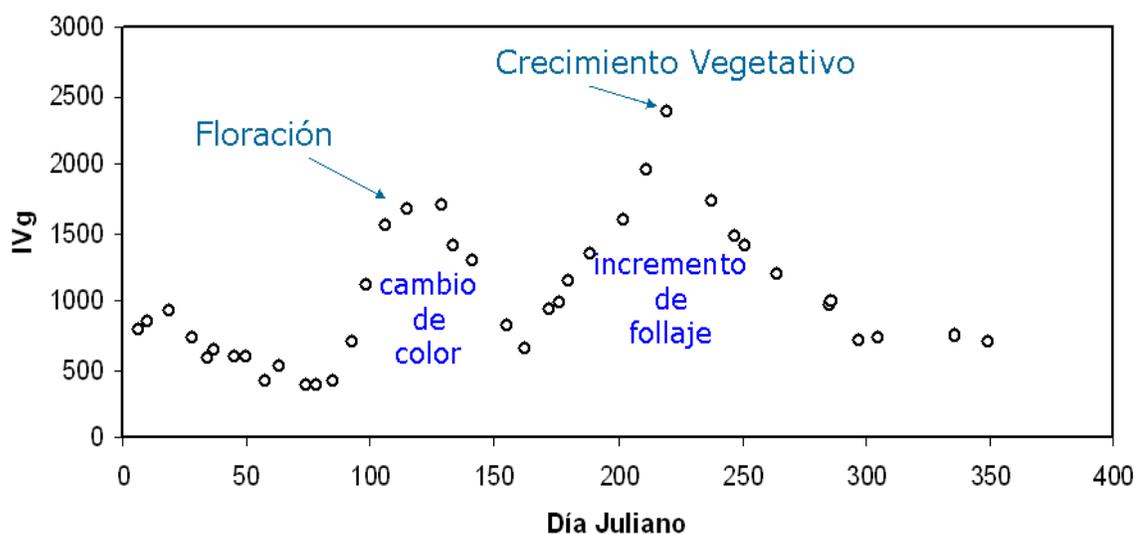


Figura 2.8 Etapas de floración y del crecimiento vegetativo de la vegetación natural.

Teóricamente, estos cambios en el “avance” o “retroceso” del verde obedecen a los cambios fenológicos en la plantas asociados a los cambios estacionales e incluyen variaciones en la duración de los días y la luz del sol, precipitaciones, temperatura y otros factores determinantes de la vida de las plantas. Uno de estos cambios es la etapa fenológica de la floración que dentro de la curva de la Figura 1.8, se muestra como una caída del IVg en sus inicios y al final de la supuesta floración, la curva vuelve a tomar su forma incremental posteriormente. Sin embargo no existe evidencia científica experimental y de campo que demuestre que la caída de la curva se deba a dicha etapa. Además la caída del IVg por efecto de floración implica una disminución de la biomasa, lo cual puede enmascarar el valor real del IVg subestimando la cantidad de vegetación, por lo que es necesario:

- a) Mostrar evidencia experimental de la floración en el patrón de crecimiento de la vegetación.
- b) Generar un índice de vegetación para la detección de floración, sin excluir la vegetación.

2.6 MATERIALES Y MÉTODOS

Con base en Bawa *et al.*, (2003), en las plantas existe una amplia variedad de patrones de floración, particularmente en los trópicos donde estos ocurren de manera no estacional y en cualquier momento del año. La temporalidad, duración, frecuencia y sincronía definen los patrones de floración; sin embargo, estas son razones para suponer que estos cuatro parámetros interactúan entre sí para formar la diversidad de patrones de floración que observamos en la naturaleza. Con el objetivo de aproximar el evento de floración en un bosque tropical caducifolio o vegetación caducifolia en general, se desarrolló un experimento usando el enfoque propuesto por Ge *et al.*, (2006), donde la vegetación y sus estadios fenológicos se generan a partir de componentes (*e.g.* tallos, yemas, flores abiertas y postflores), al cambiar sus proporciones. En esta investigación, para mostrar evidencia experimental, se simplificaron los procesos de floración planteando escenarios simulados con base en los trabajos realizados por Parada *et al.*, (2012), Bullock y Solís-Magallanes (1990), Ochoa-Gaona *et al.*, (2008) y Borchert, (1983) quienes reportan estacionalidad de la floración y crecimiento vegetativo para épocas secas y húmedas, respectivamente, de selvas

Figura 1.8.



Figura 2.9 Fotografía del ciclo fenológico de floración con base a su estacionalidad. a) Foliación y desarrollo vegetativo, b) Defoliación, c) Brotación, d) Floración, e) Foliación y desarrollo vegetativo. Elaboración propia con fotografías de campo.

Para integrar los fitolementos en cada escenario simulado y con base a los trabajos de Borchert (1983), se seleccionaron plantas que siguieran un patrón fenológico similar al de un frutal caducifolio (manzano), bajo la hipótesis que los árboles tropicales de referencia se conducen bajo el mismo patrón el cual puede describirse bajo la escala fenológica BBCH (Hack *et al.*, 1992).

Cuadro 2.2 Codificación Fenológica de especies Caducifolias, en la escala de la BBCH (Hack *et al.*, 1992)

Código	Descripción	Imagen
Estadio principal 0. Desarrollo de las yemas		
00	Letargo: yemas foliares y florales, cerradas y cubiertas de escamas marrón-oscuro	
01	Comienzo del hinchado de las yemas foliares: escamas, de marrón claro, visibles; escamas, con filos ligeramente coloreadas	
03	Fin del hinchado de las yemas foliares; escamas separadas; secciones de las yemas, verde claro, visibles	
09	Ápices foliares verdes, visibles; las escamas marrones caen; las yemas florales, encerradas por escamas verde claro	
Estadio principal 1. Desarrollo de las hojas		
10	Primeras hojas se separan; escamas verdes comienzan a abrirse; hojas comienzan a emerger	
11	Primeras hojas, desplegadas; eje de brote en desarrollo, visible	
19	Primeras hojas alcanzan tamaño varietal típico	
Estadio principal 3. Crecimiento longitudinal de los brotes terminales ¹⁾		
31	Empieza a crecer el brote: los ejes de los brotes en desarrollo, visibles	
32	Brotes, con 20 % de la longitud varietal final	
33	Brotes, con 30 % de la longitud varietal final	
3.	Los estadios continúan hasta ...	
39	Brotes con 90% de la longitud varietal final	

Brote de la yema terminal.

Código	Descripción	Imagen
Estadio principal 5. Aparición del órgano floral		
51	Yemas de la inflorescencia hinchadas: yemas, cerradas; escamas, de color marrón claro, visibles	
53	Apertura de la yema: escamas, separadas; sectores de las yemas, verde claro, visibles	
54	Inflorescencia encerrada por escamas verde claro si las escamas existen (no todas las variedades las tienen)	
55	Yemas florales simples (aún cerradas) sobre pedúnculos cortos; escamas verdes, ligeramente abiertas	
56	Los pétalos florales, alargándose; sépalos cerrados; flores simples separándose	
57	Sépalos, abiertos; ápices de los pétalos, visibles; flores simples con pétalos blancos o rosados	
59	Estadio de balón: La mayoría de las flores, con pétalos formando una bola hueca	
Estadio principal 6. Floración		
60	Primeras flores, abiertas	
61	Comienzo de la floración: alrededor del 10 % de las flores, abiertas	
62	Alrededor del 20 % de las flores, abiertas	
63	Alrededor del 30 % de las flores, abiertas	
64	Alrededor del 40 % de las flores, abiertas	
65	Plena floración: alrededor del 50 % de las flores están abiertas	
67	Flores marchitándose: la mayoría de los pétalos, caídos	
69	Fin de la floración: todos los pétalos, caídos	

Código	Descripción	Imagen
Estadio principal 7. Formación del fruto		
71	Crecimiento del ovario ; los frutos no cuajados se caen.	
72	El ovario verde, rodeado de las coronas de pétalos que mueren; sépalos comienzan a caer	
73	Segunda caída de frutos	
75	Frutos alcanzan alrededor del 50 % del tamaño varietal final	
76	Frutos alcanzan alrededor del 60 % del tamaño varietal final	
77	Frutos alcanzan alrededor del 70 % del tamaño varietal final	
78	Frutos alcanzan alrededor del 80 % del tamaño varietal final	
79	Frutos alcanzan alrededor del 90 % del tamaño varietal final	
Estadio principal 8. Maduración del fruto		
81	Los frutos comienzan a madurar: comienzo de la coloración del fruto	
85	Aumento de la coloración	
Estadio principal 9. Senescencia y comienzo del reposo vegetativo		
91	Los brotes han completado su desarrollo; follaje aún verde	
92	Las hojas comienzan a descolorarse	
93	Las hojas comienzan a caerse	
95	50 % de las hojas, descoloreadas o caídas	
97	Todas las hojas, caídas; letargo invernal	

Con base a los datos anteriores, se plantearon 11 escenarios para describir la marcha temporal de las etapas fenológicas de la floración de manera hipotética (Cuadro 2.3).

Cuadro 2.3 Escenarios hipotéticos sobre fenología de la floración en selvas tropicales

Clave	Escenarios	Descripción de los fitoelementos
1	Escenario 1	Ramas y estratos bajos verdes, Paisaje seco
2	Escenario 2	Aparece las yemas florares, ramas parcialmente verdes en las puntas, estratos bajos verdes, paisaje semiseco
3	Escenario 3	Aparecen los botones florales, ramas verdes, estratos bajos verdes, paisaje parcialmente verde
4	Escenario 4	Los sépalos dejan ver los pétalos, Ramas verdes, Estratos bajos verdes, Paisaje parcialmente verde con tonos tenues de prefloración
5	Escenario 5	Aparecen las primeras flores, Ramas verdes, estratos bajos verdes, Paisaje parcialmente verde con tonos moderados de floración
6	Escenario 6	Plena floración, ramas verdes, estratos bajos verdes, Paisaje dominado por el color de la flor con tonos escasos de verde

Clave	Escenarios	Descripción de los fitoelementos
7	Escenario 7	Caída Parcial de flores, Ramas verdes, Estratos bajos verdes, Paisaje codominado por el tono de la floración y tonos secos de la vegetación; pequeños destellos de tonos verdes
8	Escenario 8	Caída plena flores, ramas verdes, estratos bajos verdes, paisaje semiseco, fondo con tonos de la floración
9	Escenario 9	Estratos bajos verdes, Ramas parcialmente verdes, Paisaje dominan los tonos secos con algunos tonos verdes
10	Escenario 10	Paisaje Codominante tonos Verde y Secos
11	Escenario 11	Paisaje verde

En el experimento se consideraron diferentes colores como posibles inductores del cambio en la curva de crecimiento de la vegetación, por lo que se usaron flores de plantas ornamentales del género *Chrysanthemum* de tres colores (blancas, lilas y amarillas) en diferentes etapas fenológicas. Para recrear el contexto de floración se usó follaje verde de algunas otras especies, ramas senescentes y frutos de algunos arbustos. Los escenarios fueron recreados sobre suelo café claro en una superficie de 2m x 2m, Figura 2.10.

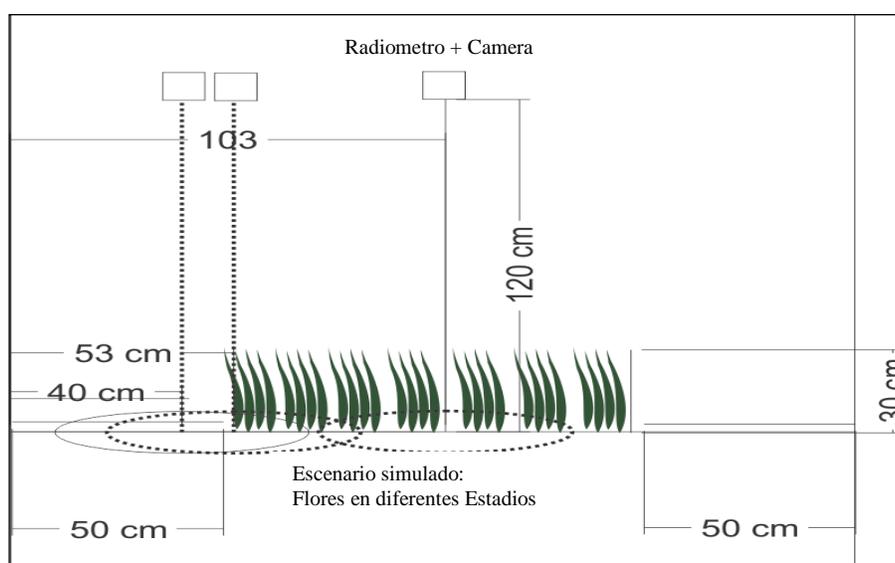


Figura 2.10 Esquema de mediciones de reflectancias y toma de fotografías a una altura de 120 cm con diferentes coberturas de suelo-vegetación.

Las mediciones de reflectancia espectral y la cobertura floral (CF) se llevaron a cabo bajo condiciones de cielo soleado entre ángulos de elevación solar entre 1 y 30 grados, el día 31 de mayo de 2010. Las mediciones espectrales se realizaron con un radiómetro multiespectral portátil (MSR5-590, CROPSCAN, Inc. U.S.A); que mide reflectancias del dosel en cinco



regiones del espectro electromagnético (485, 560, 660, 830, 1650 nm) y cuyo campo de visión del sensor es de 28°. El radiómetro fue montado en un bastón telescópico en posición cenital a 1.20 m sobre el suelo, cubriendo un área de 0.6 m² (a la que se le denomina área efectiva de medición, AEM). La reflectancia para cada punto de muestreo fue el promedio de tres repeticiones. Cada punto de muestreo correspondió a una proporción de suelo-vegetación, medida secuencialmente en 100% Suelo-0% Vegetación (1), 50% Suelo-50% Vegetación (2) y 0% Suelo-100% Vegetación (3), Figura 1.9, de cada arreglo suelo-vegetación-flor de cada escenario.

2.7 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En la Figura 2.11 se muestra la secuencia de escenarios descritos en la metodología en los que teóricamente los escenarios 1 y 2 correspondieron a la estación seca en un ecosistema, en tanto que el escenario 3 correspondió a la etapa de brotación, que con base a lo reportado por Borchert (1983) sucede en la estación seca de año, los escenarios 4 al 6 corresponden al inicio e incremento de la floración hasta alcanzar su máximo en el escenario 6. Los escenarios 7 y 8 correspondieron a disminución paulatina de color como proceso de finalización de la etapa fenológica de floración; en tanto que los escenarios 9 al 11, correspondieron al desarrollo vegetativo de foliación hasta alcanzar su máximo desarrollo de follaje.

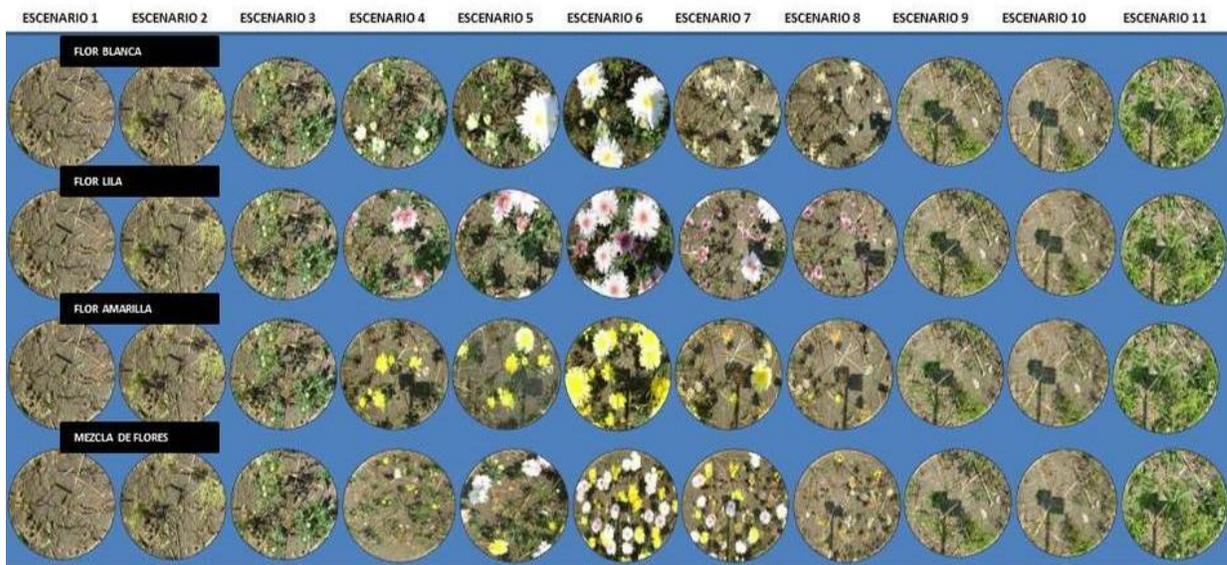


Figura 2.11 Escenarios que simularon las etapas fenológicas de floración utilizando: a) Flores blancas, b) Flores lilas, flores amarillas, c) Mezcla de flores.

En el caso de los índices espectrales de la vegetación o IV, están basados generalmente en el contraste entre la banda del rojo o R y del infrarrojo cercano o IRC para la vegetación y el suelo desnudo (Chen, 1999), por lo que es necesario entender los patrones espectrales de las bandas de R e IRC. En la Figura 1.11 se muestran simulaciones radiativas asociadas al crecimiento de un cultivo (medio homogéneo o turbio) con dos suelos (seco y húmedo) como fondo (Paz *et al.*, 2005). Se observa en esta figura que las curvas iso-IAF ($IRC = a_0 + b_0R$, donde a_0 y b_0 dependen del índice de área foliar o IAF) van desde la línea del suelo o $IAF = 0$ ($IRC = a_s + b_sR$, donde a_s y b_s caracterizan al suelo) hasta caer en un punto (R_∞, IRC_∞) de saturación de las bandas, que representa un medio ópticamente denso o de reflectancias en el infinito. El IRC_∞ representa el valor del IRC que se asocia a R_∞ , que es la reflectancia de saturación del R, que alcanza valores para IAF alrededor de 2 (tasa máxima de eficiencia fotosintética). Si se deja fijo al suelo (propiedades ópticas) se obtiene una curva iso-suelo, Figura 1.11.

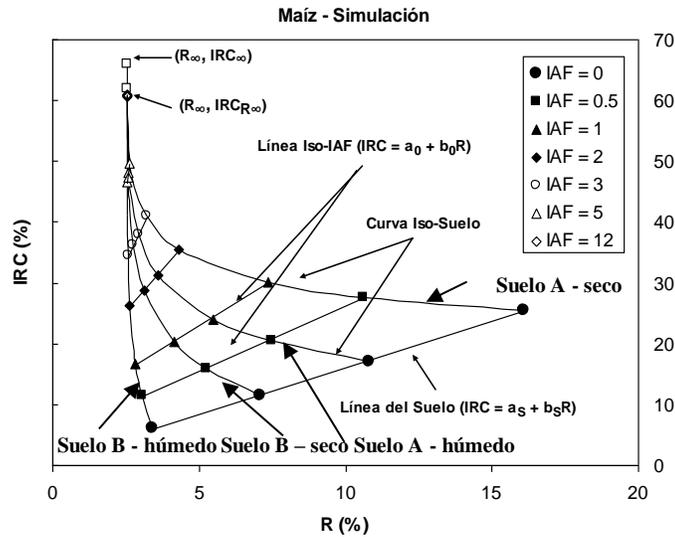


Figura 2.12 Simulaciones radiativas del crecimiento de un cultivo, que muestra los patrones espectrales asociados al espacio del R-IRC.

En la Figura 2.12 (solo crecimiento vegetativo) se observa que la banda del R disminuye y la del IRC se incrementa al crecer el cultivo, lo que denota patrones contrarios entre sí. Para suelos muy oscuros (R tiende a cero), que no se muestran en la Figura 2.12, el R se incrementa al crecer la vegetación (Shabanov *et al.*, 2002), con patrones similares entre sí. Si se considera que el crecimiento de la vegetación es observable con base en un índice de vegetación, el efecto de la floración sobre éste será igual de observable. Uno de los índices que considera condiciones invariantes del efecto del suelo y que se ha usado con mucho éxito en pastizales cultivados y agostaderos es el índice de vegetación IVIS (Índice de Vegetación basado en curvas Iso-Suelo) y está definido por (Paz, 2014), de acuerdo a la expresión (3).

$$\begin{aligned}
 \text{IVIS} &= -\ln\left(\frac{d\text{IRC}\infty - d\text{IRC}}{d\text{IRC}\infty - d\text{IRC}_s}\right) \\
 d\text{IRC}\infty &= \text{IRC}\infty - (a_s + b_s R\infty) \\
 d\text{IRC}_s &= \text{IRC}_s - (a_s + b_s R_s)
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

donde a_s y b_s son las constantes de la línea del suelo ($\text{IRC} = a_s + b_s R$).

Para la estimación del IVIS, los valores de los parámetros de la línea del suelo fueron $a_s = 0$, $b_s = 1$ y se utilizó $d\text{IRC}\infty = 70\%$ (reflectancia en porcentaje).

El procesamiento de los datos radiométricos para los escenarios, no se consideraron efectos de geometría sol-sensor. Los resultados por color de flor y escenario se muestran en la Figura 2.13.

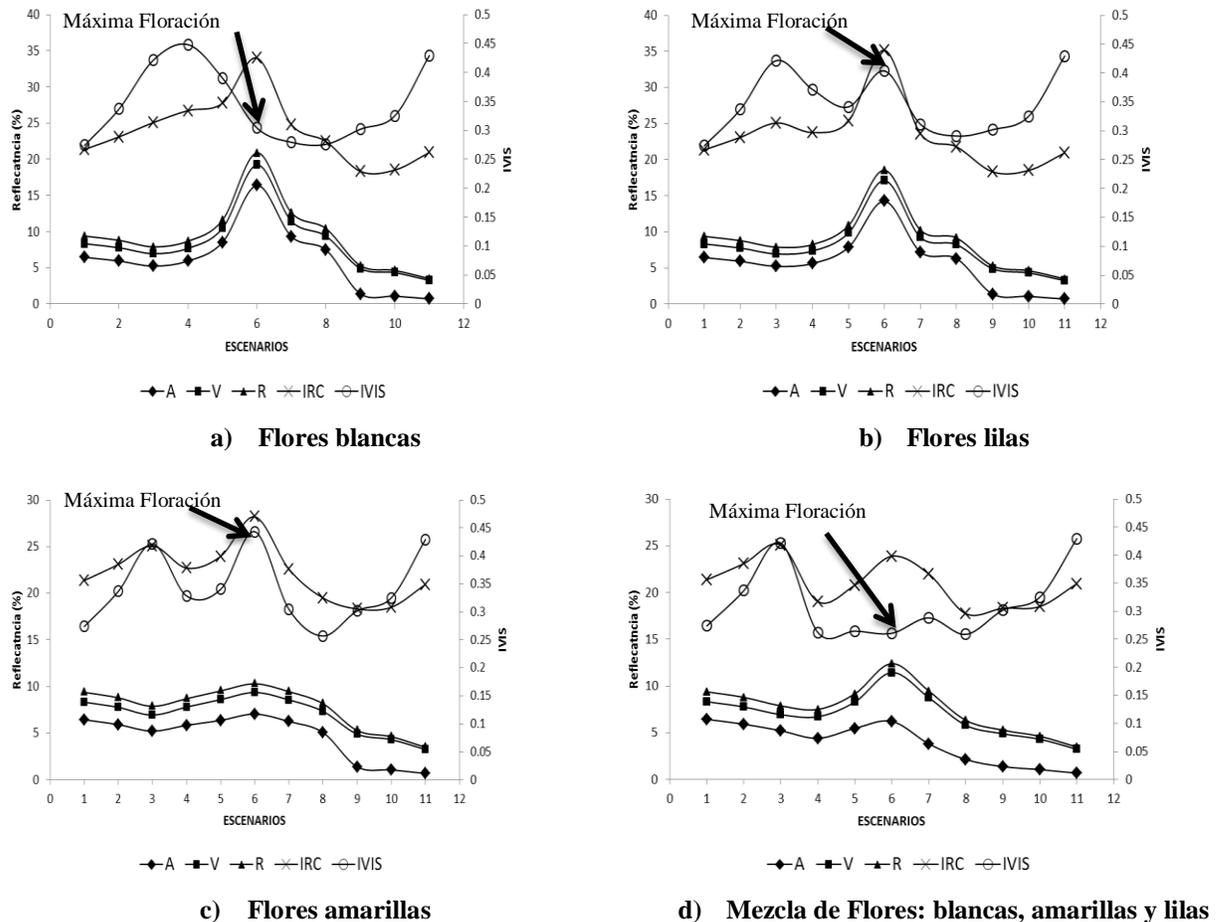


Figura 2.13 Comportamiento espectral e IVIS en las bandas espectrales Azul 485nm (A), Verde 560nm (V), Rojo 660nm (R) e IRC 830nm (IRC). Donde el escenario 4 correspondió al inicio e incremento de la floración hasta alcanzar su máximo en el escenario 6. Los escenarios 7 y 8 correspondieron a disminución paulatina de color como proceso de finalización de la etapa fenológica de floración.

Con base en la Figura 2.13, el comportamiento de la vegetación señalada por la evolución del IVIS en los 11 escenarios para cada color de flores, como una simulación del proceso fenológico de la floración, indica que la curva es sensible al escenario 6 que se describe como “Plena floración, ramas verdes, estratos bajos verdes, paisaje dominado por el color de la flor con tonos escasos de verde”. Los resultados muestran que el IVIS captura en forma adecuada el proceso fenológico de floración de manera simulada (escenarios 4 al 8),



particularmente para flores amarillas; sin embargo, para las flores blancas la curva del IVIS tiende a decrecer, como no lo hacen las demás en la etapa de floración. En el caso de las bandas del visible (A, V y R), el patrón asociado a la floración amarilla no detecta el evento, pero en el resto de las coloraciones lo hace bien. En el caso de la banda del IRC, su patrón captura en forma adecuada la floración, mostrando un patrón de crecimiento–decrecimiento, contrario al planteado por Chen *et al.* (2009), donde el IRC permaneció constante. En la situación de incremento de elementos verdes (follaje) y reducción de éstos (escenarios 1 a 3 y 9 a 12), el IVIS captura en forma adecuada este tipo de comportamiento, que puede asociarse a la etapa de crecimiento vegetativo del follaje y su senescencia.

Con base en Ge *et al.* (2006), dentro del espectro visible (400-700nm) se definen normalmente los componentes de un dosel vegetal, que se caracteriza por dos tipos de absorción producto del cambio de pigmentación (*e.g.* clorofilas y carotenoides). Las clorofilas absorben en el rojo mientras que los carotenos lo hacen en el azul. Actualmente, las respuestas espectrales que dan estos pigmentos se usan frecuentemente como indicadores factibles para evaluar etapas fenológicas de las plantas a través de sensores remotos (Peñuelas y Fillela, 1998). En este estudio se observó que los valores del azul absorben en los escenarios de flores amarillas y mezclados, lo que puede deberse a la presencia de carotenoides, coincidiendo con lo mencionado por Ge *et al.* (2006).



2.8 CONCLUSIONES

Los resultados del experimento realizado indican que la curva de crecimiento de la vegetación sigue el mismo comportamiento a lo observado a nivel de pixel en la península de Yucatán reportado por Paz *et al.* (2011) y que la caída (retroceso del IVIS) muestra una clara evidencia de estar influenciado por la presencia de flores. La cantidad de la caída en la curva se hace más pronunciada en flores blancas que en el resto de los colores del experimento. Los resultados del IVIS para los experimentos, muestran que la floración es detectable si se presenta un incremento de tejido fotosintético (pre floración) y que el máximo punto de la floración está asociado, generalmente, al valor más bajo del índice antes del inicio del crecimiento del follaje (post floración), logrando con ello caracterizar el comportamiento fenológico de la floración de manera artificial.

Los patrones reportados en este trabajo sugieren la elaboración de un índice de floración que además considere el patrón de crecimiento del follaje sin desacoplarlo.



2.9 LITERATURA CITADA

- Arnold, C. Y. 1959. The determination and significance of base temperature in a linear heat unit system. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 74, 430-445.
- Bawa, K. S., Kang, H., and Grayum, M. H. (2003). Relationships among time, frequency, and duration of flowering in tropical rain forest trees. *American Journal of Botany*, 90(6), 877-887.
- Borchert, R. (1980). Phenology and ecophysiology of tropical trees: *Erythrina poeppigiana* OF Cook. *Ecology*, 1065-1074.
- Brown, M. E.; Pinzon, J, et al., (2006): "Evaluation of the Consistency of Long-Term NDVI Time Series Derived From AVHRR, SPOT-Vegetation, SeaWiFS, MODIS, and Landsat ETM+ Sensors." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44, pp. 1787-1793.
- Busetto, L., Colombo, R., Migliavacca, M., Cremonese, E., Meroni, M., Galvagno, M., and Pari, E. (2010). Remote sensing of larch phenological cycle and analysis of relationships with climate in the Alpine region. *Global change biology*, 16(9), 2504-2517.
- Cleland, E. E., Chuine, I., Menzel, A., Mooney, H. A., and Schwartz, M. D. (2007). Shifting plant phenology in response to global change. *Trends in ecology and evolution*, 22(7), 357-365.
- Croat, T. B. 1975. Phenological behavior of habit and habitat classes on Barro Colorado Island (Panama Canal Zone). *Biotropica* 7(4), 270-277.
- Figueroa, P. G., and Fournier, L. A. Fenología y ecotisiología de dos poblaciones de *Tabebuia rosea* (" Roble de Sabana") en Costa Rica (Bignoniaceae).
- Font Quer, P. (1970). *Diccionario de botánica*. Editorial Labor SA, Barcelona, 1-1244.
- Fournier, I. y c. Charpantier. 1978. El tamaño de la muestra y la frecuencia de las observaciones en el estudio de las características fenológicas de los árboles tropicales. *Cespedesia*. Suplemento 2. Vol VII, 2526.



- Gordo O. y Sanz J.J. 2010. Impact of climate change on plant phenology in Mediterranean ecosystems. *Global Change Biology*, 16, 1082-1106.
- Güemes, R. F., G. C. Echazarreta, G. R. Villanueva, F. J. Pat y A. R. Gómez. (2003). La apicultura en la península de Yucatán. Actividad de subsistencia en un entorno globalizado, *RMC*, 16, pp.117-132.
- Gutiérrez A. y Picatoste J. R. 2012. Evidencias del cambio climático y sus efectos en España. Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. NIPO: 280-12-108-1
- Gutierrez-Rodriguez, M., Escalante-Estrada, J. A., and Reynolds, J. P. 2006. Canopy reflectance indices and its relationship with yield in common bean plants (*Phaseolus vulgaris* L.) with phosphorous supply.
- Hack, H., H. Bleiholder, L. Buhr, U. Meier, U. Schnock-Fricke, E. Weber Und A. Wit Zenberger. 1992: Einheitliche Codierung der phänologischen Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen—Erweiterte BBCH-Skala, *Allgemein-Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd.* 44, 265-270.
- Hack, H., H. Gall, T H. Klemke, R. Klose, U. Meier, R. St Auss Und A.Wit Zen-Berger, 1993: Phänologische Entwicklungsstadien der Kartoffel (*Solanum tuberosum* L.). Codierung und Beschreibung nach der erweiterten BBCH-Skala mit Abbildungen. *Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd.* 45, 11-19.
- Hodges, t. y p.c. Doraiswamy. 1979. Crop phenology literature review for corn, soybean, wheat, barley, sorghum, rice, cotton and sunflower. *Agristars Technical Report*. Lockheed Electronics Co. Inc. 1830 Nasa Road 1, Houston, Texas 77058.
- Huete, A.R., R.D. Jackson, and D.F. Post. 1985. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote Sensing of the Environment* 17, 35-53.
- Inouye, S. R. 1991. Population biology of desert annual plants. In: Polis, G. A. (ed.). *The ecology of desert communities*. The University of Arizona Press. Tucson. pp. 27-54.
- Jacquemoud, S., and F. Baret. 1990. PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra. *Remote Sensing of Environment* 34: 75-91.



- Kathuroju, N., White, M. A., Symanzik, J., Schwartz, M. D., Powell, J. A., and Nemani, R. R. (2007). On the use of the advanced very high resolution radiometer for development of prognostic land surface phenology models. *ecological modelling*, 201(2), 144-156.
- Leon, J. L., Benet, L. R. C., and Estrada, M. C. 1996. Fenología floral de una comunidad árido-tropical de Baja California Sur, México. *Acta Botánica Mexicana*, 35, 45-64.
- Lieberman, D. y M. Lieberman. 1984. The causes and consequences of synchronous flushing in a dry tropical forest. *Biotropica* 16: 161-172.
- Liuth, H. S., Talora, D. C., and Amorim, A. M. (2013). Phenological synchrony and seasonality of understory Rubiaceae in the Atlantic Forest, Bahia, Brazil. *Acta Botanica Brasilica*, 27(1), 195-204.
- Magaña Magaña, Miguel A., and Leyva Morales, Carlos E.. (2011). Costos y rentabilidad del proceso de producción apícola en México. *Contaduría y administración*, (235), 99-119.
- Marceau, D.J., D.J. Gratton, R.A. Fournier, and J.P. Fortín. 1994a. Remote sensing and the measurement of geographical entities in a forested environment. 2. The optimal spatial resolution. *Remote Sensing of Environment* 49, 105-117.
- Marceau, D.J., P.J. Howarth, and D.P. Gratton. 1994b. Remote sensing and the measurement of geographical entities in a forested environment. 1. The scale and spatial aggregation problem. *Remote Sensing of Environment* 49: 93-104.
- Menzel, A., Sparks, T. H., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, R., Züst, A. N. A. 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global change biology*, 12(10), 1969-1976.
- Morellato, L. P. C., Talora, D. C., Takahasi, A., Bencke, C. C., Romera, E. C., and Zipparro, V. B. (2000). Phenology of Atlantic Rain Forest Trees: A Comparative Study. *Biotropica*, 32(4b), 811-823.
- Myneni, R. B.; Tucker, C. J. et al., (1998): "Interannual variations in satellite-sensed vegetation index data from 1981 to 1991", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 103: 6145-6160. Park, S. (2009): "Synchronicity between Satellite-Measured leaf phenology and rainfall regimes in tropical forests", *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 75, 10, pp. 1231-1237.



- Neild, R. y M.W. Seeley. 1977. Applications of growing degree days in field corn production. In: Agrometeorology of the maize crop. WMO N° 481. p. 426-436. Geneva, Switzerland.
- Newstrom, L.E., Frankie G.W. y Baker H.G. 1994. A New classification for plant phenology based on flowering patterns in lowland tropical rain forest trees at La Selva, Costa Rica. *Biotropica* 26:141–159.
- Ochoa-Gaona, S. and G. Domínguez-Vázquez. 2000. Distribución y fenología de la flora leñosa de Chajul, Selva Lacandona, Chiapas, México. *Brenesia* 54, 1-24.
- Ochoa-Gaona, Susana; Perez Hernandez, Isidro A. y De Jong, Bernardus H.J. 2008. Fenología reproductiva de las especies arbóreas del bosque tropical de Tenosique, Tabasco, México. *Rev. biol. trop.*, vol.56, n.2 pp. 657-673.
- Palacios, L.A., F. Paz, J.L. Oropeza, B. Figueroa, M. Martínez, C.A. Ortiz, y A. Exebio. 2006. Clasificador genérico de objetos en imágenes ETM+. *Agrociencia* 40, 613-626
- Parada-Quintero, M., Alarcón-Jiménez, D., and Rosero-Lasprilla, L. (2012). Fenología de la floración de especies ornitófilas de estratos bajos en dos hábitats altoandinos del Parque Natural Municipal Ranchería (Paipa-Boyacá-Colombia). *Caldasia*, 34(1), 139-154.
- Parmesan C. y Yohe G. 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421, 37–42.
- Paz, F., A. Zarco, A. Cano, M. Bolaños, y M. Odi. 2008a. Un método simple para la estimación de las propiedades geométricas y ópticas de las hojas de la vegetación. Enviado a *Agrociencia*, México.
- Paz, F., E. Palacios, E. Mejía, M. Martínez, y L.A. Palacios. 2006a. Determinación del estado de crecimiento de cultivos usando la transformada de Hough de las reflectancias del follaje. *Agrociencia* 40: 99-108.
- Paz, F., E. Palacios, E. Mejía, M. Martínez, y L.A. Palacios. 2005. Análisis de los espacios espectrales de la reflectancia del follaje de los cultivos. *Agrociencia* 39:293-301.



- Paz, F., E. Palacios, M. Bolaños, L.A. Palacios, M. Martínez, E. Mejía y A. Huete. 2007. Diseño de un índice espectral de la vegetación: NDVIcp. *Agrociencia* 41, 539-554.
- Paz, F., L.A. Palacios, E. Palacios, M. Martínez. y E. Mejía. 2003. Un índice de vegetación sin efecto atmosférico: IVPP, In: A. de Alba, L. Reyes y M. Tiscareño (Eds.), *Memoria del Simposio Binacional de Modelaje y Sensores Remotos en Agricultura México-USA*. INIFAP-SAGARPA, Aguascalientes, México. pp: 46-51.
- Paz, F., Marin, M. A., López, E., Zarco, A., Bolaños, M., Oropeza, J. L., y Rubiños, E. (2009). Elementos para el desarrollo de una hidrología operacional con sensores remotos: mezcla suelo-vegetación. *Ingeniería Hidráulica en México*, 24, 69-80.
- Paz-Pellat, F., Reyes, M., y Medrano, E. 2011. Diseño de índices espectrales de la vegetación usando curvas iso-suelo. *Agrociencia*, 45(1), 121-134.
- Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J. M., Tucker, C. J., and Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in ecology and evolution*, 20(9), 503-510.
- Ranson, K.J., C.S.T. Daughtry, L.L. Biehl, and M.E. Bauer. 1985. Sun-view angle effects on reflectance factors of corn canopies. *Remote Sensing of Environment* 18: 147-161.
- Rathcke B., Lacey E.P. 1985. Phenological patterns of terrestrial plants. *Annul Rev. Ecol. Syst* 16,179–214
- Rodskjer, N. 1972. Measurements of solar radiation in barley and oats. *Swed. J. Agric. Res.* 2: 71-81.
- Rosenzweig C., Karoly D., Vicarelli M., Neofotis P., Wu Q., Casassa G., Menzel A., L. Root T., Estrella N., Seguin B., Tryjanowski P., Liu C., Rawlins S. Y Imeson A. 2008. Attributing physical and biological impacts to anthropogenic climate change. *Nature*, 435, 353–357.
- Ross, J. 1981. *The radiation regime and architecture of plant stands*. W. Junk, Norwell, MA, 391 p.
- Ruiz, A. 1991. *Caracterización Fenológica del Guayabo (Psidium guayava L.)*. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. p. 78.



- Sakai, S. 2001. Phenological diversity in tropical forests. *Population Ecology*, 43(1), 77-86.
- Sánchez-Azofeifa, A., Rivard, B., Wright, J., Feng, J. L., Li, P., Chong, M. M., and Bohlman, S. A. (2011). Estimation of the distribution of *Tabebuia guayacan* (Bignoniaceae) using high-resolution remote sensing imagery. *Sensors*, 11(4), 3831-3851.
- Schwartz, M. D. 1999. Advancing to full bloom: planning phenological research for the 21st century. 42, 113118.
- Solano, R., Didan, K., Jacobson, A., and Huete, A. (2010). MODIS vegetation index user's guide (MOD13 series). Version 2.00, May 2010, Collection 5. Vegetation index and phenology lab. 38p.
- Stiles F.G. 1975. Ecology, flowering phenology and hummingbird pollination of some Costa Rican *Heliconia* species. *Ecology* 56, 285– 301
- Sun, C., B.A. Kaplin, K.A. Kristensen, V. Munyaligoga, J. Mvukiyumwami, K.K. Kajondo and T.C. Moermond. 1996. Tree phenology in a tropical montane. Wright, S.J. and C.P. van Schaik. 1994. Light and the phenology of tropical trees. *Am. Nat.* 143: 192-199.
- Tian, Y., Y. Wang, Y. Zhang, Y. Knyazikhin, J. Bogaert, and R.B. Myneni. 2002. Radiative transfer based scaling of LAI retrievals from reflectance data of different resolutions. *Remote Sensing of Environment* 84, 143-159.
- Torres R., E. 1995. Agrometeorología. Editorial Trillas, S.A. de C. V. México, D.F. p. 154.
- Van Schaik C.P., Terborgh J.W., Wright S.J. 1993. The Phenology Of Tropical Forests: adaptive significance and consequences for primary consumers. *Annu Rev Ecol Syst* 24,353–377
- Vílchez, B. and O. Rocha. 2004. Fenología y biología reproductiva del nazareno (*Peltogyne purpurea* Pittier) en un bosque intervenido de la Península de Osa, Costa Rica, América Central. *Kurú: Rev. For.* 1, 1-14
- Villalpando, J. Y A. Ruiz. 1993. Observaciones Agrometeorológicas y su uso en la agricultura. Editorial Limusa, México. p. 133.



- Volpe, C. A. 1992. Citrus Phenology. In: Proceedings of the Second International Seminar on Citrus Physiology, p. 103-122.
- White, M. A., and Nemani, R. R. (2006). Real-time monitoring and short-term forecasting of land surface phenology. *Remote Sensing of Environment*, 104(1), 43-49.
- WMO. 1993. Practical use of agrometeorological data and information for planning and operational activities in agriculture. WMO. Publication N° 60. Geneva.
- Woodcock, C.E., and A.H. Strahler. 1987. The factor of scale in remote sensing. *Remote Sensing of Environment*. 21, 311-332.
- Wouters, N., De Ketelaere, B., De Baerdemaeker, J., and Saeys, W. (2013). Hyperspectral waveband selection for automatic detection of floral pear buds. *Precision Agriculture*, 14(1), 86-98.
- Zadoks, J. C., T. T. Chang, And C. F. Konzak, 1974: A Decimal Code For The Growth Stages Of Cereals. *Weed Research* 14, 415-421 And *Eucarpia Bulletin* 7, 49-52.
- Zarco, A, Paz, F., Palacios, E., Cano, A., Bolaños, M, Pascual, F. Palacios, L.A., Palacios, O., y Oropeza, J.L. 2008 Modelación del efecto de escala espectral en el sistema suelo-vegetación, *Agrociencia*, 42, 193-204.
- Zhang, P. and B. Anderson. 2004. Climate-related vegetation characteristics derived from moderate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) leaf area index and normalized difference vegetation index. *Journal of Geophysical Research*. doi:10.1029/2004JD004720.
- Zimmerman J.K., Roubik D.W., Ackerman J.D. 1989. Asynchronous phenology of a neotropical orchid and its euglossine bee pollinators. *Ecology* 70, 1192–1195
- Zimmerman, J. K., Wright, S. J., Calderón, O., Pagan, M. A., and Paton, S. (2007). Flowering and fruiting phenologies of seasonal and aseasonal neotropical forests: the role of annual changes in irradiance. *Journal of Tropical Ecology*, 23(2), 231-251.

CAPITULO III: SOBRE LA CARACTERIZACIÓN FENOLÓGICA DE BOSQUES TROPICALES USANDO INFORMACIÓN ESPECTRAL: EXPERIMENTOS CON COMPONENTES

RESUMEN

La caracterización de la fenología de la vegetación, particularmente la asociada a los bosques tropicales caducifolios, permite predecir los impactos del cambio climático y de los intercambios de carbono y agua entre la atmósfera y la vegetación, por lo que es importante modelarla. Aunque existen diferentes métodos experimentales para caracterizar la fenología de la vegetación, el uso de sensores remotos permite caracterizaciones fenológicas costo eficientes. No obstante lo anterior, la mayoría de las aplicaciones de sensores remotos, cuando se usan índices de vegetación (IV), solo modelan el crecimiento del follaje (etapa vegetativa y senescente). Dado que la floración es crítica para la viabilidad de la vegetación, además de su valor en la apicultura, es necesario evaluarla con sensores remotos. La revisión de experimentos y observaciones de floración muestra patrones contrarios en las bandas del rojo (R) e infrarrojo cercano (IRC) a los usados en los IV para caracterizar el follaje. A partir de estos análisis, se diseñó un experimento de componentes de la vegetación para simular estados fenológicos pre floración, floración y post floración. Los resultados muestran que es posible el desarrollo de un modelo fenológico aproximado si se usa el índice IVIS para caracterizar la inducción floral, el inicio y el pico de la floración, aunque el término de ésta se confunde con el inicio del crecimiento vegetativo del follaje.

Palabras clave: índices de vegetación, floración, IVIS, vegetación caducifolia, modelo fenológico.



3.1 INTRODUCCIÓN

Por largo tiempo se han estudiado los patrones fenológicos de las plantas terrestres en relación con el medio ambiente y factores endógenos (Rathcke y Lacey, 1985). La caracterización de las etapas de desarrollo de la vegetación (fenología) permite conocer los patrones adaptativos de las plantas ante el cambio climático, al determinar los procesos biogeoquímicos asociados.

El análisis del impacto del cambio climático (calentamiento global) en la fenología de la vegetación (Peñuelas y Filella, 2001; Schwartz *et al.*, 2006; IPCC, 2007), muestra efectos en el tiempo de las fases de desarrollo (floración, inicio crecimiento del follaje, senescencia, latencia, etc.) de las plantas. Asimismo, los cambios fenológicos de la vegetación inciden en los flujos de carbono y agua entre la atmósfera y las plantas (Runing *et al.*, 1991; White *et al.*, 1999; Wilson y Baldocchi, 2000; Kramer *et al.*, 2000), por lo que es importante caracterizar los estadios fenológicos; particularmente en relación con los tiempos de presentación, duración de los eventos y masividad (sincronización del evento en las especies de una comunidad) (Post *et al.*, 2008).

Los patrones fenológicos de la vegetación se estudian por el monitoreo directo de plantas, o conjuntos de ellas, *in situ* (Borchert, 1983; Heideman, 1989; Bullock y Solis-Magallenus, 1990). Este esquema tiene altos costos en lo referente a la caracterización de ecosistemas terrestres, por lo que se buscan métodos alternativos tales como la observación en herbarios (Borchert, 1996; Ochoa-Gaona y Cruz-Arias, 2002) o la toma de fotografías digitales montadas en estructuras por encima de la vegetación (Richardson *et al.*, 2009; Parihar *et al.*, 2013), entre otras técnicas. Ante esto, la tecnología de los sensores remotos, dado su enfoque espacial exhaustivo y la temporalidad de las visitas a una misma área (pixel), plantea una solución eficiente y de bajo costo (Zhang *et al.*, 2012). La caracterización fenológica del crecimiento del follaje en biomas o ecosistemas terrestres, a escala regional o global, se ha hecho con los sensores AVHRR (Shabanov *et al.*, 2002; Stöckli y Vidale, 2004) y MODIS (Zhang y Anderson, 2004; Zhang *et al.*, 2006) y con los sensores del satélite Landsat (Fisher *et al.*, 2006). Para la modelación de la fenología se han utilizado diferentes índices de vegetación (IV) (Zhang *et al.*, 2012), de los que sobresalen el NDVI (Rouse *et al.*, 1974), el EVI (Liu y Huete, 1995) y el EVI2 (Jiang *et al.*, 2008), en los que los datos de los IV se filtran para reducir su variabilidad y poder detectar



umbrales que definan los estadios fenológicos (Zhang *et al.*, 2012; Atkinson *et al.*, 2012); tarea más o menos exitosa, como una aproximación semi-empírica.

En el caso de la floración de la vegetación, los patrones se han estudiado poco a nivel satelital, por lo que se requiere del diseño de las bases metodológicas para su caracterización, particularmente si se consideran esquemas simultáneos de definición de los umbrales y fases del crecimiento del follaje. La floración es un estadio crítico para la viabilidad de la vegetación (Rathcke y Lacey, 1985), de tal manera que la definición de su presencia y duración, así como su intensidad, requiere del conocimiento de los factores que inciden en los umbrales de su inicio y terminación, los cuales son relativamente poco conocidos (Rathcke y Lacey, 1985; Primack, 1985). En términos económicos, la floración de los bosques tropicales con diferentes niveles de perturbación en la Península de Yucatán, como ejemplo, impacta en la apicultura de la región (INEGI, 2012), por lo que su caracterización es muy importante. Adicionalmente, los bosques tropicales en México almacenan las mayores cantidades de carbono de la biomasa viva de los ecosistemas del país (de Jong *et al.*, 2010), por lo que resulta indispensable conocer los patrones de evolución fenológicos ante el cambio climático y las intervenciones humanas.

El objetivo principal de este trabajo fue desarrollar un enfoque que permita caracterizar los estadios fenológicos más importantes en los bosques tropicales, usando la evidencia experimental disponible, e información de sensores remotos. Para ello se analizaron los patrones espectrales de diferentes tipos de vegetación, de modo que pudiera caracterizarse en forma apropiada, así como definir los alcances y límites del uso de la información espectral. Tomando como referencia las bandas espectrales que usan la mayoría de los sensores remotos en satélites, en este trabajo se decidió considerar solo las bandas del rojo (R) e infrarrojo cercano (IRC), que se usan en los índices espectrales de la vegetación para caracterizar el crecimiento y senescencia de las plantas, dado su alto contraste en estos tipos de cobertura.

3.2 REVISION DE LITERATURA

3.2.1 Patrones temporales y espectrales de la vegetación

Para poder caracterizar la fenología de la vegetación es conveniente analizarla en términos de dos ciclos relativamente diferentes: crecimiento y decrecimiento del follaje, así como floración; aunque en muchos casos ambos ciclos se presentan en forma combinada.

3.2.2 Crecimiento y decrecimiento del follaje

La Figura 1 muestra en forma esquemática la evolución temporal de un índice de vegetación asociado al estadio del desarrollo del follaje y su senescencia, para el caso de bosques perennes (Figura 1a) y caducifolios (Figura 1b). Este patrón es típico en las caracterizaciones cuando se usan sensores remotos (Zhang y Anderson, 2004; Zhang *et al.*, 2006); aunque generalmente el patrón emerge en forma definida después de remover los ruidos espectrales y suavizar los datos (Zhang *et al.*, 2012; Atkinson *et al.*, 2012).

En el caso de bosques con diferentes niveles de caducidad del follaje o bosques mixtos, el patrón temporal es intermedio entre el bosque perenne y el caducifolio (Zhang *et al.*, 2006), lo que se caracteriza por la diferencia entre el IV máximo y mínimo. Este enfoque se utiliza para evaluar la caducidad de un bosque (Cuba *et al.*, 2013).

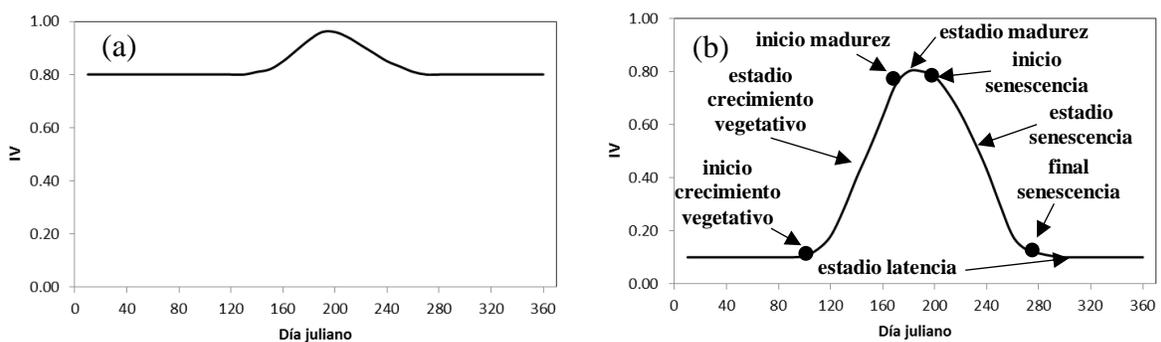


Figura 3.1 Patrones esquemáticos de la evolución temporal de un índice de vegetación en bosques: (a) perennes y (b) caducifolios.



Los patrones de la Figura 1b permiten definir los umbrales y, su duración, en los diferentes estadios del crecimiento del follaje en función de la evolución temporal del IV (Zhang *et al.*, 2012).

Para entender los patrones espectrales de las bandas de R e IRC, en la Figura 3.1 se muestran simulaciones radiativas asociadas al crecimiento de un cultivo (medio homogéneo o turbio) con dos suelos (seco y húmedo) como fondo (Paz *et al.*, 2005), donde se observa que las curvas iso-IAF ($IRC = a_0 + b_0R$, donde a_0 y b_0 dependen del índice de área foliar o IAF) van desde la línea del suelo o $IAF = 0$ ($IRC = a_S + b_S R$, donde a_S y b_S caracterizan al suelo) hasta degenerar en un punto (R_∞, IRC_∞) de saturación de las bandas, que representa un medio ópticamente denso o de reflectancias en el infinito. El IRC_{R_∞} representa el valor del IRC asociado a R_∞ , que es la reflectancia de saturación del R, que alcanza valores para IAF alrededor de 2 (tasa máxima de eficiencia fotosintética). Si se deja fijo al suelo (propiedades ópticas) se obtiene una curva iso-suelo, Figura 3.2.

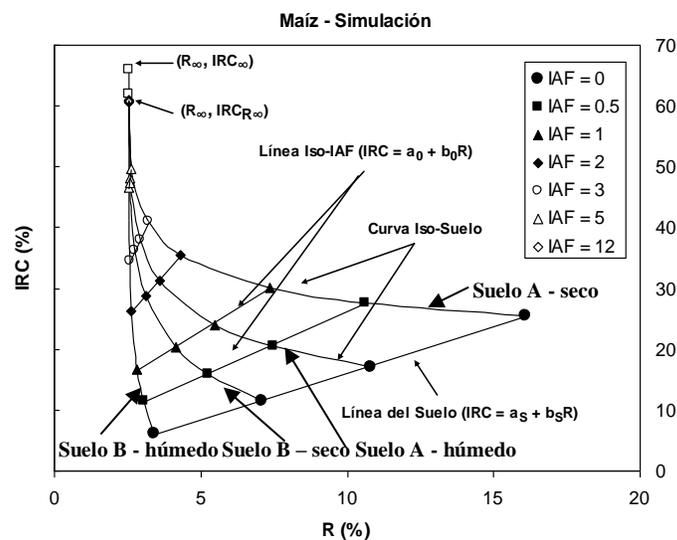


Figura 3.2 Simulaciones radiativas del crecimiento de un cultivo, que muestra los patrones espectrales asociados al espacio del R-IRC.

En la Figura 3.2 (solo crecimiento vegetativo) se observa que la banda del R disminuye y la del IRC se incrementa al crecer el cultivo, lo que denota patrones contrarios entre sí. Para suelos

muy oscuros (R tiende a cero), que no se muestran en la Figura 2, el R se incrementa al crecer la vegetación (Shabanov *et al.*, 2002), con patrones similares entre sí.

Al considerar la evolución temporal de la vegetación, las condiciones de iluminación solar cambian, lo que introduce efectos que distorsionan los valores del R e IRC. Para tomar en cuenta este efecto es conveniente estandarizar estas condiciones, mediante un modelo simplificado de geometría de iluminación-visión (Bolaños y Paz, 2010):

$$\begin{aligned}\chi &= 90 - \theta_v + \theta_s \\ Rn &= \ln(R) \cos(\chi) \\ \chi &= 90 - gRn\end{aligned}\tag{1}$$

donde θ_v es el ángulo cenital de visión, θ_s el de iluminación solar, χ es una variable angular de posición, R es la reflectancia de cualquier banda, Rn es la reflectancia normalizada por posición angular y efecto de escala (función logaritmo natural) y g es un parámetro que define la geometría sol-sensor. La ventaja del modelo es que solo tiene un parámetro, el cual puede estimarse con un solo dato de medición. En lo siguiente solo se consideraran reflectancias normalizadas y estandarizadas a la geometría $\theta_v = 0^\circ$ y $\theta_s = 30^\circ$, de tal forma que todas las mediciones espectrales tienen una base común de observación. La inversión del modelo de geometría sol-sensor, relaciones (1), para estimar reflectancias no normalizadas introduce errores (Bolaños y Paz, 2010), por lo que no es necesaria en términos de su uso en índices de vegetación y se evita así la propagación de errores.

La Figura 3.3 muestra las mismas simulaciones radiativas de la Figura 3.2, pero normalizadas y estandarizadas, donde las reflectancias se multiplicaron por -1 para hacerlas positivas.

Se observa en la Figura 3.3 que las curvas iso-suelo reducen su curvatura, lo que aproxima mejor patrones más o menos lineales o exponenciales. Así, se puede usar un índice de vegetación que considere las curvas iso-suelo para el análisis de los patrones temporales de la vegetación (Paz *et al.*, 2011), pero en términos de reflectancias normalizadas y estandarizadas:

$$\begin{aligned}IVISn &= -\ln\left(\frac{dIRCn_\infty - dIRCn}{dIRCn_\infty - dIRCns}\right) \\ dIRCn &= IRCn - (a_{ns} + b_{ns}Rn)\end{aligned}\tag{2}$$



En lo siguiente se utilizarán los parámetros $dIRCns = 0$, $dIRCn\infty = 3$, $a_{nS} = 0$ y $b_{nS} = 0.8$ para los análisis de diferentes experimentos.

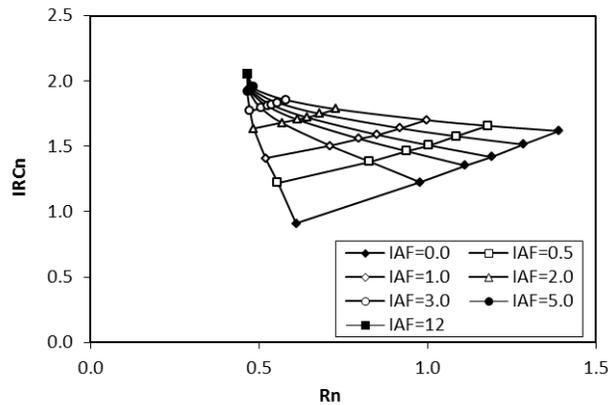


Figura 3.3 Simulaciones radiativas del crecimiento de un cultivo, que muestran los patrones espectrales asociados al espacio del Rn-IRCn estandarizado por geometría sol-sensor.

La Figura 3.4 muestra la evolución temporal de Rn e IRCn, así como del IVISn, para el caso de un cultivo de frijol, cuyo experimento esta descrito en Reyes *et al.*, (2011)

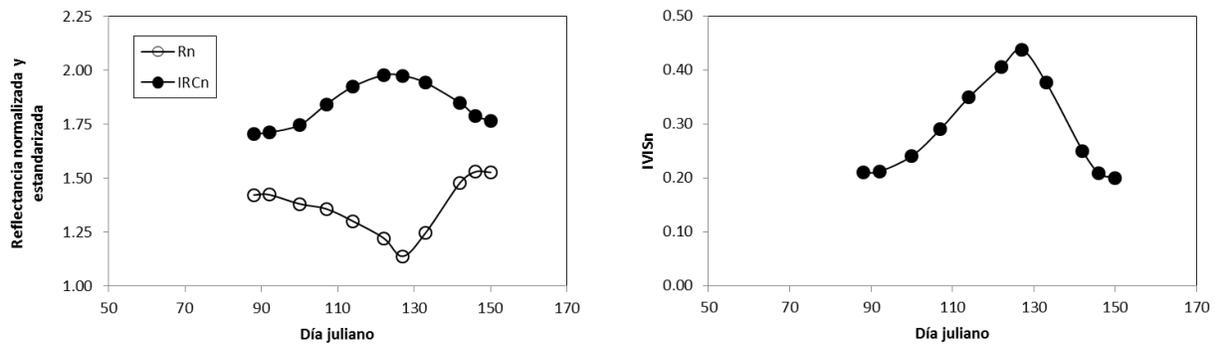


Figura 3.4 Evolución temporal de Rn, IRCn e IVISn para el caso de un cultivo de frijol.

En la Figura 3.4 las reflectancias Rn e IRCn tienen patrones contrarios en la etapa vegetativa y de senescencia, por lo que el IVISn presenta un patrón de crecimiento y decrecimiento, similar al de la Figura 3.1b. El patrón de la Figura 3.4 de evolución temporal de reflectancias, normalizadas o no, es similar al que se observa para el caso de bosques (Nilson *et al.*, 2012).

El patrón temporal que se discute en la Figura 3.4 no muestra, aparentemente, la aparición de floración (etapa reproductiva). Para analizar esta situación es conveniente revisar un experimento



de maíz, donde el suelo debajo del cultivo se cambió mediante el uso de charolas deslizantes (Bausch, 1993). Las reflectancias se midieron hasta el punto de máximo índice de área foliar solo en la etapa vegetativa (y reproductiva). La Figura 3.5 muestra la evolución de Rn, IRCn e IVISn para el caso de un suelo relativamente oscuro (R = 12 %). Se observa en esta figura que la banda Rn muestra un cambio de la etapa vegetativa a la reproductiva con un incremento en su valor, a diferencia del crecimiento vegetativo que se caracteriza por la disminución de Rn (Figuras 3.5 y 3.6). El índice IVISn muestra el efecto de la etapa reproductiva con una disminución de su valor.

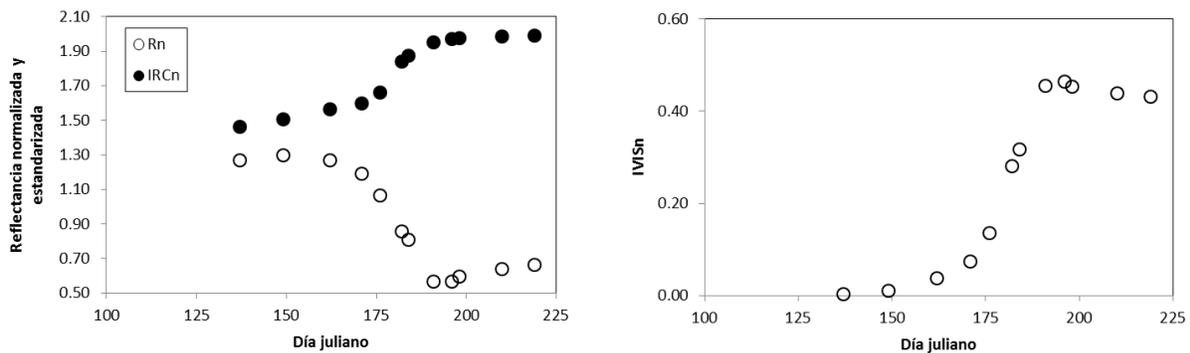


Figura 3.5 Evolución temporal de Rn, IRCn e IVISn para el caso de un cultivo de maíz, con suelo relativamente oscuro, que muestra el efecto de la etapa reproductiva.

Para el mismo experimento de la Figura 3.5, pero para el caso de un suelo claro (R = 30 %), la Figura 3.6 muestra la evolución temporal de Rn, IRCn e IVISn. Se observa el efecto del suelo (propiedades ópticas) en la etapa reproductiva donde Rn (e IVISn) permanece constante.

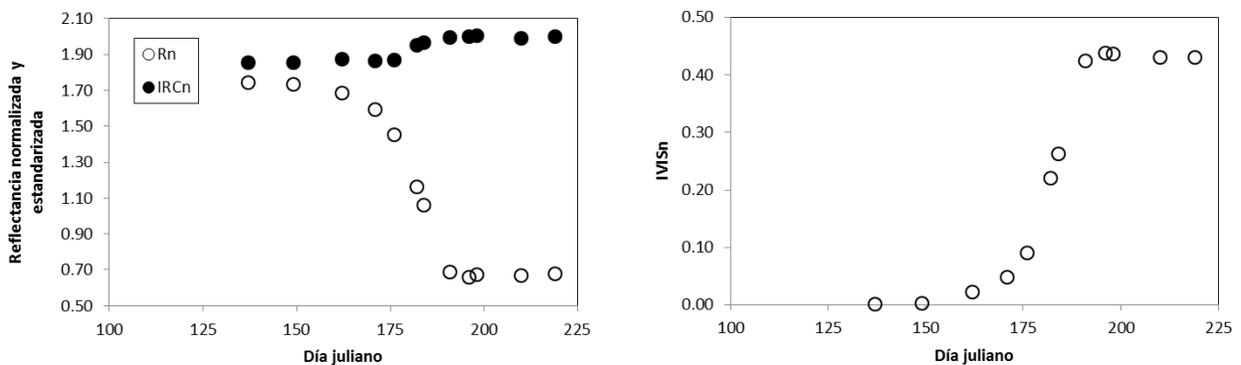


Figura 3.6 Evolución temporal de Rn, IRCn e IVISn para el caso de un cultivo de maíz, con suelo claro, que muestra el efecto de la etapa reproductiva.



Derivado de la discusión anterior, se puede decir que la etapa reproductiva en un cultivo puede observarse o no (queda enmascarada), lo que depende de la intensidad y propiedades ópticas del fondo del cultivo. Este efecto de floración o etapa reproductiva puede conducir a errores en la estimación de la biomasa aérea cuando se usan sensores remotos (Shen *et al.*, 2010).

3.2.3 Floración

En el caso de la vegetación herbácea, se conocen los siguientes estadios asociados a la etapa de floración (Lang, 1965): (a) inducción floral (transición del desarrollo vegetativo al reproductivo en el meristema apical); (b) diferenciación temprana de las yemas florales; (c) desarrollo de yemas florales; y (d) antesis (apertura de las yemas florales y despliegue de flores). Para la vegetación arbórea la fenología es más compleja, pero se distinguen dos mecanismos generales que definen la transición del meristema vegetativo a la iniciación floral: (a) el meristema vegetativo cambia a reproductivo formando el eje de floración y (b) el meristema vegetativo permanece con la producción de flores lateralmente (Hallé *et al.*, 1978). Los factores que controlan la inducción floral en los árboles son diferentes de los de la antesis (Borchert, 1983), por lo que es importante diferenciarlos. La inducción floral generalmente está controlada por factores endógenos y, parcialmente, por ambientales (Borchert, 1983; Rathcke y Lacey, 1985).

En bosques tropicales caducifolios, en alguna medida, los eventos de precipitación en el periodo seco generalmente se asocian a la aparición de la floración (Opler *et al.*, 1976; Heideman, 1989; Borchert, 1983 y 1996; Valdez-Hernández *et al.*, 2010). El control de la floración (parcialmente) por factores climáticos permite utilizar modelos fenológicos con relativo éxito (Li *et al.*, 2012; y modelos revisados en este trabajo). No obstante esta situación, la información meteorológica en México es escasa y desactualizada, por lo que se dificulta utilizar esta estrategia para caracterizar la fenología de la vegetación natural.

En los bosques tropicales la floración se presenta bajo dos mecanismos (Borchert *et al.*, 2004; Valdez-Hernández *et al.*, 2010): (a) floración (expansión de yemas florales) acompañada de expansión de nuevas hojas y (b) floración sin hojas (expansión de yemas florales).



En bosques tropicales con caducidad del follaje, la floración suele presentarse posterior o, al término de la caída de hojas en la primavera (Borchert, 1996; Lobo *et al.*, 2003; Valdez-Hernández *et al.*, 2010), aunque también puede haber presencia de nuevo follaje y su expansión (Bullock y Solis-Megallenus, 1990; Kikim y Yadava, 2001). En bosques tropicales caducifolios generalmente se presenta un evento de floración y en los perennes dos o tres (Valdez-Hernández *et al.*, 2010). En términos de los estratos de los bosques, la fenología del estrato superior e inferior casi siempre están sincronizadas (Kikim y Yadava, 2001), por lo que la vegetación herbácea y arbustiva presenta patrones fenológicos similares a la vegetación arbórea, la cual tiene una sincronización entre especies para la presencia colectiva de eventos de floración (Opler *et al.*, 1976; Heideman, 1989; Bullock y Solis-Magallenus, 1990; Borchert *et al.*, 2004) que pueden asociarse con la coevolución de las plantas y sus polinizadores (Rathcke y Lacey, 1985).

La discusión anterior, en términos espectrales, plantea que la floración acompañada por la expansión del follaje puede definirse por un incremento del IV (incremento del follaje) y después una reducción con la apertura de la flores; aunque estos eventos pueden, o no, estar sincronizados. En el caso de floración sin expansión del follaje, el incremento de tejido fotosintético (yemas y botones florales) implica un incremento (de menor magnitud al del follaje) del índice de vegetación (no necesariamente detectable con sensores remotos) y, posteriormente, una disminución del mismo (aparición de flores). Estos mecanismos de incremento y decremento del IV se asocian con la vegetación caducifolia, pero no necesariamente pueden aplicarse a vegetación perenne, en donde la reflectancia del fondo verde predomina sobre la de la floración, a menos que su intensidad modifique el patrón de color.

El uso de cámaras digitales para detectar los eventos de floración muestra que la banda del rojo se incrementa (inicio de la floración a su pico) y después se reduce (pico de la floración a final) (Crimmins y Crimmins, 2008; Richardson *et al.*, 2009). Desafortunadamente, las cámaras digitales normales no tienen filtros para observar el infrarrojo cercano, por lo que su información es limitada. En experimentos de floración en vegetación herbácea (número de flores), se observa que con el incremento de la floración las bandas del R e IRC crecen simultáneamente (Hunt y Williams, 2006; Chen *et al.*, 2009). En el caso de bosques, Nilson *et al.*, (2012) muestran que la banda del R se incrementa y disminuye en la ocurrencia de la floración, en forma similar que



para el caso de la floración en vegetación herbácea. La banda del IRC, con ruido, muestra un patrón similar, pero no sincronizado, aparentemente, con la banda del R. Algo similar se observa en vegetación herbácea (Hunt y Williams, 2006).

De la revisión de los patrones temporales y espectrales de la vegetación, se concluye que el conocimiento asociado a la floración es todavía reducido, por lo que resulta importante generar una aproximación experimental que defina los alcances y limitaciones en el uso de los índices de vegetación para su caracterización; además de lo que se discutió previamente, en el sentido de que la floración en presencia del crecimiento del follaje puede producir un cambio en los IV.

3.3 MATERIALES Y MÉTODOS

Con el objetivo de aproximar el evento de floración en un bosque tropical caducifolio o vegetación caducifolia en general, se desarrolló un experimento usando el enfoque propuesto por Ge *et al.* (2006). En el experimento realizado la vegetación y sus estadios fenológicos se generan a partir de componentes (*e.g.* tallos, yemas, flores abiertas y postflores), al cambiar sus proporciones. Para el experimento se usaron flores de plantas ornamentales del género *Chrysanthemum sp.* de tres colores (blancas, amarillas y lilas) en diferentes etapas fenológicas, así como follaje verde de algunas otras especies, ramas senescentes y frutos de algunos arbustos. Para las mediciones de reflectancias se utilizó un radiómetro con resolución espectral de 5 bandas (Azul, Verde, Rojo, Infrarrojo Cercano e Infrarrojo Medio; similares a las bandas del sensor TM del satélite Landsat), *datalogger* para el almacenamiento de datos y una cámara fotográfica digital. Las mediciones se realizaron a una altura de 120 cm, por lo que el área de visión circular tuvo un diámetro de 60 cm.

Los estadios simulados se muestran en el Cuadro 1, en donde los estadios del 4 al 6.66 corresponden a la floración, los estadios 1 a 3 a la pre-floración, los 7 y 8, a post floración. Al usar la escala fenológica BBCH (Henz, 19956) se generó una escala que aproxima la evolución temporal de los estadios simulados, particularmente en el caso del periodo del pico de la floración, hasta la caída total de las flores (4 a 6.66).



Cuadro 3.1 Estadios simulados en los experimentos

Estadio	Descripción
1	Ramas y estratos bajos verdes, paisaje seco
2	Aparecen las yemas florares, ramas parcialmente verdes en las puntas, estratos bajos verdes, paisaje semiseco
3	Aparecen los botones florales, ramas verdes, estratos bajos verdes, paisaje parcialmente Verde
4	Los sépalos dejan ver los pétalos, ramas verdes, estratos bajos verdes, paisaje parcialmente verde con tonos tenues de pre-floración
5	Aparecen las primeras flores, ramas verdes, estratos bajos verdes, paisaje parcialmente verde con tonos moderados de floración
6	Plena floración, ramas verdes, estratos bajos verdes, paisaje dominado por el color de la flor con tonos escasos de verde
6.33	Caída parcial de flores, ramas verdes, estratos bajos verdes, paisaje codominado por el tono de la floración y tonos secos de la vegetación; tonos verdes dispersos y escasos
6.66	Caída plena de flores, ramas verdes, estratos bajos verdes, paisaje semiseco, fondo con tonos de la floración
7	Paisaje codominante tonos verde y secos
8	Paisaje verde

En la Figura 3.7 se muestran los estadios pre floración y en la Figura 3.8 los estadios asociados a la floración. Se observa que los escenarios simulados son solo aproximaciones a los eventos fenológicos de la vegetación caducifolia, pero capturan la esencia del proceso. El experimento se diseñó para generar un análisis cualitativo de la evolución de las reflectancias y el IV para que, en conjunto con la evidencia experimental previa, fuera posible desarrollar un modelo fenológico espectral y definir los alcances y limitaciones en el uso de los índices de vegetación.



Figura 3.7 Estadios pre floración simulados en los experimentos.

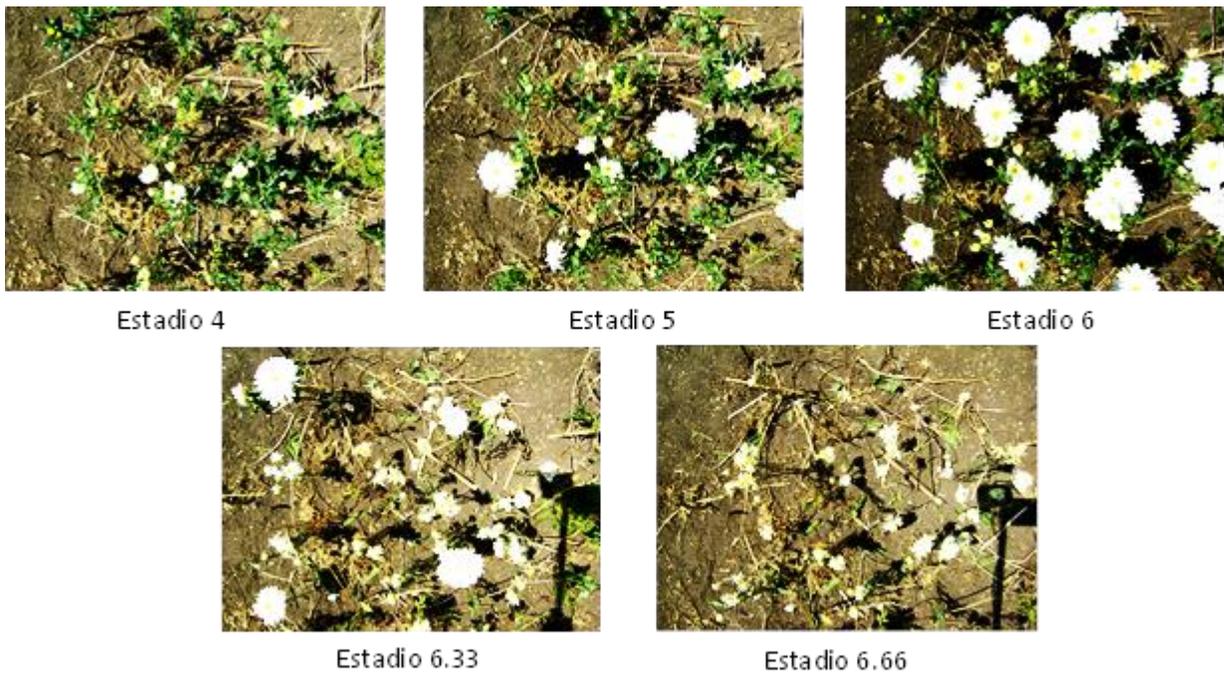


Figura 3.8 Estadios de la floración simulados en los experimentos.

Los estadios pre floración fueron los mismos para todos los tipos de flores: blanca, amarilla, lila y mezcla de todas, así mismo los estadios post floración también fueron los mismos.

3.4 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En la Figura 9 se muestra el Rn, IRCn e IVISn para los diferentes tipos de flores en los estadios de la floración, numerados por conveniencia del 1 (inicio) al 5 (final), con 3 en el punto máximo.

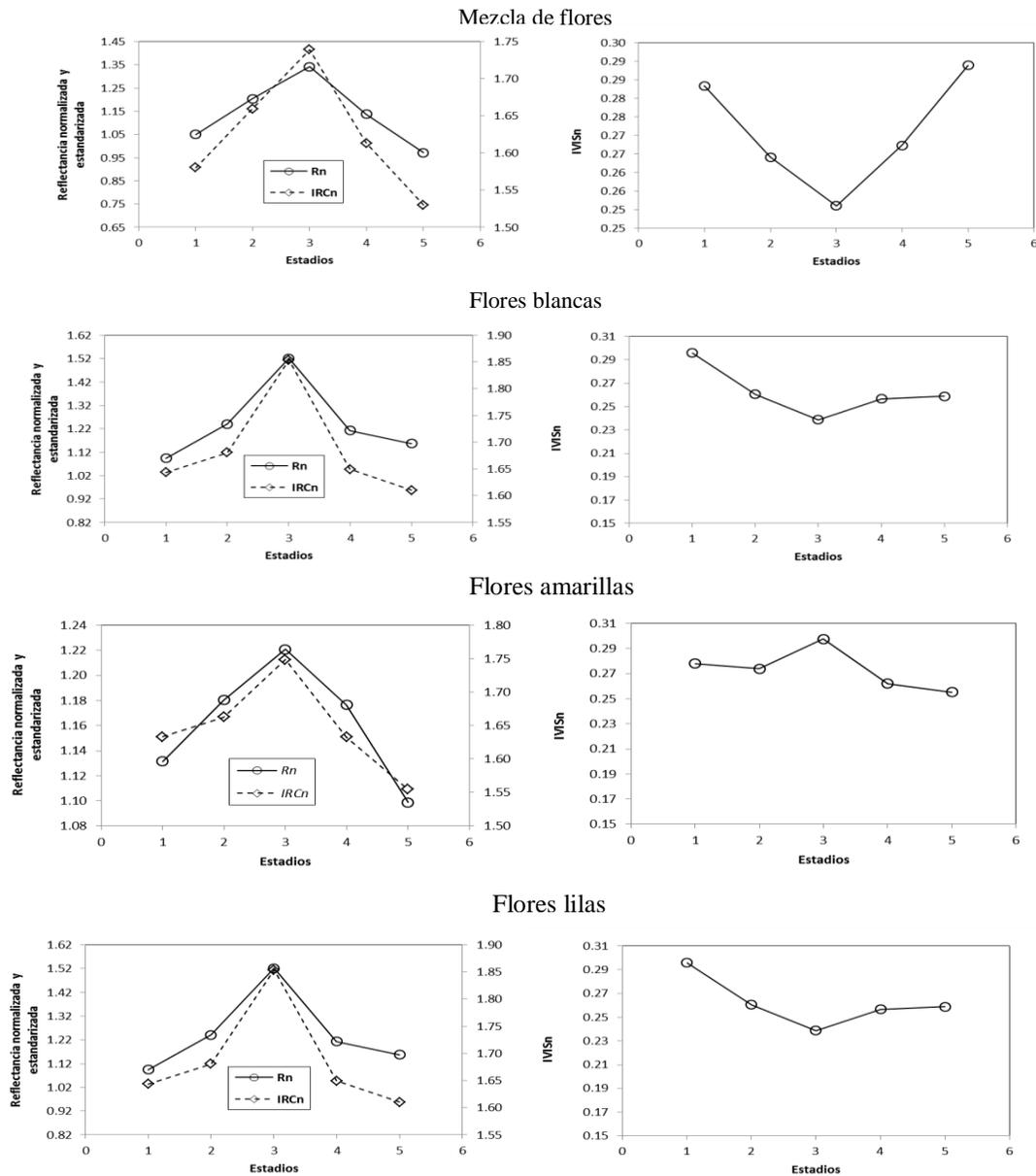


Figura 3.9 Estadios de la floración donde estadio 1 = inicio, 3 = pico y 5 = final. Rn IRCn son reflectancias normalizadas y estandarizadas del Rojo e Infrarrojo respectivamente, que toman valores de 0.8 a 2.30 para ángulos de iluminación de $>0^\circ$ hasta 30° y pueden alcanzar valores de 3.98 a 60° de iluminación.

En relación a la banda del rojo e infrarrojo cercano, los patrones muestran que ambas bandas crecen y decrecen en forma simultánea, tal como lo observaron otros autores (Crimmins y Crimmins, 2008; Richardson *et al.*, 2009; Nilson *et al.*, 2012). El IVISn decrece hasta el pico de la floración y después crece hasta el término de la misma; aunque en algunos casos este tipo de crecimiento no se observa y es contrario a lo esperado (flores amarillas; Shen *et al.*, 2009).

En la Figura 3.10 se muestran los estadios pre floración, floración y post floración en términos del IVISn.

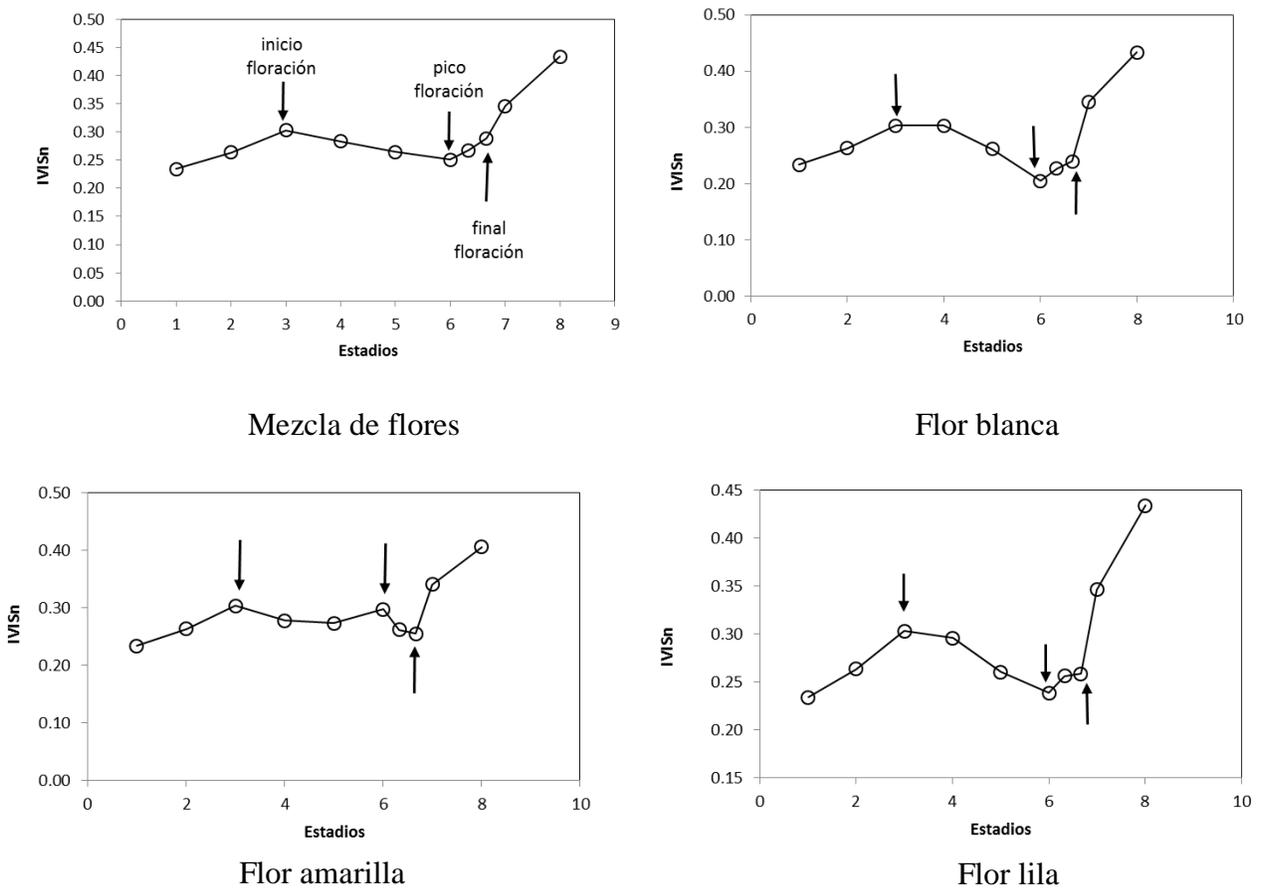


Figura 3.10 Índice IVISn para los diferentes tipos de flores, en los estadios de pre-floración, floración y post floración.

Los resultados del IVISn para los experimentos, muestran que la floración es detectable si se presenta un incremento de tejido fotosintético (pre floración) y, que el pico de la floración está asociado, generalmente, al valor más bajo del índice, antes del inicio del crecimiento del follaje (post floración). El uso de IV desarrollados para analizar el crecimiento de las hojas (Rn e IRCn

tienen patrones contrarios) tiene limitaciones intrínsecas con relación a la floración (Rn e IRCn tiene patrones similares). Un modelo aproximado de la fenología completa de los bosques tropicales se muestra en la Figura 3.11, en donde no es posible discriminar el término de la floración y el inicio del follaje.

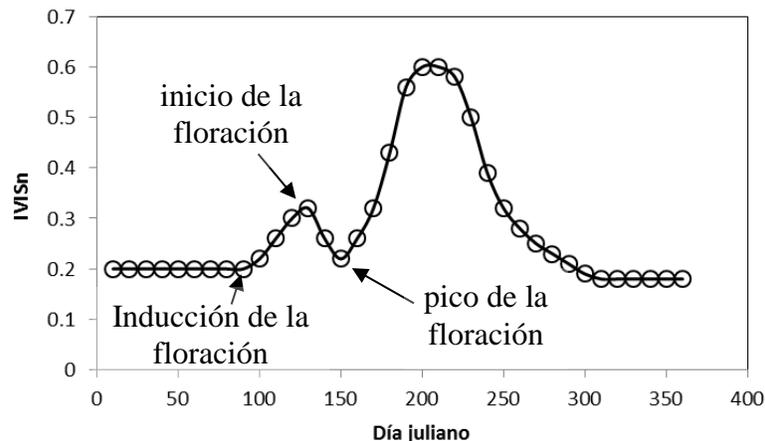


Figura 3.11 Esquemización de los estadios de la floración en un bosque tropical caducifolio.

El patrón de la floración que se muestra en la Figura 3.11 solo se detecta cuando la floración es intensa y sincronizada, además de que el fondo de la vegetación no es tan claro para enmascarar el color de las flores y sus mezclas.

3.5 CONCLUSIONES

La revisión y análisis de los patrones temporales de las bandas del rojo e infrarrojo cercano, normalizadas y estandarizadas por efecto de la geometría sol-sensor, mostró tendencias contrarias (una banda se incrementa y la otra se reduce) que permiten que los índices de vegetación generen crecimiento y decrecimiento (senescencia) del follaje. Cuando se presenta un cambio de la etapa vegetativa a la reproductiva en un cultivo agrícola, por ejemplo, los índices de vegetación detectan este estadio fenológico como contrario al patrón vegetativo o, sin cambio, lo que depende del tipo de fondo debajo del cultivo.

En el caso de la vegetación arbórea caducifolia, la revisión experimental muestra que la floración se asocia a un incremento y decremento de la banda del rojo. El análisis de los resultados del experimento en este trabajo, para simular los estadios pre floración, floración y post floración, muestran que en la floración las bandas del rojo y del infrarrojo cercano tienen tendencias



similares (crecen o decrecen al mismo tiempo), por lo que los índices de la vegetación responden con variaciones contrarias y pequeñas, en relación al follaje. Bajo la condición de un incremento del tejido fotosintético en la pre floración, es posible desarrollar un modelo fenológico que estime el inicio de la inducción floral, el inicio de la floración y su pico, aunque el término de la floración resulta difícil de detectar, cuando se enmascara por el inicio del crecimiento vegetativo del follaje.

Este trabajo muestra que es necesario desarrollar un nuevo índice de vegetación que detecte la floración, al considerar que las bandas del rojo e infrarrojo cercano tienen tendencias similares, contrario a los patrones de crecimiento del follaje para los que los índices fueron desarrollados.

3.6 LITERATURA CITADA

- Atkinson, P.M., C. Jeganathan, J. Dash, and C. Atzberger. 2012. Inter-comparison of four models for smoothing satellite sensor time-series data to estimate vegetation phenology. *Remote sensing of environment* 123, 400-417.
- Bausch, W.C. 1993. Soil background effects on reflectance based crop coefficients for corn. *Remote Sensing of Environment* 46, 213-222.
- Bolaños, M. y F. Paz. 2010. Modelación general de los efectos de la geometría de iluminación-visión en la reflectancia de pastizales. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 1, 349-361.
- Borchert, R. 1996. Phenology and flowering periodicity of neotropical dry forest species: evidence from herbarium collections. *Journal of Tropical Ecology* 12, 65-80.
- Borchert, R. 1983. Phenology and control of flowering in tropical trees. *Biotropica* 15, 81-89.
- Borchert, R., S.A. Meyer, R.S. Felger, and L. Porter-Bolland. 2004. Environmental control of flowering periodicity in Costa Rican and Mexican tropical dry forests. *Global Ecology and Biogeography* 13, 409-425
- Bullock, S.H., and J.A. Solis-Magallenus. 1990. Phenology of canopy trees of a tropical deciduous forest in Mexico. *Biotropica* 22, 22-35
- Casiano, M., F. Paz, A. Zarco, M. Bolaños, y E. Palacios. 2012. Escalamiento espacial de medios heterogéneos espectrales usando invarianzas temporales. *Terra Latinoamericana* 30, 315-326.
- Casiano, M. y F. Paz. 2014. Sobre la caracterización fenológica de bosques tropicales usando información espectral, experimentos con componentes. *Terra Latinoamericana*, en prensa.
- Chen, J., M. Shen, X. Zhu, and Y. Tang. 2009. Indicator of flower status derived from in situ hyperspectral measurement in an alpine meadow on the Tibetan Plateau. *Ecological Indicators* 9, 818-823.
- Crimmins, M.A., and T.M. Crimmins. 2008. Monitoring plant phenology using digital repeat photography. *Environmental Management* 41, 949-958.



- Cuba, N., J. Rogan, Z. Christman, C.A. Williams, L.C. Schneider, D. Lawrence, and M. Millones. 2013. Modeling dry season deciduousness in Mexican Yucatan forest using MODIS EVI data (2000-2011). *GIScience and Remote Sensing*. DOI, 10.1080/15481603.2013.778559.
- de Jong, B., C. Anaya, O. Masera, M. Olguín, F. Paz, J. Etchevers, R. Martínez, G. Guerrero, and C. Balbontín. 2010. Greenhouse gas emissions between 1993 and 2002 from land-use change and forestry in Mexico. *Forest Ecol. Manag.* 260, 1689–1701.
- Fisher, J.I., J.F. Mustard, and M.V. Vadeboncoeur. 2006. Green leaf phenology at Landsat resolution, scaling from the field to the satellite. *Remote Sensing of Environment* 100,265-279.
- Ge, S., J. Everitt, R. Carruthens, P. Gong, and G. Anderson. 2006. Hyperspectral characteristics of canopy components and structure for phenological assessment of an invasive weed. *Environmental Monitoring and Assessment* 120,109-126.
- Hallé, R., A.A. Oldeman, and P.B. Tomlinson. 1978. *Tropical trees and forests an architectural analysis*. Springer Verlag, Berlin. 441 p.
- Heideman, P.D. 1989. Temporal and spatial variation in the phenology of flowering and fruiting in a tropical rainforest. *Journal and Ecology* 77, 1059-1079.
- Huete, A.R., R.D. Jackson, and D.F. Post. 1985. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote Sensing of Environment* 17, 37-53.
- Hunt, E.R., and A.E.P. Williams. 2006. Detection of flowering leaf spurge with satellite multispectral imagery. *Rangel. Ecol. Manage.* 59, 494-499
- INEGI. 2012. *La Apicultura de la Península de Yucatán, Censo Agropecuario 2007*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, Ags. 64 p.
- IPCC. 2007. *Climate Change. 2007, Impacts, adaptation, and vulnerability. Working Group I. Fourth Assessment Report of the Intergovernment Panel on Climate Change*. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Paluyimof, P.J. van der Linden, and C.E. Hanson (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge 976 p.



- Jiang, Z., A.R. Huete, K. Didan, and T. Miura. 2008. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment* 112, 3833-3845
- Kikim, A., and P.S. Yadava. 2001. Phenology of tree species in subtropical forests of Manipur in north eastern India. *Tropical Ecology* 42, 269-296.
- Kramer, K., I. Leinonen, and D. Loostau. 2000. The importance of phenology for the evaluation of impact of climate change on growth of boreal, temperate and Mediterranean forest ecosystems, an overview. *Int. J. Biometeorol.* 44, 67-75.
- Lang, A. 1965. Physiology of flower initiation. In, W. Ruhland (Ed.) *Differentiation and development. Encycl. Plant Physiology.* XV/1. Springer, Berlin pp. 1380-1536.
- Li, R.P., and G.S. Zhou. 2012. A temperature-precipitation based leafing model and its application in northeast China. *Plos ONE* 7(4), e33192. doi 10.1371/journal.pone.0033192.
- Liu, H.Q., and A. Huete. 1995. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing.* 33, 457-465.
- Lobo, J.A., M. Quesada, K.E. Stoner, E.J. Fuchs, Y. Herrerias-Diego, J. Rojas, and G. Saborio. 2003. Factors affecting phenological patterns in *bombacaceous* trees in seasonal forests in Costa Rica and Mexico. *American Journal of Botany* 90, 1054-1063.
- Meier, V. 1997. BBCH-monograph. Growth stages of plants - Entwicklungsstadien von Pflanzen - Estadios de las plantas - Développement des plantes. Blackwell Wissenschaftsverlag. Berlin, Wien 622 p.
- Nilson, T., M. Rautiainen, J. Pisek, and Peterson. 2012. Seasonal reflectance courses of forests. *New Advances and Contributions to Forestry Research.* A.A. Oteng-Amoako (Ed.). ISBN 978-953-51-0529-9. In Tech. Chapter 3, pp. 33-58
- Ochoa-Gaona, S., y V. Cruz-Arias. 2002. La distribución y fenología de la flora arbórea del estado de Tabasco con base a la información de herbario. *Universidad y Ciencia* 18, 114-127.



- Odi-Lara, M., F. Paz-Pellat, R. López-Urrea, y J. González-Piqueras. 2013. Definición de la etapa de desarrollo de los cultivos para estimar evapotranspiración usando la metodología FAO-56 y sensores remotos. *Tecnología y Ciencias del Agua* 4, 87-102
- Opler, P.A., G.W. Frankie, and H.G. Baker. 1976. Rainfall as a factor in the release, timing and synchronization of anthesis by tropical trees and shrubs. *Journal of Biogeography* 3, 231-236.
- Parihar, J.S., S. Goroshi, R.P. Singh, N.S.R. Krishnappa, M.B. Sirsayya, A. Kumar, L.S. Rawat, and A. Sonakia. 2013. Observation of forest phenology using field-based digital photography and satellite data. *Current Science* 105, 1740-1747.
- Paz, F., E. Palacios, E. Mejía, M. Martínez, y L.A. Palacios. 2005. Análisis de los espacios espectrales de la reflectividad del follaje de los cultivos. *Agrociencia* 39,293-301.
- Paz, F., M. Reyes, y E. Medrano. 2011. Diseño de índices espectrales de la vegetación usando curvas iso-suelo. *Agrociencia* 45, 121-134.
- Peñuelas, J., and I. Fillela. 2001. Phenology-responses to a warning world. *Science* 294,793-794.
- Post, E.S., C. Pedersen, C.C. Wilmeas, and M.C. Forchhammer. 2008. Phenological sequences reveal aggregate life history response to climate warning. *Ecology* 89, 363-370.
- Prinack, R.B. 1985. Longevity of individual flowers. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 16, 15-37.
- Rathcke, B., and E.P. Lacey. 1985. Phenological patterns of terrestrial plants. *Ann. Re. Ecol. Syst.* 16, 179-214.
- Reyes, M., F. Paz, M. Casiano, F. Pascual, M.I. Marin, y E. Rubiños. 2011. Caracterización del efecto de estrés usando índices espectrales de la vegetación para la estimación de variables relacionadas con la biomasa aérea. *Agrociencia* 45, 221-233
- Richardson, A.D., B.H. Braswell, O.Y. Hollinger, J.P. Jenkins, and S.V. Ollinger. 2009. Near surface remote sensing of spatial and temporal variation in canopy phenology. *Ecological Applications* 19, 1417-1428.
- Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell, D.W. Deering, and J.C. Harlan. 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation, NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD. pp, 1-371.



- Running, S.W., and R.R. Nemani. 1991. Regional hydrologic and carbon balance response of forest resulting from potential climate change. *Clim. Change* 19,349-368.
- Schwartz, M.D., R.Ahas, and A. Aasa. 2006. Onset of spring starting earlier across the Northern Hemisphere. *Global Change Biology* 12, 343-351.
- Shabanov, N.Y., L. Zhou, Y. Knyazikhin, R.B. Myneni, and C.J. Tucker. 2002. Analysis of interannual changes in northern vegetation activity observed in AVHRR data from 1981 to 1994. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40,115-130.
- Shen, M., J. Chen, X. Zhur, and Y. Tang. 2009. Yellow flowers can decrease NDVI and EVI values, evidence from a field experiment in an alpine meadow. *Canadian Journal of Remote Sensing* 35, 99-106
- Shen, M., J. Chen, X. Zhu, Y. Tang, and X. Chen. 2010. Do flowers affect biomass estimate from NDVI and EVI? *International Journal of Remote Sensing* 31, 2139-2149.
- Stöckli, and P.L. Vidale. 2004. European plant phenology and climate as seen in a 20-year AVHRR land-surface parameter dataset. *Int. J. Remote Sensing* 25, 3303-3330.
- Valdez-Hernandez, M., J.L. Andrade, P.C. Jackson, and M. Rebolledo-Vieyra. 2010. Phenology of five tree species of a tropical dry forest in Yucatan, Mexico, effects of environmental and physiological factors. *Plant Soil* 329, 155-171.
- White, M.A., S.W. Running, and P.E. Thornton. 1999. The impact of growing – season length variability on carbon assimilation and evapotranspiration over 88 years in the eastern US deciduous forest. *Int. J. Biometeorol.* 42,139-145.
- Wilson, K.B., and D.D. Baldocchi. 2000. Seasonal and interannual variability of energy fluxes over a broadleaved temperate deciduous forest in North America. *Agric. Meteorol.* 100,1-18.
- Zhang, P. and B. Anderson. 2004. Climate-related vegetation characteristics derived from moderate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) leaf area index and normalized difference vegetation index. *Journal of Geophysical Research.* doi,10.1029/2004JD004720.



- Zhang, X., M.A. Friedl, B. Tan, M.D. Goldberg, and Y. Yu. 2012. Long-term detection of global vegetation phenology from satellite instruments. In, X. Zhang (Ed.) Phenology and Climate Change. ISBN 978-953-51-0336-3. In Tech doi,10.5772/39197. Chapter 16, pp. 297-320.
- Zhang, X., M.A. Friedl, and C.B. Schaaf. 2006. Global vegetation phenology from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), evaluation of global patterns and comparison with in situ measurements. Journal of Geophysical Research. doi,10.1029/2006J6000217.



CAPITULO IV: CARACTERIZACIÓN FENOLÓGICA DE LA FLORACIÓN: EVIDENCIA EXPERIMENTAL Y DE CAMPO.

RESUMEN

Cada vez más se requiere que las observaciones de sensores remotos sobre fenología de la vegetación se ajusten a la realidad, particularmente en relación a los patrones sobre fenología de floración que se han estudiado poco a nivel satelital, por lo que se requiere del diseño metodológico para su caracterización apoyadas en observaciones fenológicas de campo y con la posibilidad de vincularse a productos satelitales de mediana resolución que proporcionen información fenológica ágil y útil. En este sentido, el objetivo principal de este trabajo fue proponer un índice de floración capaz de captar la dinámica fenológica de la floración y desarrollo vegetativo basado en observaciones experimentales y de campo. Los experimentos revisados en este trabajo permitieron proponer un índice de floración (IFVIS) basado en las bandas espectrales que usan la mayoría de los sensores remotos en satélites. Evidencias experimentales y de campo mostraron que el Índice de Floración y Vegetación (IFVIS) apoyado en reflectancias normalizadas y estandarizadas logra captar las etapas fenológicas de pre floración, floración y post floración.

Palabras clave: Fenología, Percepción remota, Índices de floración.



4.1 INTRODUCCIÓN

La fenología vegetal proporciona información valiosa debido a la repuesta que brindan los ecosistemas ante el cambio climático. La fenología es un punto de referencia de primer orden en el análisis de almacenes de carbono y producción primaria de los ecosistemas terrestres. Las observaciones de sensores remotos sobre fenología de la vegetación se usan frecuentemente para parametrizar modelos la dinámica estacional los ecosistemas. De esta manera se necesitan un conjunto de datos y métodos que vinculen las observaciones fenológicas de campo a productos satelitales de mediana resolución que proporcionen información fenológica real (Melaas *et al.*, 2013). En el caso de la floración de la vegetación, los patrones se han estudiado poco a nivel satelital, por lo que se requiere del diseño de las bases metodológicas para su caracterización. En este sentido, el objetivo principal de este trabajo fue desarrollar un enfoque que permita caracterizar los estadios fenológicos más importantes de la floración tomando como referencia las bandas espectrales que usan la mayoría de los sensores remotos en satélites por lo que en este trabajo se decidió considerar solo las bandas del rojo (R) e infrarrojo cercano (IRC); además, con base en la revisión experimental realizada por Casiano y Paz (2014, en prensa) para simular los estadios pre floración, floración y post floración, se propuso un índice de floración IFVIS. El objetivo del IFVIS fue captar la dinámica del sistema que implica que cuando dos variables exhiben un patrón temporal similar, el producto de ellas resulta en un patrón similar al de ambas, este es caso del R e IRC cuando interactúan bajo el proceso de floración; así se buscó, además, que el índice captara el patrón opuesto, es decir el momento en que el producto entre el R e IRC tiende hacia el patrón de la variable que exhibe una menor amplitud (una variable se incrementa y la otra se reduce por proceso fotosintético). El experimento realizado en este trabajo mostró que el índice de floración (IFVIS) logra captar en esencia los estadios fenológicos de la floración, mostrados como un incremento del IFVIS. Por otra parte, el IFVIS muestra tendencias de la capacidad que tienen para representar un mismo estadio de floración independientemente de los fitoelementos subyacentes sobre los que se encuentre. En cuanto al trabajo de campo, el IFVIS mostró coherencia en la detección de floración, sin embargo es necesaria su evaluación con más observaciones sobre diferentes especies.



4.2 OBJETIVOS

Proponer un Índice de floración capaz de captar la dinámica fenológica de la floración y desarrollo vegetativo, con base en reflectancias normalizadas y estandarizadas.

Mostrar evidencia experimental sobre los alcances y limitaciones del índice de floración propuesto.

Mostrar evidencia a nivel de campo sobre la operatividad del índice de floración propuesto.

4.3 HIPÓTESIS

Con base en la revisión experimental realizada por Casiano y Paz (2014) para simular los estadios pre floración, floración y post floración, donde se planteó que en el proceso fenológico de la floración las bandas del rojo y del infrarrojo cercano crecen o decrecen simultáneamente, se plantea la hipótesis:

- a) Es posible generar un índice de floración que capte la dinámica fenológica de la floración y del desarrollo vegetal.

4.4 REVISIÓN DE LITERATURA

Los datos sobre fenología observados por sensores a bordo de satélites se definen como fenología de la superficie (de Bursa y Henebry, 2004; Fried *et al.*, 2006), debido a la revisita que hace el satélite al mismo sitio y puede captar las variaciones estacionales de la vegetación.

Las observaciones de la fenología vegetal proporcionan información valiosa debido a la repuesta que brindan los ecosistemas ante el cambio climático. La fenología es un punto de referencia de primer orden en el análisis de almacenes de carbono y de energía terrestres donde las observaciones de sensores remotos sobre fenología de la vegetación se usan frecuentemente para parametrizar modelos la dinámica estacional de la vegetación en los ecosistemas. Por tanto, se necesitan un conjunto de datos y métodos que vinculen las observaciones fenológicas de campo a productos satelitales de mediana resolución que proporcionen información fenológica real (Melaas *et al.*, 2013). En este sentido conviene realizar una revisión sobre el uso de los sensores remotos en el seguimiento fenológico de la vegetación. Los sensores remotos ha sido



ampliamente utilizada para hacer seguimientos de la vegetación ya que presenta ventajas significativas frente a estudios de campo, debido a que permite abarcar grandes extensiones de terreno, se tiene registros históricos (mínimo 10 años de MODIS) y permite la caracterización de vegetación en zonas de difícil acceso. Sin embargo, la fenología en el ámbito de los sensores remotos mucho menos detallada que la que se puede realizar en campo y no pretende hacer seguimiento a individuos ni especies en bosques naturales, menos en zona de tan alta biodiversidad como los Trópicos. En los sensores remotos la fenología se entiende como la dinámica de la vegetación debido al cambio en verdor. Esta dinámica está asociada a cambios en las características físicas y químicas de las plantas, específicamente en la estructura de las hojas y en los procesos fotosintéticos. Existen diversos índices para representar el verdor, pero los más populares son el índice de vegetación normalizado NDVI y el índice de vegetación mejorado EVI, los cuales se basan en la reflectancia de longitudes de onda pertenecientes a la parte de onda corta del espectro electromagnético. Estos índices de vegetación para calcularse utilizan imágenes de los sensores AVHRR y MODIS como insumos. AVHRR tiene una serie temporal que inicia en 1978, lo cual permite generar una serie de tiempo suficientemente larga para estudiar la dinámica de la vegetación y sus cambios (Myneni *et al.*, 1998; Potter *et al.*, 2003; Tucker *et al.*, 2001; Brown *et al.*, 2006). El sensor MODIS fue diseñado para realizar estudios de vegetación, con mejores características en resolución espacial, exactitud horizontal y corrección atmosférica, sin embargo MODIS frente a AVHRR en su serie temporal, que apenas supera su primera década.

4.4.1 Los Índices de Vegetación y el ciclo fenológico de la floración.

Muchos índices de vegetación se apoyan en que la actividad fotosintética de las plantas tiene dos picos; uno de absorción en el rojo (630-700nm) y otro de reflexión en el infrarrojo cercano (730-950nm). Las bandas del rojo (R) y del infrarrojo cercano (IRC) se usan para discriminar el crecimiento de la vegetación, dado su alto contraste entre la banda fotosintética del R y la no fotosintética del IRC (Tucker, 1979). A partir de este par de bandas se han desarrollado numerosos índices espectrales de la vegetación o IV (Verstraete and Pinty, 1996; Gilabert *et al.*, 2002; Paz *et al.*, 2007). Los IV se han relacionado empíricamente con la biomasa de la vegetación, obteniendo correlaciones estadísticas (Tucker *et al.*, 1981; Calera *et al.*, 2004) que presumen una relación fija y el supuesto de medios física y radiativamente homogéneos.

Casiano y Paz (2014, en prensa) en un experimento de componentes para simular estados fenológicos pre floración, floración y post floración en la vegetación, utilizaron reflectancias normalizadas y estandarizadas a la geometría sol-sensor con valores para el ángulo de visión (θ_v) y ángulo cenital solar (θ_s) de 0° y 30° , respectivamente; de tal forma que todas las mediciones espectrales tuvieron una base común de observación de acuerdo al modelo desarrollado por Bolaños y Paz (2010). Así, se utilizó un índice de vegetación que considera las curvas iso-suelo para el análisis de los patrones temporales de la vegetación (Paz *et al.*, 2011), pero en términos de reflectancias normalizadas y estandarizadas:

$$IVISn = -\ln\left(\frac{dIRCn^\infty - dIRCn}{dIRCn^\infty - dIRCns}\right) \quad (1)$$

$$dIRCn = IRCn - (a_{ns} + b_{ns} Rn)$$

Donde: $dIRCns = 0$, $dIRCn^\infty = 3$, $a_{ns} = 0$ y $b_{ns} = 0.8$ para los análisis de diferentes experimentos.

La Figura 4.1 muestra el Rn , $IRCn$ e $IVISn$ para los diferentes tipos de flores en los estadios de la floración, numerados por conveniencia del 1 (inicio) al 5 (final), con 3 en el pico.

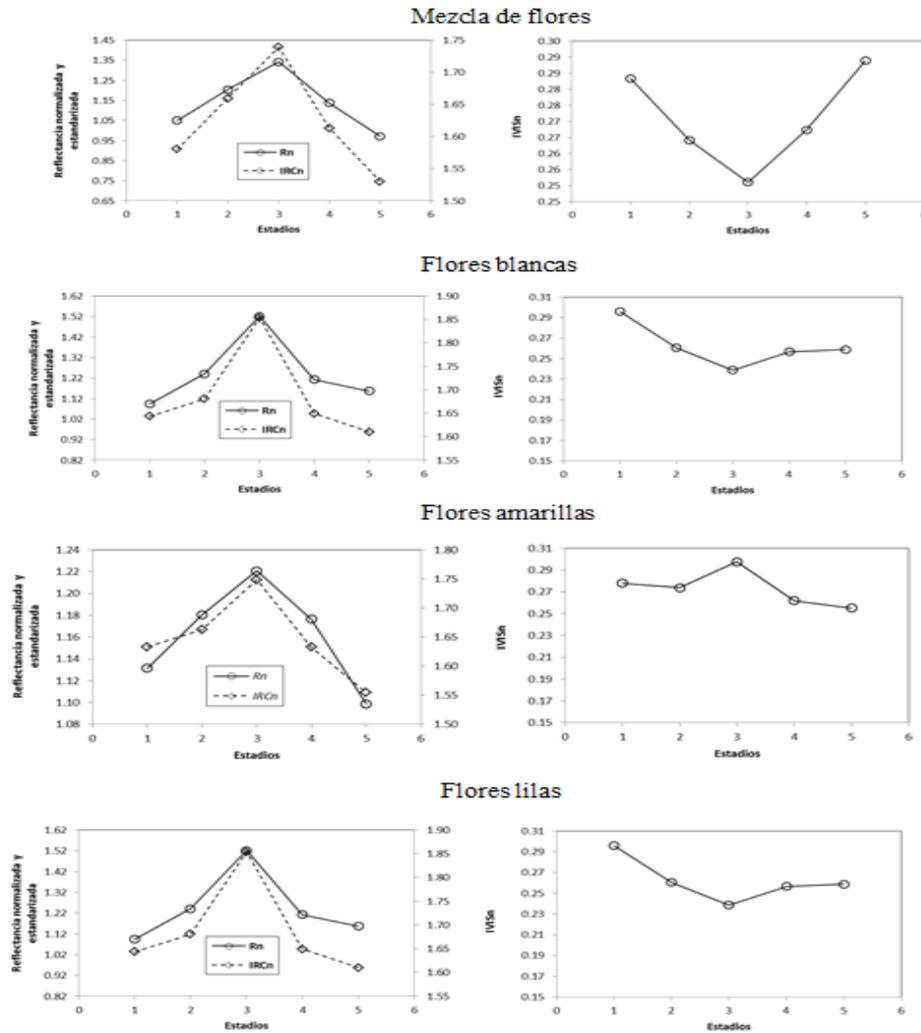


Figura 4.1 Estadios de la floración donde estadio 1 = inicio, 3 = pico y 5 = final. Rn IRCn son reflectancias normalizadas y estandarizadas del Rojo e Infrarrojo respectivamente, que toman valores de 0.8 a 2.30 para ángulos de iluminación de $>0^\circ$ hasta 30° y pueden alcanzar valores de 3.98 a 60° de iluminación.

4.4.2 Modelo semi-empírico de fenología de la floración

La Figura 4.1 muestra que el patrón de comportamiento del rojo e infrarrojo cercano, en ambas bandas crecen y decrecen en forma simultánea, tal como lo observaron otros autores (Crimmins y Crimmins, 2008; Richardson *et al.*, 2009; Nilson *et al.*, 2012). En tanto que el IVISn decrece hasta el pico de la floración y después crece hasta el término de la misma; aunque en algunos casos este tipo de crecimiento no se observa y es contrario a lo esperado (flores amarillas; Shen *et al.*, 2009). El experimento mostró que en la floración las bandas del rojo y del infrarrojo



cercano tienen tendencias similares (crecen o decrecen al mismo tiempo), por lo que los índices de la vegetación responden con variaciones contrarias y pequeñas, en relación al follaje. Bajo la evidencia experimental en que ambas bandas varían en el mismo sentido durante la floración permite proponer de manera semi-empírica, que la amplificación de la magnitud dada por el producto de la banda del R e IRC suponen floración, en tanto que una disminución del producto por el efecto contrario entre las dos bandas supone actividad fotosintética asociada al crecimiento del follaje, por lo tanto:

- Cuando dos variables exhiben un patrón temporal similar, el producto de ellas resulta en un patrón similar al de ambas; el patrón resultante muestra con mayor nitidez la dinámica caracterizada por cada una de las variables (R-IRC).
- Si estas variables se suman, el resultado es un patrón cuya forma se aproxima al de la variable que presenta mayor variación durante el intervalo temporal, pero su amplitud es mayor que el de ambas.
- Si una de las variables presenta un patrón opuesto al de la otra, el patrón del producto tiende hacia el patrón de la variable que exhibe una menor amplitud.

De acuerdo con lo anterior, podemos proponer un índice para capturar la floración apoyado en reflectancias normalizadas y estandarizadas, como la razón entre el factor que describe la dinámica del sistema con respecto a la cantidad total de energía interactuando en dicho sistema, esto es:

$$\text{IFVIS} = (\text{Rn} \times \text{IRCn}) / (\text{Rn} + \text{IRCn}) \quad (2)$$

Dónde:

IFVIS = Índice de Floración y Vegetación de reflectancias normalizadas y estandarizadas

Rn = Reflectancia Normalizada y estandarizada de la banda Rojo

IRCn = Reflectancia Normalizada y estandarizada de la banda del Infrarrojo Cercano

4.5 MATERIALES Y MÉTODOS

Para verificar el comportamiento del IFVIS se planteó un experimento bajo los siguientes supuestos:

- Es posible establecer la curva fenología de la floración bajo la condición de un incremento del tejido fotosintético en la pre floración que indique el inicio de la inducción floral, un incremento de los valores de reflectancias en las bandas del R-IRC que indique el inicio de la floración y su pico, aunque el término de la floración resulta difícil de detectar, cuando se enmascara por el inicio del crecimiento vegetativo del follaje.
- En la naturaleza, la floración suele ser escalonada, por lo que IVFIS deber ser sensible al incremento paulatino de la floración aunado de manera independiente al crecimiento del follaje.
- Dejando fija la cantidad de flor y variando el material subyacente, la consecuencia sobre el IVFIS tendrá implicaciones mínimas al tratarse de que la dinámica de la bandas atiende eminentemente al efecto de la floración.

4.6 Ubicación del lugar de medición.

El experimento se realizó en San Luis Potosí, en el paraje “La presa de San José”, cuyas coordenadas $22^{\circ} 08' 55.27''$ de latitud Norte y $-101^{\circ} 01' 53.63''$ de Longitud Oeste.

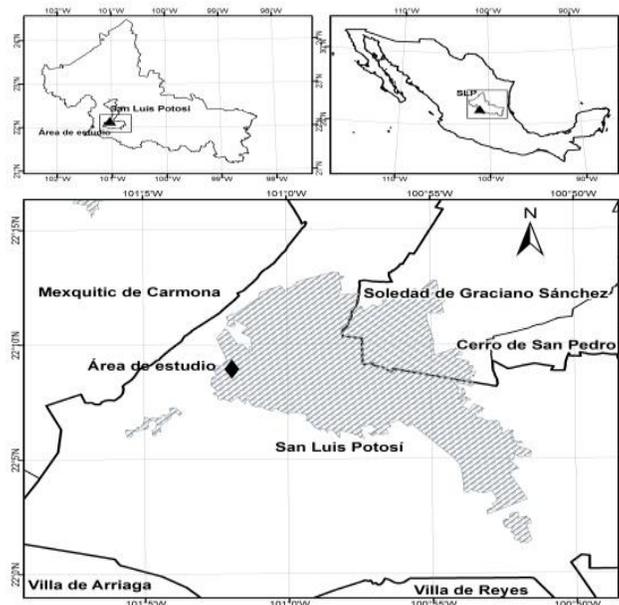


Figura 4.2 Ubicación geográfica del experimento.

El experimento se realizó con arbustos de *Salsola collina*, conocida como radadora (Figura 4.2a y 4.2b) y flores blancas de crisantemo (*Chrysanthemum Parthenium* var. *Satimex*), Figura 2.c, así como margaritas (*Chrysanthemum leucanthemum*) (Figura 4.2.d), las cuales se fueron colocando sobre la rodadora, figura 4.2.e.



Figura 4.2 Utilización de *Salsola collina* (a), conocida como radadora (b) y flores blancas de crisantemo (*Chrysanthemum Parthenium* var. *Satimex*) (c), así como margaritas (*Chrysanthemum leucanthemum*) (d), en el desarrollo del experimento (e).

Las mediciones de reflectancia espectral y la cobertura floral (CF) se llevaron a cabo bajo condiciones de cielo soleado entre ángulos de elevación solar entre 1 y 30 grados, del día 8 de Junio de 2014. Las mediciones espectrales se realizaron con un radiómetro multispectral portátil (MSR5-590, CROPSCAN, Inc. U.S.A); que mide reflectancias del dosel en cinco regiones del espectro electromagnético (485, 560, 660, 830, 1650 nm) y cuyo campo de visión del sensor es de 28°. El radiómetro fue montado en un bastón telescópico en posición cenital a 3.0 m sobre el suelo, cubriendo un área de 1.76 m² (a la que llamamos área efectiva de medición, AEM). La reflectancia final para cada punto de muestreo fue el promedio de tres repeticiones. Cada punto de muestreo correspondió a una proporción de suelo-vegetación, medida secuencialmente en 100% Suelo-0% Vegetación (Posición 1), 50% Suelo-50% Vegetación (Posición 2) y 0% Suelo-100% Vegetación (Posición 3), Figura 1, de cada arreglo suelo-vegetación-flor, al que en lo sucesivo denominaremos patrón artificial de floración (PAF).

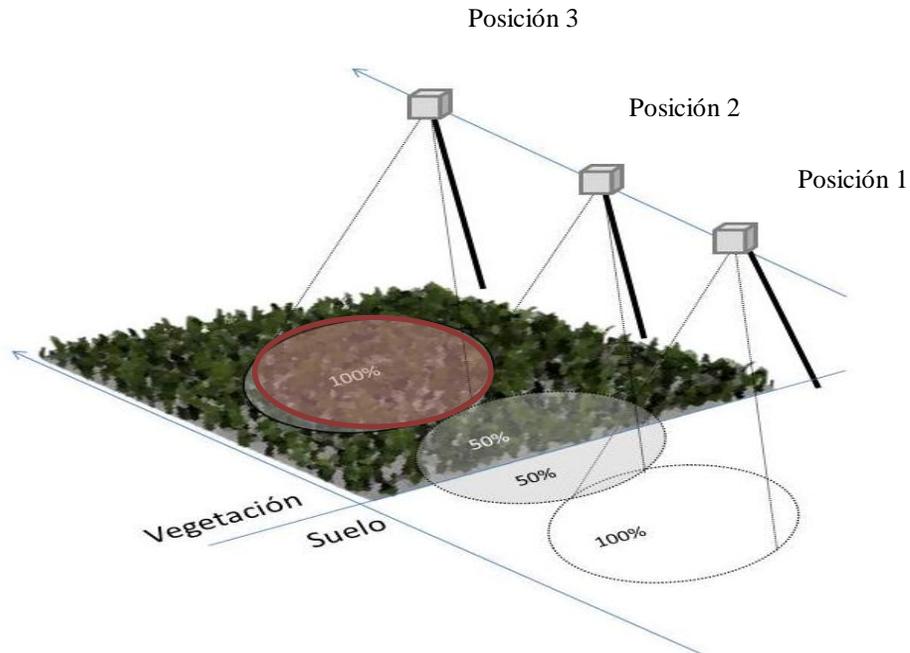


Figura 4.3 Puntos de muestreo, con base a proporción suelo-vegetación

Para cada PAF se usaron flores blancas de dos tipos (*Chrysanthemum Parthenium* var. *Satimex*) y margaritas (*Chrysanthemum leucanthemum*), sobrepuestas sobre plantas jóvenes de *Salsola collina* (rodadora) de un metro de altura en promedio. Para cada PAF se utilizaron parcelas de 2m x 2m con 0% (solo suelo), 20%, 40%, 60%, 80% y 100% de cobertura de rodadora (representación nominal de la vegetación subyacente). El porcentaje de floración sobre *Salsola collina*, de cada PAF, se hizo variar gradualmente en porcentajes nominales de 0%, 20%, 40%, 60%, 80% y 100%. Además de variar el porcentaje de floración sobre la rodadora, se emplearon dos arreglos de distribución de las flores, al azar y agrupados. El diseño de escenarios de cada PAF se muestra en la figura 4.4.a y figura 4.4.b.

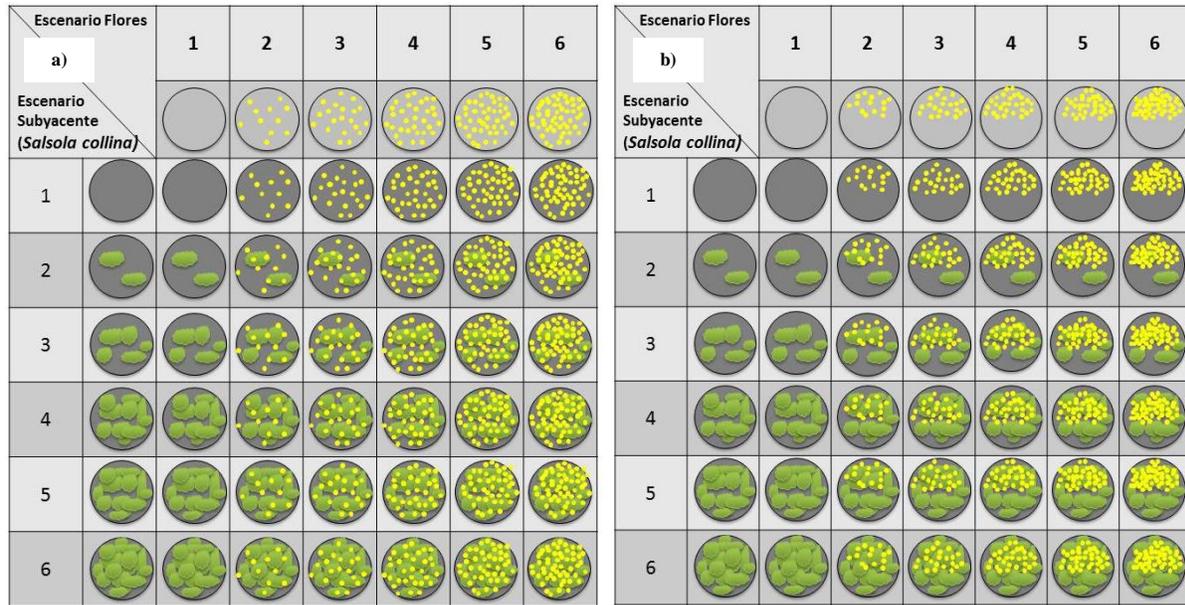


Figura 4.4 El encabezado vertical se refiere a parcelas fijas de *Salsola collina* bajo diferente cobertura del dosel, sobre las que se hizo variar diferentes porcentajes de flor en dos arreglos: al azar (a) y agrupados (b). El encabezado horizontal indica la variación gradual de la cobertura floral.

4.6.1 Observaciones del comportamiento del IFVIS en campo.

En campo, durante los meses de febrero y marzo del 2014 se le dio seguimiento a 11 árboles de Huizache (*Acacia farnesiana*), en dos parcelas de aproximadamente 30 m de largo por 30 m de ancho, localizadas en el parque urbano de la presa San José, San Luis Potosí, S.L.P., con coordenadas centrales de parcela 22.14857° de Latitud norte y -101.046513° de Longitud Oeste (Unidad de Muestreo 1) y 22.149563° de Latitud norte y, -101.045748° de Longitud Oeste (Unidad de Muestreo 2), Figura 4.6. Las alturas de los huizaches medidos fluctuaron entre 1 y 2 m, los estados fenológicos fueron referidos y adaptados a la escala BBCH (Hack *et al.*, 1996) y reportados en bitácoras, Figura 4.5.



Figura 4.5 Ejemplares de huizache (*Acacia farnesiana*), bajo seguimiento fenológico.



Figura 4.6 Localización de las unidades de muestreo de árboles de huizache (*Acacia farnesiana*).



Figura 4.7 Localización de huizaches dentro de la unidad de muestreo 1.

4.7 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Bajo el diseño de PAFs y dada la secuencia de medición se obtuvieron 142 firmas espectrales y fotografías. En la Figura 4.8, solo se muestran las fotografías de la posición 3; es decir, área de vegetación. En cada punto de muestreo de cada PAF se tomó una fotografía a nadir utilizando una cámara con resolución 3648 x 2736 pixeles; es decir de cada promedio de medición radiométrica cuenta con una fotografía a nadir del AEM en la cual se estimó la cobertura floral y vegetal.

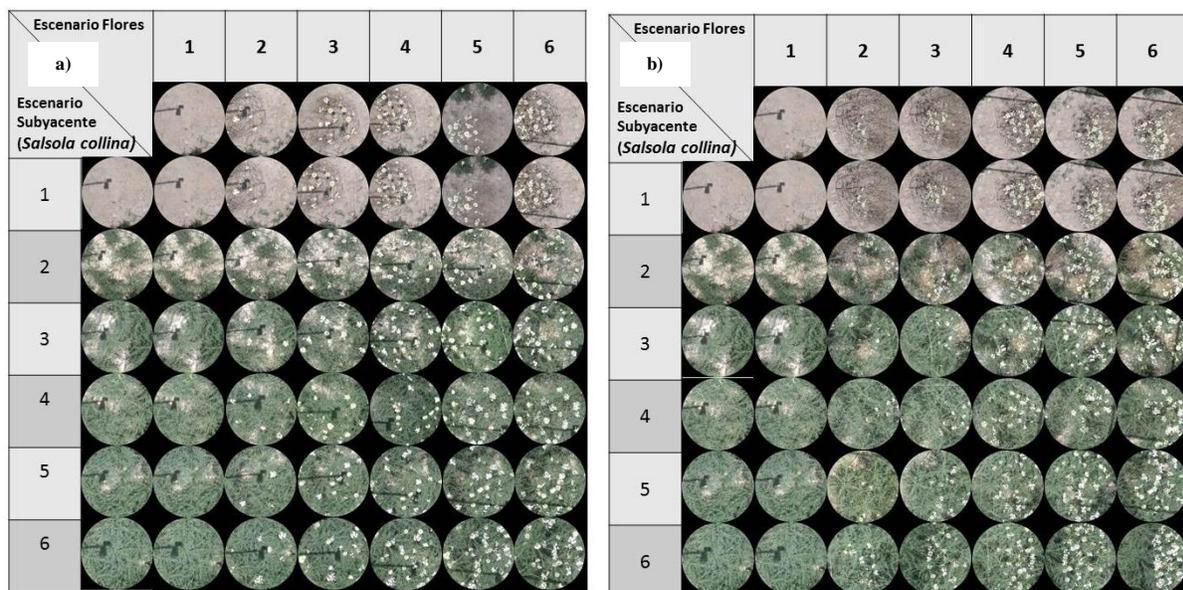


Figura 4.8 Conjunto fotográfico de AEM's, para patrones aleatorios y agrupados de medición.



Bajo la evidencia experimental de que es posible establecer la curva fenología de la floración bajo la condición de un incremento del tejido fotosintético en la pre floración que indique el inicio de la inducción floral, un incremento de los valores de reflectancias en ambas bandas del R-IRC que indique el inicio de la floración y su pico, se plantearon seis escenarios hipotéticos de vegetación subyacente sobre los que se simuló un incremento de la floración con el fin de evaluar de manera experimental al IFVIS para captar el efecto de la floración.

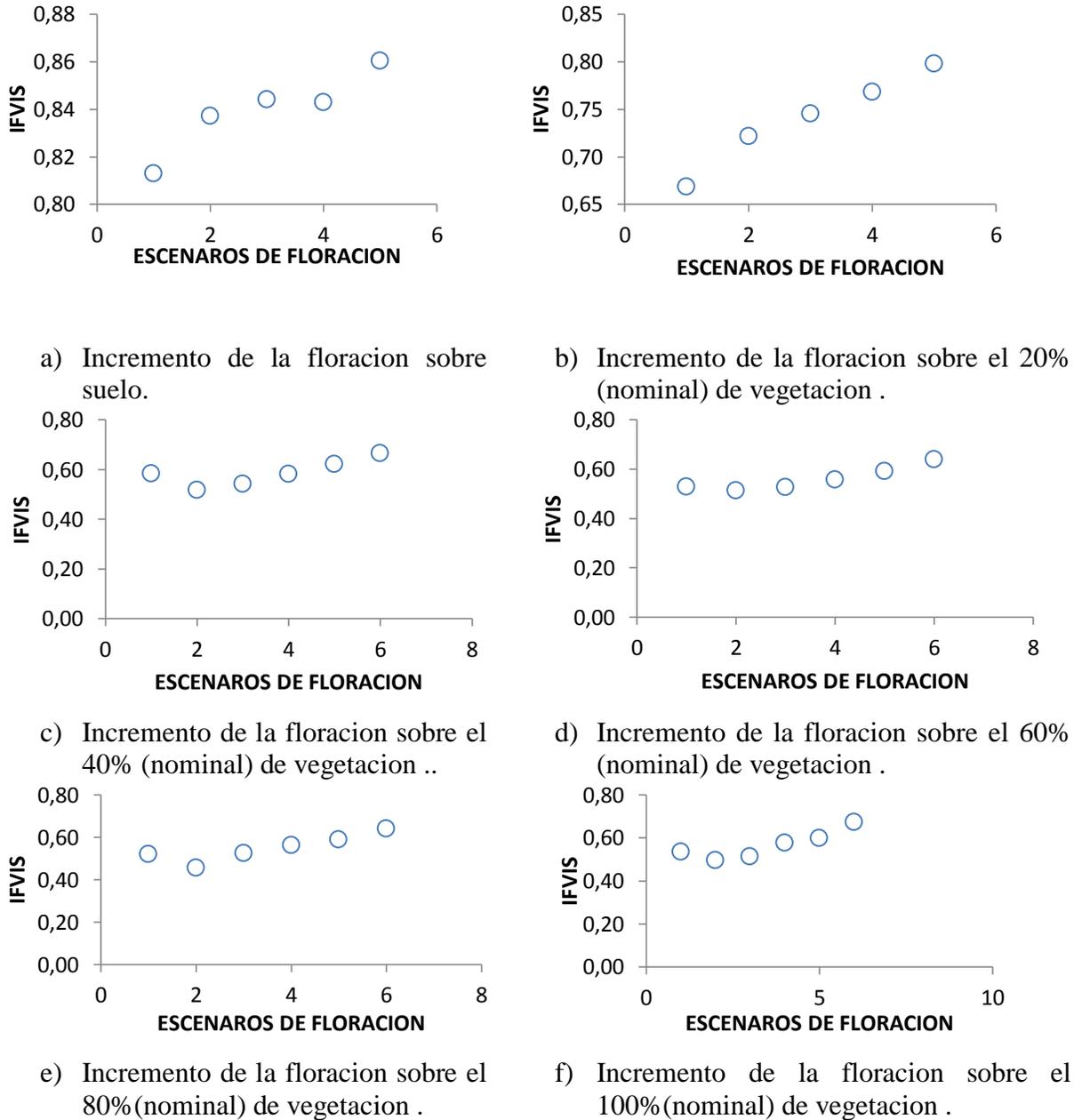


Figura 4.9 Patrón de comportamiento del IFVIS, al incremento de floración.

Bajo la consideración de que variando el fondo subyacente y dejando aproximadamente la misma cantidad de flor (columna 6, figura 4.8 a y b), se obtuvo una variación mínima atribuible a la variación de flores contenidas en cada AEM (Figura 4.10).

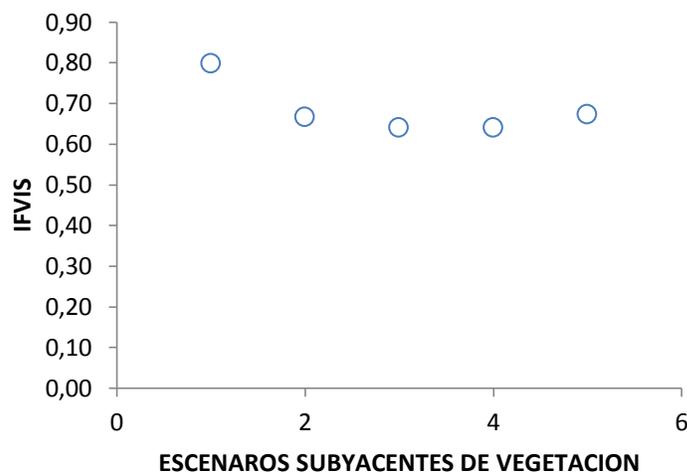


Figura 4.10 Comportamiento del IFVIS, variando el fondo subyacente de los escenarios.

4.7.1 Seguimiento espectral en árboles de huizache (*Acacia farnesiana*)

En campo, el huizache tuvo dos variantes al momento de adaptar la escala BBCH para su caracterización fenológica. Los arboles 1, 4, 5, 8, 9 y 10, se les encontró desde el principio en la etapa de floración y su comportamiento fenológico se adaptó al comportamiento de frutales con hueso (Henz *et al.*, 1996). La figura 4.11, cuenta con escaso follaje al inicio y continuó incrementándose a medida que finalizaba la floración.

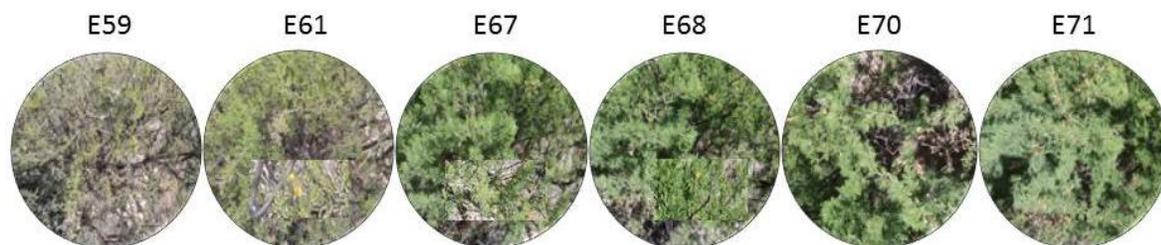


Figura 4.11 Fotograma de seguimiento fenológico para árbol 1 de Huzache (*Acacia farnesiana*)



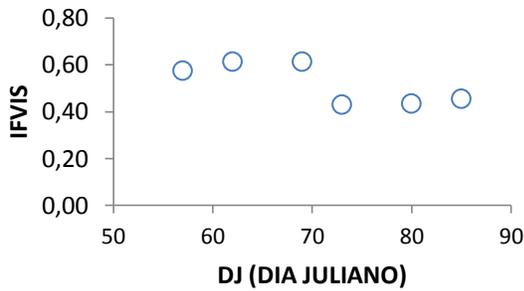
Figura 4.12 Fotograma de seguimiento fenológico para árboles 4, 5, 8, 9 y 10 de Huzache (*Acacia farnesiana*)

El árbol 1 se encontró con poca floración desde el inicio de la medición. Su descripción fenológica fue adaptada a la escala BBCH para frutales con hueso (Cuadro 1).

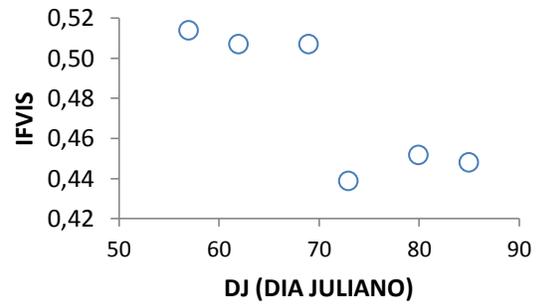
Cuadro 4.1 Adaptación de la escala BBCH para el árbol 1.

Día Juliano	Estadio	Descripción (Estadio principal 6. Floración)
57	59	Primeras flores, abiertas
62	61	Comienzo de la floración: alrededor del 10 % de las flores, abiertas
69	67	Flores marchitándose: la mayoría de los pétalos, caídos
73	68	Flores marchitándose: la mayoría de los pétalos, caídos
80	70	Fin de la floración: todos los pétalos, caídos
85	71	Fin de la floración: todos los pétalos, caídos+crecimiento de follaje

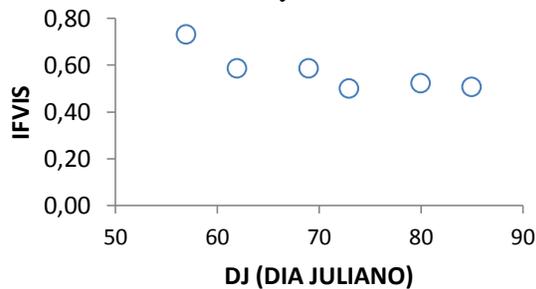
En cuanto al comportamiento espectral y términos del IFVIS, se observó que es sensible a la detección de floración en huizache diferenciando los estadios tardíos de floración de la etapa de crecimiento vegetativo (foliación).



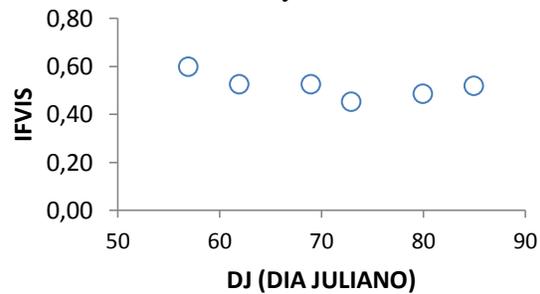
a) Huizache 1, etapas fenológicas 59,61,67,68,70 y 71.



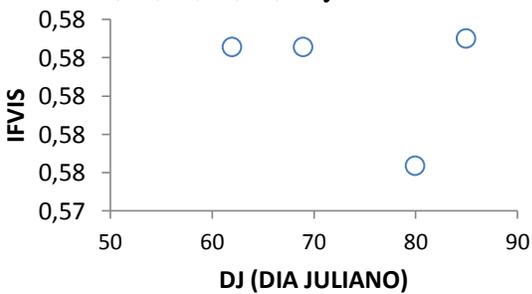
b) Huizache 4, etapas fenológicas 61,63,65,67,79 y 80.



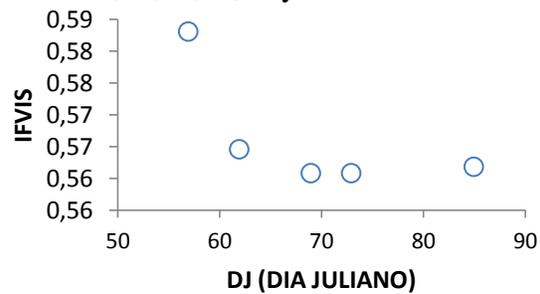
c) Huizache 5, etapas fenológicas 50,50,53,58,58,58 y 58.



d) Huizache 8, etapas fenológicas 67,68,69,70,71 y 71.



e) Huizache 9, etapas fenológicas 68,69,70,70,71 y 71.



f) Huizache 10, etapas fenológicas 68,69,70,71,71 y 71.

Figura 4.13 Patrón del IFVIS, en el seguimiento fenológico de la floración del huizache; caso arboles con flores.

Los arboles 2, 3, 6, 7 y 11, su comportamiento fenológico se adaptó a la descripción fenológica de la vid (Henz *et al.*, 1996), a diferencia de las anteriores, los árboles iniciaron con el crecimiento de yemas foliares y algunos alcanzaron a presentar órganos florales, la mayoría no lo hizo, solo presentó crecimiento de follaje. La figura 4.14, muestra el patrón fenológico encontrado en algunos árboles de huizache donde no fue posible localizar la etapa de floración.

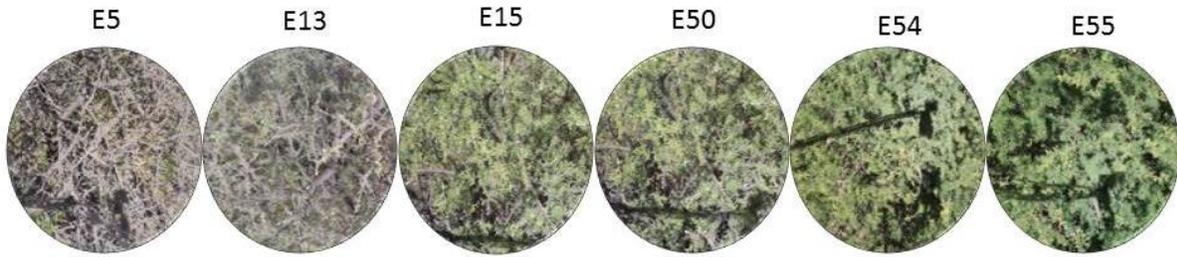


Figura 4.14 Patrón de comportamiento del IFVIS, al incremento de floración. Fotograma de seguimiento fenológico para árboles 2, 3, 6 y 7 de huizache (*Acacia farnesiana*)

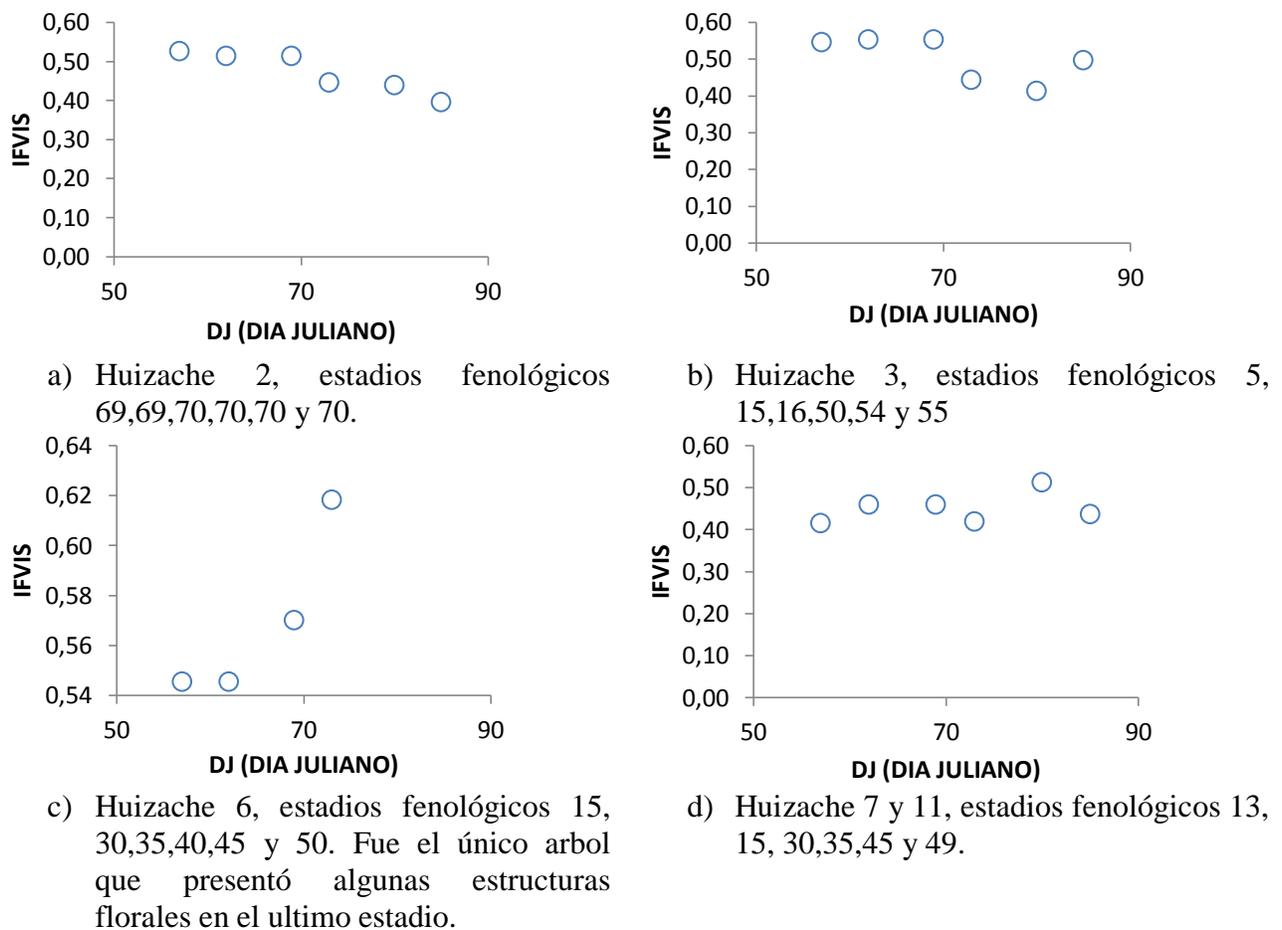


Figura 4.13 Patrón del IFVIS, en el seguimiento fenológico de la floración del huizache; caso arboles sin flores.



4.8 CONCLUSIONES

Con base en la revisión experimental realizada por Casiano y Paz (2014, en prensa) para simular los estadios pre floración, floración y post floración, mostraron que en el proceso fenológico las bandas del rojo y del infrarrojo cercano tienen tendencias similares (crecen o decrecen al mismo tiempo) lo cual permitió proponer el índice de floración IFVIS. El IFVIS se mostró como la razón entre el factor que describe la dinámica del sistema con respecto a la cantidad total de energía interactuando en dicho sistema, en otras palabras el objetivo del IFVIS fue captar la dinámica del sistema que implica que cuando dos variables exhiben un patrón temporal similar, el producto de ellas resulta en un patrón similar al de ambas, este es el caso del R e IRC cuando interactúan bajo el proceso de floración; en este sentido, se buscó además, que el índice captara el patrón opuesto, es decir el momento en que el producto entre el R e IRC tiende hacia el patrón de la variable que exhibe una menor amplitud (una variable se incrementa y la otra se reduce por proceso fotosintético). El experimento realizado en este trabajo mostró que el índice de floración (IFVIS) logra captar en esencia los estadios fenológicos de la floración, mostrados como un incremento del IFVIS. Por otra parte el IFVIS, muestra tendencias de la capacidad que tienen para representar un mismo estadio de floración independientemente de los fitoelementos subyacentes sobre los que se encuentre.

En cuanto al trabajo de campo, el IFVIS mostró coherencia en la detección de floración, sin embargo es necesaria su evaluación con más observaciones de campo.



4.9 LITERATURA CITADA

- Atkinson, P.M., C. Jeganathan, J. Dash, and C. Atzberger. 2012. Inter-comparison of four models for smoothing satellite sensor time-series data to estimate vegetation phenology. *Remote sensing of environment* 123,400-417.
- Bausch, W.C. 1993. Soil background effects on reflectance based crop coefficients for corn. *Remote Sensing of Environment* 46, 213-222.
- Bolaños, M. y F. Paz. 2010. Modelación general de los efectos de la geometría de iluminación-visión en la reflectancia de pastizales. *Rev. Mexicana de Ciencias Pecuarias* 1, 349-361.
- Borchert, R. 1996. Phenology and flowering periodicity of neotropical dry forest species, evidence from herbarium collections. *Journal of Tropical Ecology* 12, 65-80.
- Borchert, R. 1983. Phenology and control of flowering in tropical trees. *Biotropica* 15,81-89.
- Borchert, R., S.A. Meyer, R.S. Felger, and L. Porter-Bolland. 2004. Environmental control of flowering periodicity in Costa Rican and Mexican tropical dry forests. *Global Ecology and Biogeography* 13, 409-425
- Bullock, S.H., and J.A. Solis-Magallenus. 1990. Phenology of canopy trees of a tropical deciduous forest in Mexico. *Biotropica* 22, 22-35
- Casiano, M., F. Paz, A. Zarco, M. Bolaños, y E. Palacios. 2012. Escalamiento espacial de medios heterogéneos espectrales usando invarianzas temporales. *Terra Latinoamericana* 30, 315-326.
- Casiano, M. y F. Paz. 2014. Sobre la caracterización fenológica de bosques tropicales usando información espectral, experimentos con componentes. *Terra Latinoamericana*, en prensa.
- Chen, J., M. Shen, X. Zhu, and Y. Tang. 2009. Indicator of flower status derived from in situ hyperspectral measurement in an alpine meadow on the Tibetan Plateau. *Ecological Indicators* 9,818-823.
- Crimmins, M.A., and T.M. Crimmins. 2008. Monitoring plant phenology using digital repeat photography. *Environmental Management* 41, 949-958.
- Cuba, N., J. Rogan, Z. Christman, C.A. Williams, L.C. Schneider, D. Lawrence, and M. Millones. 2013. Modeling dry season deciduousness in Mexican Yucatan forest using



- MODIS EVI data (2000-2011). *GIScience and Remote Sensing*. de Jong, B., C. Anaya, O. Maser, M. Olguín, F. Paz, J. Etchevers, R. Martínez, G. Guerrero, and C. Balbontín. 2010. Greenhouse gas emissions between 1993 and 2002 from land-use change and forestry in Mexico. *Forest Ecol. Manag.* 260, 1689–1701.
- Fisher, J.I., J.F. Mustard, and M.V. Vadeboncoeur. 2006. Green leaf phenology at Landsat resolution, scaling from the field to the satellite. *Remote Sensing of Environment* 100,265-279.
- Ge, S., J. Everitt, R. Carruthens, P. Gong, and G. Anderson. 2006. Hyperspectral characteristics of canopy components and structure for phenological assessment of an invasive weed. *Environmental Monitoring and Assessment* 120,109-126.
- Hallé, R., A.A. Oldeman, and P.B. Tomlinson. 1978. *Tropical trees and forests an architectural analysis*. Springer Verlag, Berlin. 441 p.
- Heideman, P.D. 1989. Temporal and spatial variation in the phenology of flowering and fruiting in a tropical rainforest. *Journal and Ecology* 77,1059-1079.
- Hunt, E.R., and A.E.P. Williams. 2006. Detection of flowering leaf spurge with satellite multispectral imagery. *Rangel. Ecol. Manage.* 59, 494-499
- INEGI. 2012. *La Apicultura de la Península de Yucatán, Censo Agropecuario 2007*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, Ags. 64 p.
- IPCC. 2007. *Climate Change. 2007, Impacts, adaptation, and vulnerability. Working Group I. Fourth Assessment Report of the Intergovernment Panel on Climate Change*. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Paluyimof, P.J. van der Linden, and C.E. Hanson (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge 976 p.
- Jiang, Z., A.R. Huete, K. Didan, and T. Miura. 2008. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment* 112, 3833-3845
- Kikim, A., and P.S. Yadava. 2001. Phenology of tree species in subtropical forests of Manipur in north eastern India. *Tropical Ecology* 42, 269-296.



- Kramer, K., I. Leinonen, and D. Loostau. 2000. The importance of phenology for the evaluation of impact of climate change on growth of boreal, temperate and Mediterranean forest ecosystems, an overview. *Int. J. Biometeorol.* 44,67-75.
- Lang, A. 1965. Physiology of flower initiation. In, W. Ruhland (Ed.) *Differentiation and development. Encycl. Plant Physiology.* XV/1. Springer, Berlin pp. 1380-1536.
- Li, R.P., and G.S. Zhou. 2012. A temperature-precipitation based leafing model and its application in northeast China. *Plos ONE* 7(4),e33192. doi 10.1371/journal.pone.0033192.
- Liu, H.Q., and A. Huete. 1995. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing.* 33, 457-465.
- Lobo, J.A., M. Quesada, K.E. Stoner, E.J. Fuchs, Y. Herrerias-Diego, J. Rojas, and G. Saborio. 2003. Factors affecting phenological patterns in *bombacaceous* trees in seasonal forests in Costa Rica and Mexico. *American Journal of Botany* 90, 1054-1063.
- Meier, V. 1997. BBCH-monograph. Growth stages of plants - Entwicklungsstadien von Pflanzen - Estadios de las plantas - Développement des plantes. Blackwell Wissenschaftsverlag. Berlin, Wien 622 p.
- Melaas, E. K., Friedl, M. A., & Zhu, Z. (2013). Detecting interannual variation in deciduous broadleaf forest phenology using Landsat TM/ETM+ data. *Remote Sensing of Environment*, 132,
- Nilson, T., M. Rautiainen, J. Pisek, and Peterson. 2012. Seasonal reflectance courses of forests. *New Advances and Contributions to Forestry Research.* A.A. Oteng-Amoako (Ed.). ISBN 978-953-51-0529-9. In Tech. Chapter 3, pp. 33-58
- Ochoa-Gaona, S., y V. Cruz-Arias. 2002. La distribución y fenología de la flora arbórea del estado de Tabasco con base a la información de herbario. *Universidad y Ciencia* 18, 114-127.
- Opler, P.A., G.W. Frankie, and H.G. Baker. 1976. Rainfall as a factor in the release, timing and synchronization of anthesis by tropical trees and shrubs. *Journal of Biogeography* 3, 231-236.



- Parihar, J.S., S. Goroshi, R.P. Singh, N.S.R. Krishnayya, M.B. Sirsayya, A. Kumar, L.S. Rawat, and A. Sonakia. 2013. Observation of forest phenology using field-based digital photography and satellite data. *Current Science* 105, 1740-1747.
- Paz, F., E. Palacios, E. Mejía, M. Martínez, y L.A. Palacios. 2005. Análisis de los espacios espectrales de la reflectividad del follaje de los cultivos. *Agrociencia* 39,293-301.
- Paz, F., M. Reyes, y E. Medrano. 2011. Diseño de índices espectrales de la vegetación usando curvas iso-suelo. *Agrociencia* 45, 121-134.
- Peñuelas, J., and I. Fillela. 2001. Phenology-responses to a warning world. *Science* 294,793-794.
- Post, E.S., C. Pedersen, C.C. Wilmeas, and M.C. Forchhammer. 2008. Phenological sequences reveal aggregate life history response to climate warning. *Ecology* 89, 363-370.
- Prinack, R.B. 1985. Longevity of individual flowers. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 16, 15-37.
- Rathcke, B., and E.P. Lacey. 1985. Phenological patterns of terrestrial plants. *Ann. Re. Ecol. Syst.* 16, 179-214.
- Reyes, M., F. Paz, M. Casiano, F. Pascual, M.I. Marin, y E. Rubiños. 2011. Caracterización del efecto de estrés usando índices espectrales de la vegetación para la estimación de variables relacionadas con la biomasa aérea. *Agrociencia* 45, 221-233.
- Richardson, A.D., B.H. Braswell, O.Y. Hollinger, J.P. Jenkins, and S.V. Ollinger. 2009. Near surface remote sensing of spatial and temporal variation in canopy phenology. *Ecological Applications* 19,1417-1428.
- Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell, D.W. Deering, and J.C. Harlan. 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation, NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD. pp, 1-371.
- Running, S.W., and R.R. Nemani. 1991. Regional hydrologic and carbon balance response of forest resulting from potential climate change. *Clim. Change* 19,349-368.
- Schwartz, M.D., R.Ahas, and A. Aasa. 2006. Onset of spring starting earlier across the Northern Hemisphere. *Global Change Biology* 12, 343-351.



- Shabanov, N.Y., L. Zhou, Y. Knyazikhin, R.B. Myneni, and C.J. Tucker. 2002. Analysis of interannual changes in northern vegetation activity observed in AVHRR data from 1981 to 1994. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40,115-130.
- Shen, M., J. Chen, X. Zhur, and Y. Tang. 2009. Yellow flowers can decrease NDVI and EVI values, evidence from a field experiment in an alpine meadow. *Canadian Journal of Remote Sensing* 35, 99-106
- Shen, M., J. Chen, X. Zhu, Y. Tang, and X. Chen. 2010. Do flowers affect biomass estimate from NDVI and EVI? *International Journal of Remote Sensing* 31, 2139-2149.
- Stöckli, and P.L. Vidale. 2004. European plant phenology and climate as seen in a 20-year AVHRR land-surface parameter dataset. *Int. J. Remote Sensing* 25, 3303-3330.
- Valdez-Hernandez, M., J.L. Andrade, P.C. Jackson, and M. Rebolledo-Vieyra. 2010. Phenology of five tree species of a tropical dry forest in Yucatan, Mexico, effects of environmental and physiological factors. *Plant Soil* 329, 155-171.
- White, M.A., S.W. Running, and P.E. Thornton. 1999. The impact of growing – season length variability on carbon assimilation and evapotranspiration over 88 years in the eastern US deciduous forest. *Int. J. Biometeorol.* 42,139-145.
- Wilson, K.B., and D.D. Baldocchi. 2000. Seasonal and interannual variability of energy fluxes over a broadleaved temperate deciduous forest in North America. *Agric. Meteorol.* 100,1-18.
- Zhang, P. and B. Anderson. 2004. Climate-related vegetation characteristics derived from moderate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) leaf area index and normalized difference vegetation index. *Journal of Geophysical Research.*
- Zhang, X., M.A. Friedl, B. Tan, M.D. Goldberg, and Y. Yu. 2012. Long-term detection of global vegetation phenology from satellite instruments. In: X. Zhang (Ed.) *Phenology and Climate Change*. ISBN 978-953-51-0336-3. Chapter 16, pp. 297-320.
- Zhang, X., M.A. Friedl, and C.B. Schaaf. 2006. Global vegetation phenology from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): evaluation of global patterns and comparison with in situ measurements. *Journal of Geophysical Research.* doi:10.1029/2006J6000217.



CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

5.1 CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación se realizó una revisión conceptual de la fenología y la importancia de su estudio. Partiendo de la discusión sobre la problemática del cambio climático global y su relación con la fenología se puso relieve la necesidad de realizar aportes científicos en ésta materia en el contexto nacional e internacional y su relación con la diversidad biológica del país y los ciclos biogeoquímicos, particularmente el del carbono. La presente investigación se enfocó en la búsqueda de patrones de floración de los diferentes ecosistemas que brindaron el sustento al desarrollo experimental, donde fueron planteados escenarios simulados para obtener patrones espectrales de la floración de modo artificial pero congruentes con los actuales desarrollos y apoyado con datos obtenidos mediante sensores remotos multiespectrales. Los resultados de un primer experimento mostraron evidencia del efecto del proceso fenológicos de la floración sobre el comportamiento de las bandas del Rojo (660nm) e Infrarrojo Cercano (830nm), bandas mayormente disponibles y accesibles en sensores remotos, concluyendo que dichas bandas podrían ser utilizadas en un índice de floración. Con base en la revisión del primer experimento desarrollado en la investigación, se propuso el Índice de floración IFVIS, el cual mostró coherencia con los escenarios simulados de un segundo experimento. Con base a las evidencias experimentales y de campo, el IFVIS muestra evidencia de captar efectivamente el proceso de floración.



5.2 RECOMENDACIONES

Dada la propuesta de un Índice de Floración que permite captar el proceso que lo caracteriza, es de suma importancia revisar su comportamiento a nivel campo y satelital. La necesidad subyacente de usar un Índice de Floración atiende a que en México sólo las especies de mayor valor comercial han sido estudiadas detalladamente para su manejo, por ello resulta de particular importancia profundizar en el conocimiento de la fenología de la flora en muchos más aspectos, no solo de observaciones actuales sino en cubrir registros históricos que México no tiene sobre la fenología de la vegetación natural ni de cultivos. Dada la importancia ecológica y económica (apícola) de la floración, se requiere de su caracterización en términos de presencia y duración, así como de su intensidad. Adicionalmente, se requieren metodologías para caracterizar la fenología de ecosistemas de selvas tropicales en México, los cuales almacenan las mayores cantidades de carbono en la biomasa viva de los ecosistemas del país, por lo que resulta indispensable conocer los patrones de evolución fenológicos ante el cambio climático y las intervenciones humanas, donde puede ser útil la investigación realizada como producto aplicado.

Con base en lo anterior, es altamente recomendable el uso del Índice de Floración propuesto en productos satelitales en el país para validar los resultados obtenidos, en conjunto con campañas de campo que permitan calibrar las observaciones satelitales.