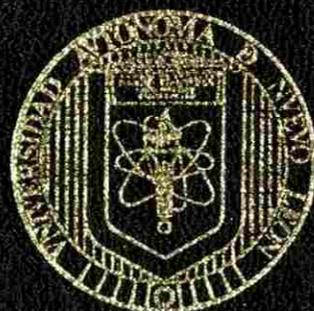


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE AGRONOMIA
SUBDIRECCION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



UTILIZACION DE LA RADIOMETRIA PARA
INFERIR EL ESTADO DE LAS PLANTAS.

POR:

J. JESUS OCEJO GONZALEZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER
EL GRADO DE MAESTRIA EN CIENCIAS EN
PRODUCCION AGRICOLA

JUNIO, 2004

TM

Z5071

FA

2004

.02



1020091710



UANL

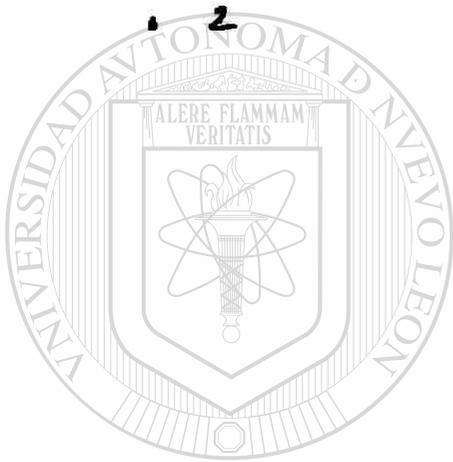
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

0363

TH
Z 5011
FA
20



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



FONDO
TESIS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE AGRONOMIA

UBDIRECCION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



**UTILIZACION DE LA RADIOMETRIA PARA
INFERIR EL ESTADO DE LAS PLANTAS**

POR

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

J. JESUS OCEJO GONZALEZ

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

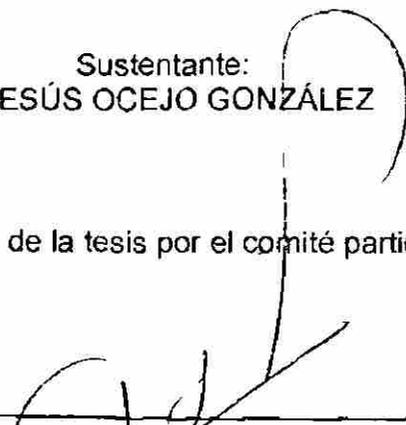
**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER
EL GRADO DE MAESTRIA EN CIENCIAS EN
PRODUCCION AGRICOLA**

JUNIO. 2004

USO DE LA RADIOMETRÍA PARA INFERIR EL ESTADO DE LAS PLANTAS

Sustentante:
J. JESÚS OCEJO GONZÁLEZ

Aprobación de la tesis por el comité particular:



Ph. D. GERARDO DE LIRA REYES

Director de Tesis



D. Cs. HUMBERTO RODRÍGUEZ FUENTES

Co-asesor



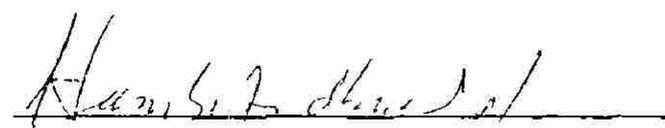
Ph. D. EMILIO OLIVARES SÁENZ

Co-asesor



Ph. D. GUSTAVO MARTÍNEZ TURANZAS

Co-asesor



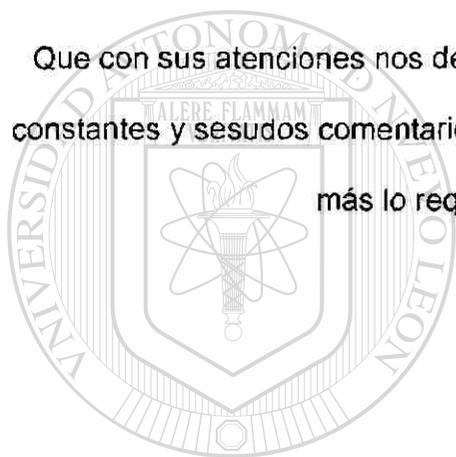
Ph. D. HUMBERTO IBARRA GIL

Sub-director de postgrado

A la memoria de mi padre:

SIXTO OCEJO GONZÁLEZ (q e p d)

Que con sus atenciones nos dejó la gloria de una niñez feliz y después con sus constantes y sesudos comentarios nos motivó siempre, sobre todo en la edad que más lo requeríamos: nuestra juventud



Y UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

A mí querida madre:
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



JUANA GONZÁLEZ MUÑOZ

Que con su condición de mujer mexicana nunca ha negado sus obligaciones y que, de la mano con nuestro padre, siempre fue y sigue siendo un ejemplo de tesón, apoyo, comprensión y cariño para todos sus hijos.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar a mi hermosa familia encabezada por mi señora esposa **CARMEN YOLANDA JIMÉNEZ GARCÍA** quien a pesar de mis desatenciones para con sus compromisos y convivencias familiares, siempre estuvo a mi lado dándome su apoyo, aliento y fortaleza para la culminación de mis tareas profesionales y académicas.

A mis hijos **JESÚS ALBERTO** y **ABRAHAM** por quienes vivo y para que mi pequeño ejemplo los motive a seguir por el camino del bien, la responsabilidad y su propia superación.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

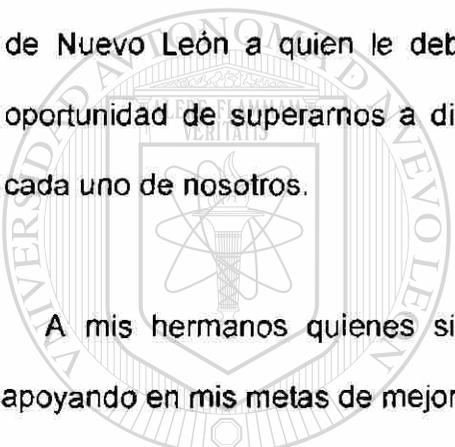
A mis maestros de postgrado quienes directamente fueron los responsables a que, con su ejemplo y sus conocimientos agronómicos transmitidos durante sus clases, permitieran mejorar mi concepto de la actividad agrícola y en especial al PH. D. Gerardo de Lira Reyes quien creyó en mí al proponerme la presente investigación y sobre todo por su brillante y paciente dirección.

A todos mis compañeros de postgrado que me brindaron su amistad y me ayudaron a resolver las dudas cotidianas de todo alumno

A mis compañeros de trabajo que con su aliento en los momentos más difíciles me permitieron continuar y finiquitar un compromiso de antaño adquirido y de manera sobresaliente mi reconocimiento por su apoyo al GK.

A mi querida escuela, la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León a quien le debo lo que soy, quien insensiblemente nos da la oportunidad de superarnos a diario con su presencia majestuosa en espera de cada uno de nosotros.

A mis hermanos quienes siempre han confiado y me siguen alentando y apoyando en mis metas de mejora personal.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN®
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo	Página
TABLA DE CONTENIDO	vi
Lista de figuras	viii
Lista de tablas	ix
RESUMEN	x
SUMMARY	xi
<hr/>	
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos	3
1.2. Hipótesis	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1. El Radiómetro de Mano Tipo Exotech	4
2.2. El Sensor "Thematic Mapper del Satélite Landsat"	6
2.3. Radiación Electromagnética	8
2.4. Irradianza, Radianza, Reflectanza y Superficies Lamercianas	10
2.5. Índices de Vegetación	14
2.6. Índice de Vegetación por Proporciones	16
2.7. Índice de Vegetación Normalizado	16
2.8. Índice de Vegetación Ortogonales	18
2.9. Índice de Vegetación con Corrección Atmosférica	20
3 MATERIALES Y MÉTODOS	22
3.1.- Ubicación del Sitio	22
3.2 - Establecimiento del Experimento	22
3.3 Tratamientos	23

3.4. Croquis del Experimento.	24
3.5. Medición de Variables.	25
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	30
4.1. Variación Espectral del Suelo.	30
4.2. Línea del Suelo.	32
4.3. Variabilidad Espacial.	34
4.4. Bandas Individuales.	36
4.1.1. Análisis Temporal.	36
4.1.2. Análisis Espectral.	40
4.1.3. Análisis de los Índices de Vegetación.	44
4.1.4. Análisis de Varianza.	47
4.1.5. Análisis de Regresión.	49
5. CONCLUSIONES.	51
6. LITERATURA REVISADA.	54
7. APÉNDICES.	59
7.1. Apéndice 1. Resultado del Análisis de la Muestra del Suelo del experimento.	60
7.2. Apéndice 2. Ejemplo de una Serie de Lecturas del Radiómetro.	62
7.3. Apéndice 3. Cronología de Actividades.	64
7.4. Apéndice 4. Cálculos Para Determinar Brillantez, Verdor y los Índices de Vegetación: PVI, RVI, NDVI y SAVI de la Alfalfa.	69
7.5. Apéndice 5. Cálculos Para Determinar Brillantez, Verdor y los Índices de Vegetación: PVI, RVI, NDVI y SAVI de la Avena.	74
7.6. Apéndice 6. Cálculos Para Determinar Brillantez, Verdor y los Índices de Vegetación: PVI, RVI, NDVI y SAVI del Cártamo.	79

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Propagación de la luz.	8
Figura 2. Espectro electromagnético.	9
Figura 3. Croquis del experimento.	24
Figura 4. Comparación de las curvas espectrales de los tres suelos utilizados en el experimento y la del cultivo de alfalfa.	31
Figura 5. La línea del suelo y la alfalfa en 2 fechas.	34
Figura 6. Variabilidad de los valores de reflectancia en la banda roja e IR para las parcelas experimentales.	36
Figura 7. Comportamiento temporal de las bandas en el cultivo de cártamo	37
Figura 8. Comportamiento temporal de las bandas en el cultivo de alfalfa.	38
Figura 9. Comportamiento temporal de las bandas en el cultivo de la avena.	40
Figura 10. Comportamiento espectral del cultivo de cártamo en tres estados de crecimiento.	42
Figura 11. Comportamiento espectral del cultivo de alfalfa en tres estados de crecimiento.	42
Figura 12. Comportamiento espectral del cultivo de avena en tres estados de crecimiento	44
Figura 13. Distribución temporal de los cultivos con el Índice de Vegetación NDVI.	46

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Características espectrales de los filtros en el radiómetro Exotech.	5
Tabla 2. Características de las bandas del "Sensor Thematic Mapper" (NASA, 1984).	7
Tabla 3. Tratamientos y especificaciones.	23
Tabla 4. Toma de Lecturas.	29
Tabla 5. Resultados de las variables y de los índices de vegetación del cultivo de la alfalfa.	44
Tabla 6. Resultados de las variables y de los índices de vegetación del cultivo de avena.	45
Tabla 7. Resultados de las variables y de los índices de vegetación del cultivo del cártamo.	45
Tabla 8. Análisis de varianza.	47
Tabla 9. Coeficientes de determinación de NDVI de tres cultivos y las variables biofísicas: peso fresco, materia seca y cobertura.	49
Tabla 10. Coeficientes de determinación de SAVI de tres cultivos y las variables biofísicas: pesos fresco, materia seca y cobertura.	50

UTILIZACIÓN DE RADIOMETRÍA PARA INFERIR EL ESTADO DE LAS PLANTAS

RESUMEN

En el presente estudio se analizan las características reflectivas de tres cultivos con la finalidad de estudiar su respectiva curva espectral. Teóricamente, la curva espectral también conocida como "firma espectral" es la respuesta reflectiva intrínseca de cada cuerpo (tipos de vegetación, suelo, agua, etc.). El análisis se realizó de manera temporal siguiendo la fenología del cultivo teniendo las condiciones de los mismos, con y sin aplicación de agroquímicos.

También se estudió la influencia del suelo sobre la respuesta espectral de los cultivos. Para ello se simularon tres condiciones de suelo: suelo normal del área de estudio, suelo oscuro con aplicación de materia orgánica (gallinaza) y suelo blanco con aplicación de vermiculita. En los cultivos de alfalfa, avena y cártamo se analizó la reflectancia en espectro azul (0.455 – 0.515 μm), verde (0.530 – 0.597 μm), rojo (0.628 – 0.689 μm) e infrarrojo (0.777 – 0.886 μm). Con esta información se realizó el análisis de las bandas individuales y de índices de vegetación (NDVI, RVI, PVI, y SAVI) los que se correlacionaron con los parámetros biofísicos de las plantas: producción de biomasa, cobertura vegetal, así como el contenido de humedad del suelo.

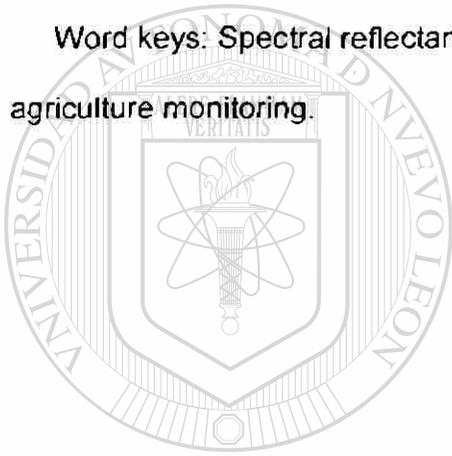
El estudio tuvo como hipótesis que es posible inferir sobre el estado o condición de las plantas mediante el análisis de sus características reflectivas, lo que permitiría en cierto momento crear sistemas expertos para la interpretación de datos, cuando se utilicen imágenes de satélite o información obtenida de aviones en la solución de problemas en la agricultura: anticipación a los problemas de enfermedades, control de plagas, solución a los problemas nutricionales de los cultivos, calendarización de riegos, tiempo de cosecha, etc.

SUMMARY

In this study, the reflectance response of three crops was analyzed to investigate their spectral curve. In theory, the spectral curve, also called "spectral signature" is an intrinsic characteristic of a target (vegetation types, soil, water, etc). This was a temporal analysis performed along the phenology of the crop which was cultivated with and without pesticides. Soil influence on the spectral curve was also analyzed. Thus, three soil backgrounds were simulated: natural soil of the study site, dark soil with addition of organic matter (meyfer), and white soil created with a vermiculite cover. The reflectance response of alfalfa, oat and carthamus was measured on blue (0.455-0.515 μm), green (0.530-0.597 μm), red (0.628-0.689 μm) and near infrared (0.777-0.886 μm) wavebands. With this information, individual bands and vegetation indices (NDVI, RVI, PVI, and SAVI) were correlated to biophysical parameters of the crops: biomass production and vegetation cover, and soil moisture content

This study hypothesizes that it is possible to infer on plant condition base on the reflectance characteristics of the crop. In a moment, expert systems will provide easier analysis and interpretation of satellite and aircraft data to provide in advance agriculture solutions on crop disease, pests, irrigation and harvest.

Word keys: Spectral reflectance, radiation, remote sensing, vegetation indices, agriculture monitoring.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

1. INTRODUCCIÓN

En el presente proyecto se utilizó la disciplina de sensores remotos en aplicaciones agrícolas. Las técnicas de sensores remotos, disciplina también conocida como percepción remota o teledetección, es la adquisición de la información sobre las características o el estado de un cuerpo sin tocarlo. De una manera más familiar, es la utilización de imágenes digitales obtenidas de sensores sobre satélites o aviones, o de fotografías aéreas utilizadas en el estudio de los recursos naturales, clima, actividades económicas o monitoreo ambiental.

Los principios de sensoría remota están basados en el comportamiento de la radiación solar sobre los diversos cuerpos o materiales de la superficie de la tierra como son suelo, vegetación, cuerpos de agua etc. Teóricamente cada cuerpo presenta una respuesta o firma espectral única según sean sus características de absorción, reflexión o emisión de energía.

La luz solar reflejada por el suelo o por las plantas puede inferir el material vegetal presente en un campo, el vigor de las plantas, si las plagas o las enfermedades han causado algún daño, o si existe algún grado de estrés hídrico. Con esta información se pueden llegar a determinar aspectos

importantes de la producción de cultivos o realizar estudios sobre la productividad de los agroecosistemas.

La energía reflejada o emitida por los cuerpos en la superficie de la tierra es percibida por los sensores a bordo de satélites o aviones dando como producto curvas o firmas espectrales a partir de imágenes digitales, las cuales se utilizan para realizar ese tipo de estudios. Para esto, es importante desarrollar investigación que ayude a relacionar la energía medida con los parámetros biofísicos de las plantas para llegar a inferir, de mejor manera, la información en las imágenes. De lograr estos resultados, es posible extrapolar la información a áreas más extensas como pueden ser las destinadas a monocultivos de carácter extensivo.

Hipotéticamente, con el desarrollo de esta información es posible generar datos que posteriormente se utilizarían en el modelamiento del desarrollo de cultivos, los que al ser monitoreados periódicamente, podrían manejarse de una manera más dirigida en las áreas con problemas de estrés por plagas, enfermedades, salinidad u otro tipo de problema. Este tipo de información es la requerida en la modalidad de producción actual conocida como "agricultura de precisión", donde se combina la información de: geoposicionamiento (GPS), sistemas de información geográfica, y un manejo dirigido e intensivo hasta de cada metro cuadrado de un área de producción agrícola.

1.1.- El presente estudio tiene como objetivos e hipótesis los siguientes:

Objetivos

- a) Relacionar la reflectancia de un cultivo con su estado físico y desarrollo fenológico.
- b) Estudiar la reflectancia de la interacción suelo-planta para separar efectos de contribución bajo diferentes condiciones de suelo.
- c) Utilizar la radiometría para inferir sobre el estado de producción y de sanidad de las plantas.
- d) Comparar la reflectancia en bandas individuales con los índices de vegetación en la normalización de efectos.

1.2. Hipótesis

- a) Un cultivo a través de la reflectancia es capaz de definir un estado de su desarrollo fenológico.
- b) La reflectancia puede ser influenciada por la interacción cultivo-suelo.
- c) A través de la radiometría se puede inferir la sanidad actual de un cultivo y en general su promesa de producción.
- d) Los cultivos, con el uso de la radiometría, reflejan en cada una de sus bandas un espectro particular y característico

2.- REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. El Radiómetro de Mano Tipo Exotech

El radiómetro modelo 100 BX es un instrumento compacto de cuatro canales diseñado para trabajar bajo diversas condiciones de campo. La unidad se opera con baterías o con un conector de fuente externa de 12 a 18 volts. Tiene la capacidad de funcionar en los cuatro canales a 1 grado de ángulo de vista para operar montado en un avión, 15 grados de ángulo de vista para operar a nivel del suelo, y 180 grados de ángulo de vista para medición de la radiación incidente.

Específicamente cuenta con cuatro canales o bandas espectrales intercambiables entre los filtros del sensor americano Landsat Thematic Mapper (TM) y del sensor francés SPOT. Los rangos espectrales para cada filtro de los dos sensores se presentan en la Tabla 1:

Tabla 1. Características espectrales de los filtros en el radiómetro Exotech.

Filtro	Rango Espectral (μm)
TM1	0.45 - 0.52
TM2	0.52 - 0.60
TM3	0.63 - 0.69
TM4	0.76 - 0.90

Una de las características importantes de este radiómetro es que cada canal puede calibrarse por separado, lo que le permite aumentar su precisión en casos de que exista una diferencia significativa de radianza entre las bandas.

Cada uno de los canales tiene filtros ópticos intercambiables de 0.2 pulgadas de diámetro, los cuales determinan la razón de longitud de onda detectada o rango sensible. En este radiómetro, el rango sensible es de 0.4 a 1.1 μm del detector de silicón fotodiódico (Chuvienco, 1996).

Inicialmente los resultados de medición se obtienen en unidades volts. Para determinar la sensibilidad en unidades de radianza, simplemente se multiplica el factor de calibración de cada filtro por el voltaje recibido.

2.2. El Sensor "Thematic Mapper del Satélite Landsat"

Este sensor fue introducido en el Landsat 4 en 1982 con el objetivo de ofrecer mayor resolución espacial, radiométrica, y espectral que los anteriores sensores MSS de los Landsat anteriores. El sensor TM en su segunda versión fue nuevamente lanzado en 1984 a bordo del Landsat 5. Debido a la pérdida del Landsat 6 en 1993 y que llevaba a bordo un TM Mejorado (ETM), el Landsat 5 continuó siendo utilizado, bajo continuas recalibraciones por haber excedido la vida útil del sensor para asegurar la confianza de la información (Campbell, 1987). Los satélites Landsat 4 y 5 fueron colocados a una altitud de 705 km en una órbita de sincronía solar con un tiempo de cruce ecuatorial cercano a las 9:45 a.m. y un ciclo de cobertura de 16 días. La anchura de imagen del sensor es de 185 km con una resolución espacial

nominal de 30 m, excepto para la banda 6, la cual es de 120 m.

El sensor TM espectralmente tiene siete bandas. Las bandas 1-4 tienen 16 detectores de silicón mientras que las bandas 5 y 7 utilizan 16 detectores de indio-antimonio. La banda térmica infrarroja utiliza un arreglo de 4 detectores de mercurio-cadmio-telurio.

Este sensor funciona con un sistema de barrido con una longitud focal de 2.28 m y un sistema óptico de f/5.6. La resolución espectral de las imágenes es en 8 bits. Una descripción más específica de las características de las bandas se presenta en la Tabla 2. Esta tabla describe que las primeras tres bandas

están ubicadas en el espectro visible. Las bandas 4 a la 7 son sensibles a la energía infrarroja, espectro invisible para el ojo humano. Para mostrar estas tres bandas, diferentes colores son asignados a su valor digital en una imagen compuesta denominada imagen en falso color. Dentro del rango infrarrojo, las bandas 5 y 7 son sensibles a la energía solar que es reflejada desde la superficie de la tierra, mientras que la banda 6 responde a la energía infrarroja térmica emitida (Montoya, 1986); (NASA, 1984).

Tabla 2. Características de las bandas del sensor "Thematic Mapper" (NASA, 1984)

Banda	Apertura de Banda (μm)	Características
1 (azul)	0.45- 0.52	Alta influencia de la dispersión atmosférica, absorción de la clorofila azul, usada para la discriminación en coníferas y separación de la influencia del suelo y la señal de vegetación.
2 (verde)	0.52- 0.60	Alta reflectancia en la vegetación sana.
3 (roja)	0.63- 0.69	Absorción por la clorofila roja, usada para determinar el vigor de la planta.
4 (NIR)	0.76- 0.90	Usada con las bandas visibles para crear índices de vegetación relacionados con la biomasa vegetal y delimitación de cuerpos de agua.
5 (MIR)	1.55- 1.75	Sensitiva al contenido de humedad, útil en la diferenciación de rocas, nubes, hielo, nieve y contenido de humedad en vegetación.
6 (TIR)	10.4 – 12.5	Útil para la detección de estrés en cultivos, cambios de emisividad y mapeo hidrotérmico.
7 (MIR)	2.08- 2.35	Útil para el mapeo geológico, detectar rocas alteradas hidrotérmicamente, estrés por calor en plantas y contenido de humedad.

2.3. Radiación Electromagnética

La radiación electromagnética es una forma de energía derivada de las oscilaciones de los campos eléctricos y magnéticos (Figura 1). Es capaz de transmitirse a través del espacio con una velocidad $c = 3 \times 10^8 \text{ m}^{-1}$ (Montoya, 1986);(Agricultural Research, 1998).

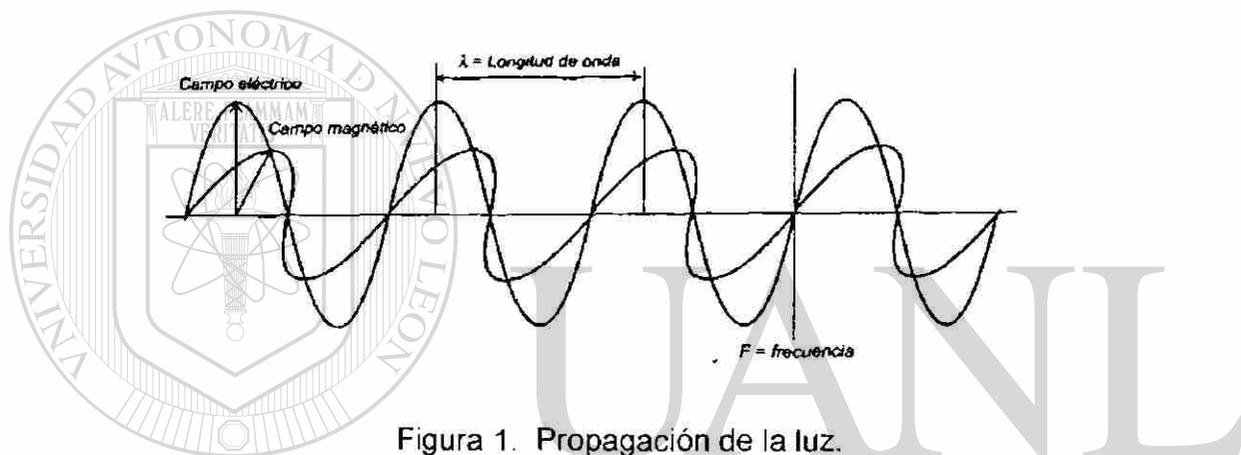


Figura 1. Propagación de la luz.

La frecuencia (ν) de la radiación electromagnética está relacionada con la longitud de onda (λ) como se muestra en la siguiente ecuación:

$$c = \lambda \nu \quad (1)$$

La ecuación muestra que la frecuencia es inversamente proporcional a la longitud de onda.

El espectro electromagnético se presenta en la Figura 2 en términos de longitud de onda y frecuencia, en ésta figura se observa que el rango va desde

los rayos gama de alta energía y con una longitud de 3×10^{-2} Angstroms (Å) hasta las ondas del sonido a 300 k, es decir, un factor de 10^{17} , pasando por el espectro visible, que como se aprecia es solo una pequeña parte del espectro total (Molina, 1984); (Agricultural Research, 1999).

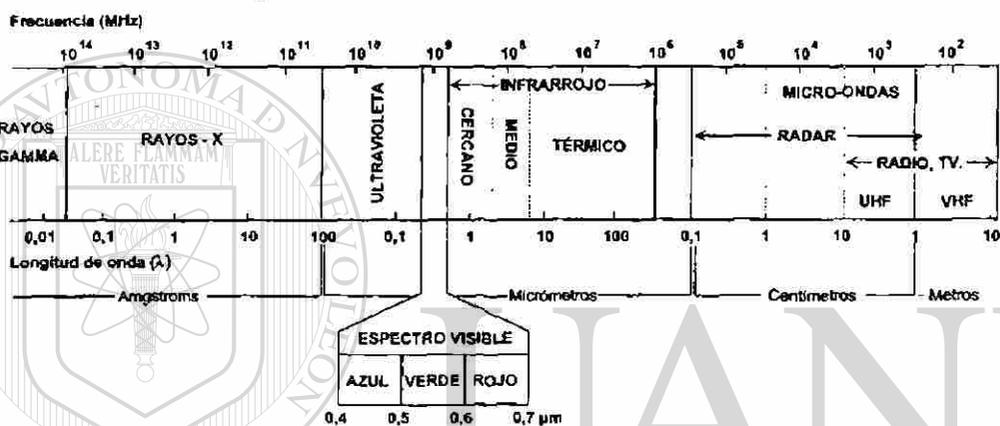


Figura 2. Espectro electromagnético.

Aunque algunos sensores remotos utilizan rayos gama y ultravioleta, la mayoría usa el rango visible, infrarrojo (IR) y de microondas. Los filtros del radiómetro de mano, como se ha mencionado, permiten el paso de energía en el espectro visible e IR. Sin embargo, en la actualidad se ha logrado importante progreso en los sistemas de radar y en los sensores de microondas para el monitoreo de los campos agrícolas.

La porción del infrarrojo que se utiliza para mediciones de temperatura está entre los 8 y 14 μm. Los termómetros IR portátiles están disponibles además

en un rango mas corto de 10.5 a 12.5 μm . Este espectro es el que se utiliza en los sensores de satélite y avión debido a que son menos afectados por la absorción atmosférica.

La región térmica del IR es frecuentemente confundida con la fotografía IR. La fotografía IR es la región de transición entre el rango visible y el infrarrojo cercano. Un rollo fotográfico IR es sensitivo a la radiación hasta 0.9 μm , mucho antes de la longitud de onda del IR térmico (Collins, 1978).

2.4. Irradianza, Radianza, Reflectanza y Superficies Lambercianas

Dos términos que continuamente se confunden en sensores remotos son radianza y reflectancia. Con el siguiente ejemplo, se tratara de explicar sus diferencias. En un día soleado, un campo de trigo, por ejemplo, recibe radiación solar de tipo directa y difusa. La radiación que llega es la irradianza, comúnmente representada con el símbolo E, y unidades en watts por metro cuadrado (Wm^{-2}). Cuando la radiación golpea al objeto, en este caso la planta de trigo, parte de la energía es reflejada, parte es absorbida, y parte es transmitida a través del tejido vegetal. La habilidad de los cuerpos (por ejemplo, suelos y plantas) de reflejar, absorber y transmitir esta radiación varia considerablemente. La radiación que es reflejada por un objeto se le denomina radianza y se representa con la letra L, también con unidades de Wm^{-2} .

Un radiómetro de mano recibe radiación reflejada por un objeto en la dirección dentro del ángulo de vista del instrumento. Los sensores dentro del aparato son sensibles a tal radianza y producen un voltaje que es medido, y por medio de una calibración se relaciona a la radianza. De esta forma se puede anotar que la ecuación:

$$L = CV \quad (2)$$

donde C es el factor de calibración y V es la respuesta en voltaje del instrumento para una determinada radianza.

Como se ha mencionado la radianza es la radiación que ha sido reflejada por un objeto indicando que la cantidad de energía reflejada es una propiedad de la naturaleza del objeto. Esta propiedad es la reflectancia, que se denomina

con el símbolo R , y tiene unidades con valores entre cero y uno. Se representa por la ecuación:

$$L = ER \quad (3)$$

De esta ecuación se puede observar que cuando R es constante, L es directamente proporcional a la irradianza. Esta relación limita el uso directo de la medición de radianza debido a que la irradianza también debe ser especificada. Una solución obvia para este problema es calcular reflectancias; sin embargo, esto requiere la medición de E . Una buena aproximación de E puede ser obtenida mediante la medición de radianzas a

partir de un objeto de reflectancia conocida, esto es, un panel o plato de calibración.

Un plato estándar de reflectancia puede hacerse aplicando una pintura de BaSO_4 a una hoja de metal. También polvo de sulfato de bario puede comprimirse formando una hoja plana. Platos de este tipo son altamente reflectivos, a un nivel de reflectancia de un 90 a 95 por ciento. Cuando son vistos a ángulos de 0° (al nadir) a 45° , o iluminados a ángulos menores de 45° con la vertical, se asume que se comportan como superficies Lambertianas, aunque siempre existen algunas desviaciones que las alejan de ser perfectas.

Una superficie Lambertiana o "perfectamente difusa" es una superficie que refleja igualmente en todas direcciones. La radianza de una superficie Lambertiana iluminada uniformemente es constante a cualquier ángulo de vista.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Un plato estándar de BaSO_4 , calibrado con una fuente constante de radiación va a tener una reflectancia constante R_p . Si se tiene un plato cerca del objeto de interés, es posible medir la radianza a partir del plato para tener la ecuación:

$$L_p = ER_p \quad (4)$$

y, debido a que en un corto intervalo de tiempo la irradianza, E , no cambia significativamente, la medida de un objeto nos daría la ecuación:

$$L_t = ERt \quad (5)$$

Si se combinan las ecuaciones 4 y 5, obtendríamos la ecuación:

$$Rt = \frac{RpLt}{Lp} \quad (6)$$

La cual calcula el factor de reflectancia bi-direccional del objeto (el cultivo de trigo). Si el objeto (y el plato) se aproximan a una superficie Lamberciana, el factor de reflectancia, Rt , es independiente de la irradianza y del ángulo de

vista; sin embargo, los cultivos y las superficies de suelo no son usualmente Lambercianas. Las radianzas de estas superficies son dependientes del ángulo de iluminación y del ángulo de vista.

El término "factor de reflectancia bidireccional" se usa para indicar la dependencia angular de la medición. Generalmente se usa solamente el término de reflectancia, sin embargo; en las mediciones que se hacen específicamente con el radiómetro de mano, el concepto del factor de reflectancia bidireccional es el más apropiado.

2.5. Índices de Vegetación

En el espectro visible, la vegetación sana y libre de estrés muestra una alta absorción en el rango electromagnético azul (470 nm) y en el rojo (670 nm) y una alta reflectancia en el verde (500 - 620 nm). Esto explica el por qué el ojo humano ve la vegetación en color verde. La absorción en el azul y en rojo es controlada por la clorofila y muchos otros pigmentos presentes en el cloroplasto de la hoja. En este organelo se utiliza la radiación fotosintéticamente activa incidente utilizada en el proceso de fotosíntesis donde se transforma el dióxido de carbono y agua en carbohidratos y oxígeno (Chuvieco, 1996).

En el espectro infrarrojo cercano (720 a 1,300 nm) se observa un alta reflectancia como producto de una fuerte dispersión de energía en el mesófilo esponjoso de la hoja. En una curva espectral continua, los dos valores de reflectancia contrastantes, bajo en el rojo y alto en el infrarrojo cercano, se le conoce como "salto en el rojo" (Colwell, 1974; Collins, 1978; Elvidge y Lyon, 1985).

Los índices de vegetación (IVs) son combinaciones de bandas espectrales diseñadas para resaltar el salto en el rojo y diferenciar las mediciones radiométricas de la vegetación o de otros materiales sin vegetación. Estos índices no tienen unidades y se incluyen las relaciones (NIR/rojo) diferencias

(NIR-rojo), combinaciones lineales de bandas ($x_1 \times \text{rojo}$) + ($x_2 \times \text{NIR}$), o la combinación de todos ellos (Huete et al., 1996).

Debido a esta simplicidad, los índices de vegetación se han usado para estimar los parámetros biofísicos de las plantas, como el índice de área foliar (IAF), la proporción del área de superficie foliar por unidad de superficie de suelo. Los índices de vegetación también se han relacionado con la biomasa, el peso del tejido vegetal; el por ciento de cobertura verde, la fracción de absorción de la radiación fotosintéticamente activa (FAPAR), la fracción de energía absorbida por el follaje, y otros parámetros agronómicos relacionados con la producción de cultivos (Wiegand et al., 1991; Liu y Huete, 1995).

El índice de vegetación deseado debe tener una alta capacidad para discriminar la vegetación de otros materiales e informar sobre sus parámetros biofísicos. La consistencia en minimizar los efectos que alteran el valor del índice es otro requisito. Por ejemplo, los efectos externos que ocurren como cambios sistemáticos, entre ellos están, el ángulo solar, la influencia atmosférica y el ángulo de vista del sensor durante la estación de crecimiento.

Los efectos internos son el efecto del suelo y del material en descomposición sobre él mismo (residuos de cosecha, etc.) entre otros, estos son también sistemáticos y ocurren aún en mediciones al nivel de suelo. Por normalizar los efectos internos y externos, los índices de vegetación se

pueden aplicar globalmente para estimar las variaciones espaciales y temporales de la vegetación.

2.6. Índice de Vegetación por Proporciones

$$RVI = \frac{NIR}{rojo} \quad (7)$$

La mayor ventaja de este índice es su sensibilidad a los cambios de vegetación bajo condiciones de una alta densidad de vegetación. Su mayor desventaja es que en condiciones de alta actividad de la vegetación, el valor de la banda roja es muy bajo y el índice crece sin límite. Otra desventaja es su insensibilidad en condiciones de vegetación dispersa (Huete et al., 1996).

2.7. Índice de Vegetación Normalizado

El índice de vegetación normalizado (NDVI) fue diseñado para mejorar la diferencia entre las bandas NIR y roja y se expresa como:

$$NDVI = \frac{NIR - rojo}{NIR + rojo} \quad (8)$$

Los valores del índice varían desde -1 hasta 1. Los índices por proporción pueden calcularse a partir de los valores del sensor en voltaje, valores de radianza, o valores digitales de una imagen. Los valores negativos resultan

de objetos donde la reflectancia en el rojo es mayor que en el NIR como es el caso de los cuerpos de agua, nieve o nubes. Los valores cercanos a cero indican una nula o baja influencia de la señal de vegetación y los valores altos indican altas cantidades de vegetación.

Este ha sido el índice más popular entre la comunidad de sensores remotos desde principios de los años 70's. Mucha información se ha reportado para mostrar una relación lineal entre el NDVI y los parámetros foliares de la planta, como es la producción de biomasa, FAPAR, y el porcentaje de cobertura (Tucker et al., 1981; Asrar et al., 1984). La integral del NDVI se ha aplicado en estudios temporales para estimar la productividad primaria neta (NPP) en estudios fenológicos (Justice et al., 1985; Tucker y Sellers, 1986). Por otra parte, el NDVI presenta serias limitaciones. Las

fluctuaciones atmosféricas reducen el valor del índice, al reducir el contraste entre los valores del NIR y el rojo (Teillet, 1989). Los ángulos de vista y solares son los componentes de la función de distribución de reflectancia bidireccional (BRDF). El NDVI experimenta altos valores en la dirección frontal de dispersión comparados con la dirección antisolar (Huete et al., 1992).

Gitelson et al., 1996 (citado por Huete et al., 1996) reportó una insensibilidad del NDVI a valores superiores de 2 de índice de área foliar (LAI) debido a la saturación de la banda roja Huete et al., (1985) y Huete y Warrick (1990) reportaron que el NDVI se incrementa cuando se tienen suelos

oscuros. Sellers documentó el efecto de las diferentes estructuras de cubierta vegetal en el BRDF y el NDVI (Chuviéco 1996).

2.8. Índices de Vegetación Ortogonales

Los índices de vegetación ortogonales aplican el concepto de la línea de brillantez del suelo (Wiegand y Richardson, 1991), el cual es útil para la discriminación de la vegetación de la contribución del suelo. La línea de brillantez del suelo se crea con valores del suelo graficadas en dos dimensiones teniendo como ejes las bandas roja y NIR. Los suelos oscuros con alto contenido de humedad y materia orgánica, o los compuestos por mineral basáltico, responden modestamente en las regiones del rojo y NIR, mientras que los contrastantes suelos brillantes responden con valores de

reflectancia altos en esas bandas. Un pixel completamente cubierto por vegetación responde con un valor bajo en el rojo y un alto en el infrarrojo. En la Figura 2 (de la línea del suelo y un cultivo) se localizaría en la parte superior izquierda de una posible dispersión de puntos que tendrían una forma triangular.

El concepto de la línea de brillantez del suelo asume que todos los suelos se ubicarían a lo largo de una línea y que a medida que la vegetación crece sobre un suelo, los valores van a ir apartándose en una dirección ortogonal a la línea de suelo hacia el punto de total cubierta de vegetación. De esta manera, la medición de la distancia perpendicular de un punto en relación a la

línea del suelo es un indicador de la cantidad de vegetación presente en ese punto (Jackson y Huete, 1991).

Wiegand y Richardson, (1991) propusieron el índice de vegetación perpendicular (PVI) para medir la distancia ortogonal con respecto a la línea de suelo como una distancia Euclidiana, de tal forma que:

$$PVI = \sqrt{(S_r - V_r)^2 - (S_{NIR} - V_{NIR})^2} \quad (9)$$

Donde S es la reflectancia del suelo, V es la reflectancia de la vegetación, r y NIR son las bandas. El PVI trata de reducir la influencia del suelo al asumir que la mayoría de las respuestas espectrales de la vegetación caen sobre la línea del suelo. Este índice ha presentado mejores resultados que el NDVI

bajo condiciones de baja densidad de vegetación (Rondeaux et al., 1996). El mayor problema del PVI es que la dispersión de puntos de los suelos usualmente caen separados de la línea principal de suelos resultando una menor precisión en la interpretación de la respuesta vegetal. Este problema se acentúa en las regiones semiáridas y en las primeras fases de crecimiento de un cultivo.

Huete et al., (1992) reportó que además de una línea de suelo que no es única, la línea de suelo no cruza a través de un origen, fallando en normalizar los efectos de la influencia del suelo. Este autor reportó que tanto los índices

por proporción, como los de la línea de brillantez del suelo, no consideran esos problemas y propuso el índice de vegetación por ajuste de suelo (SAVI):

$$SAVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{roja}}{\rho_{NIR} + \rho_{roja}} * L \quad (10)$$

Donde ρ indica reflectancia, NIR y roja son las bandas, y L es un término que considera la diferencia en transmisión de los espectros rojo y NIR a través del follaje y tiene una relación con la ley de Beer (Huete et al., 1996). Un valor de $L = 0.5$ se reportó como una constante óptima para un amplio rango de condiciones, y $(1 + L)$ es un factor multiplicativo para mantener los mismos límites que el NDVI.

SAVI ha demostrado normalizar el efecto de interacción entre el suelo y la cubierta vegetal y minimizar el efecto multidireccional de las bandas rojas y NIR (Huete et al., 1992) resultando en una mejor estimación de los parámetros biofísicos de la vegetación como el índice de área foliar y % de cobertura que el NDVI.

2.9. Índices de Vegetación con Corrección Atmosférica

Otra familia de índices de vegetación son aquellos que corrigen los efectos atmosféricos. Kaufman y Tanré, (1992) incluyeron la información atmosférica dentro del NDVI. Ellos propusieron el siguiente índice de vegetación con corrección atmosférica (ARVI) (Chuvieco, 1996)

$$ARVI = \frac{\rho^*_{NIR} - \rho^*_{rb}}{\rho^*_{NIR} + \rho^*_{rb}} \quad (11)$$

donde ρ^*_{rb} es la reflectancia con corrección atmosférica molecular y por ozono, y se puede calcular como:

$$\rho^*_{rb} = \rho^*_{roja} - \gamma(\rho^*_{azul} - \rho^*_{roja}) \quad (12)$$

donde azul, roja y NIR son bandas y γ es un factor que depende del efecto de los aerosoles en la atmósfera. Cuando no está disponible, se puede aproximar a 1.

Liu y Huete, (1995) aplicaron este mismo concepto de corrección atmosférica en SAVI, y propusieron el índice de vegetación con corrección atmosférica y ajuste de suelo (SARVI) el cual se puede expresar como:

$$SARVI = \frac{2.5(\rho_{NIR} - \rho_{roja})}{L + \rho_{NIR} + C_1 * \rho_{roja} - C_2 * \rho_{azul}} \quad (13)$$

Donde ρ es la reflectancia a nivel de la superficie o fuera de la atmósfera, L es el mismo factor de ajuste descrito en SAVI, C_1 y C_2 son coeficientes de absorción por aerosoles. De tal forma que valores aproximados para estos coeficientes serían: $L = 1$, $C_1 = 6$, y $C_2 = 7.5$ (Liu y Huete, 1995)

3. - MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. – Ubicación del Sitio

El experimento se diseñó e instaló en el campo del vivero agrícola experimental de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León, localizado en la ex-Hacienda Canadá de General Escobedo, Nuevo León, con las siguientes coordenadas: 25° 47' Latitud Norte y 100° 17' Longitud Oeste

3.2. – Establecimiento del Experimento

A comienzos del mes de noviembre del 2000 se realizaron las actividades finales de preparación de suelo y el 27 del mismo mes se hizo el primer riego con las parcelas ya sembradas.

El establecimiento del experimento se hizo bajo el arreglo de Parcelas Subdivididas bajo el diseño de Bloques al Azar para el análisis de los valores numéricos de las siguientes variables: 2 manejos; 3 cultivos y 3 suelos.

Se establecieron una serie de parcelas experimentales teniendo como variables la combinación de los tres cultivos: alfalfa, avena y cártamo; cada

cultivo fue establecido en parcelas con tres tipos de suelo: con adición de materia orgánica (gallinaza) (SO o suelo oscuro), con adición de vermiculita (SB o suelo blanco) (Fotografía 1) y el testigo, el suelo natural (SN). También los cultivos tuvieron la variable de dos manejos con plaga (CP) y sin plaga (SP). Se establecieron 3 repeticiones por tratamiento. En la Tabla 3 se enumeran los tratamientos y sus especificaciones.

3.3. Tratamientos

Tabla 3. Tratamientos y especificaciones.

No.	Especificación del tratamiento	No.	Especificación del tratamiento
1	Alfalfa en suelo natural con plaga	10	Alfalfa en suelo natural sin plaga
2	Avena en suelo natural con plaga	11	Avena en suelo natural sin plaga
3	Cártamo en suelo natural con plaga	12	Cártamo en suelo natural sin plaga
4	Alfalfa en suelo oscuro con plaga	13	Alfalfa en suelo oscuro sin plaga
5	Avena en suelo oscuro con plaga	14	Avena en suelo oscuro sin plaga
6	Cártamo en suelo oscuro con plaga	15	Cártamo en suelo oscuro sin plaga
7	Alfalfa en suelo blanco con plaga	16	Alfalfa en suelo blanco sin plaga
8	Avena en suelo blanco con plaga	17	Avena en suelo blanco sin plaga
9	Cártamo en suelo blanco con plaga	18	Cártamo en suelo blanco sin plaga

Los tratamientos quedaron distribuidos de acuerdo a un arreglo de parcelas subdivididas en la Figura 3:

Repetición I

CP			SP		
SO al	SN av	SB car	SN al	SO av	SB car
av	al	av	av	car	av
car	car	al	car	al	al

Repetición II

CP				SP							
SN	car	SB	al	SO	al	SN	al	SB	car	SO	car
av		av		car		av		av		al	
al		car		av		car		al		av	

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

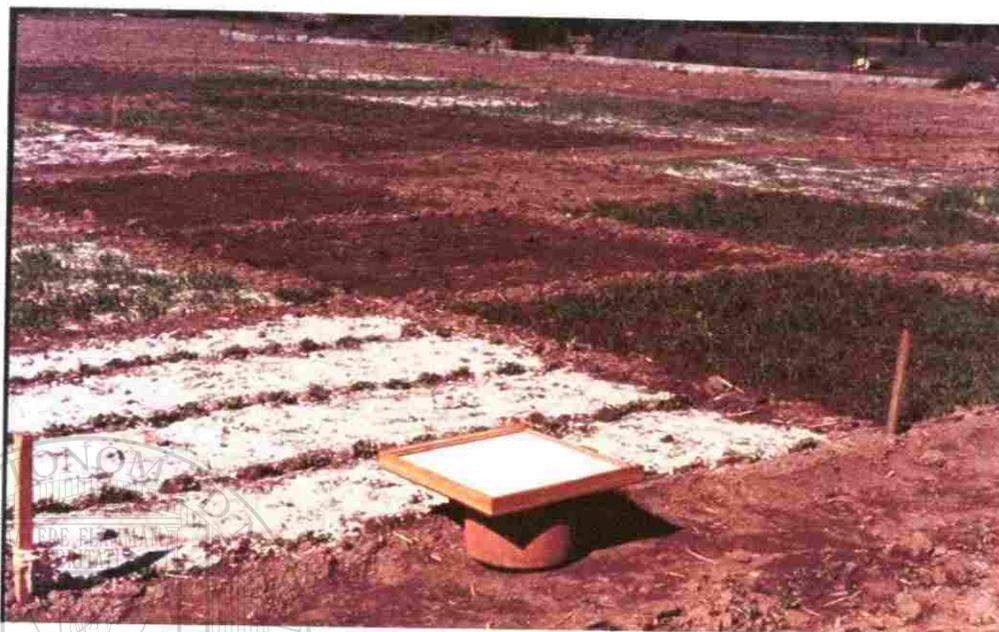
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



Repetición III

CP						SP					
SB	av	SN	av	SO	al	SO	av	SN	car	SB	al
	car		al		car		al		av		av
	al		car		av		car		al		car

Figura 3. Croquis del Experimento



Fotografía 1. Suelos: Natural, Oscuro y Blanco

3.5.- Medición de Variables

Las mediciones en los cultivos fueron: peso fresco (g); materia seca (g); y cobertura (%). De antemano se designó una superficie de 625 cm² (un cuadro de 25 cm de lado) para cada muestreo de vegetación la cual se hizo siguiendo, en la parcela experimental, una forma de espiral concéntrica partiendo de fuera hacia dentro. Cada una de estas mediciones se realizaron en 8 lecturas (ver tabla de fechas de lectura) distribuidas durante el desarrollo de los cultivos según lo permitieran las condiciones climáticas.

La metodología para la toma de muestras del material vegetal fue de cosechar (Fotografía 2), al nivel del suelo, los 0.0625 m² de cada uno de los 18 tratamientos en las tres repeticiones e ir embolsando. Posteriormente se

pesaron de inmediato, en una balanza granataria, para registrar el peso fresco y después llevar las bolsas a la estufa que encendida y programada con una temperatura de 65° C durante 48 h obtenía el peso de la materia seca.



Fotografía 2. Obtención de muestras de peso fresco

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Al terminar de registrar los pesos secos, también se colectó una muestra de suelo de la parcela experimental, la cual se pesaba con la humedad que en ese momento tenía y se dejaba en la estufa con las muestras vegetales para registrar posteriormente su peso seco y obtener por diferencia el contenido de humedad existente en el suelo, a la hora de tomar las lecturas.

Cuando se comenzó el experimento se tomó una muestra de suelo compuesta y se llevo al Laboratorio de Suelos de la FAUANL para la realización de su análisis. Los resultados están reportados en el Apéndice.

El modelo del experimento fue:

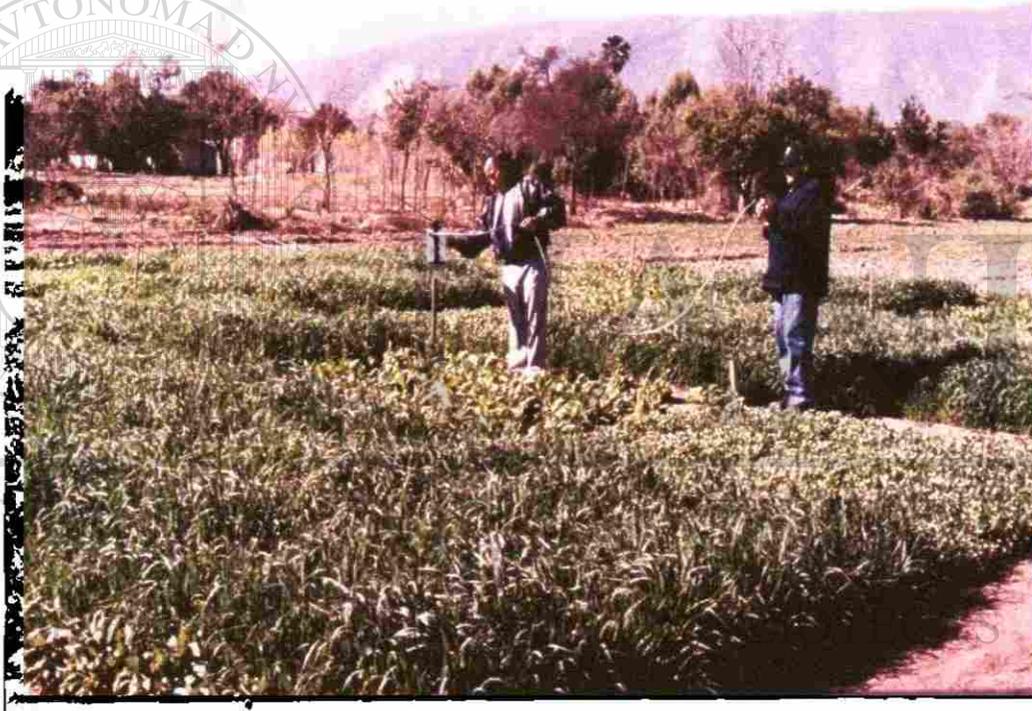
$$Y_{ijkl} = \mu + R_i + A_j + E_{ij}(a) + B_k + (AB)_{jk} + E_{ijk} + C_l + (AC)_{jl} + (BC)_{kl} + (ABC)_{jkl} + E_{ijkl}(c)$$

con este modelo se analizaron los datos de los pesos frescos, materia seca y cobertura y sus efectos existentes, estadísticamente, por las diferentes variables: cultivo, suelos y manejo con plaga y sin plaga.

Con los datos registrados en cada una de las ocho lecturas con el radiómetro (Fotografía 3) se estudió la respuesta espectral de los tres cultivos, la interacción suelos-vegetación y la respuesta espectral de los cultivos a las condiciones de, con plaga y sin plaga y su efecto sobre los parámetros biofísicos estudiados.

Las cuatro bandas del sensor con filtros TM: azul, verde, roja e NIR; y los índices de vegetación NDVI, PVI, RVI Y SAVI fueron analizados al igual que los parámetros biofísicos: peso de materia verde, peso de materia seca y su cobertura vegetal.

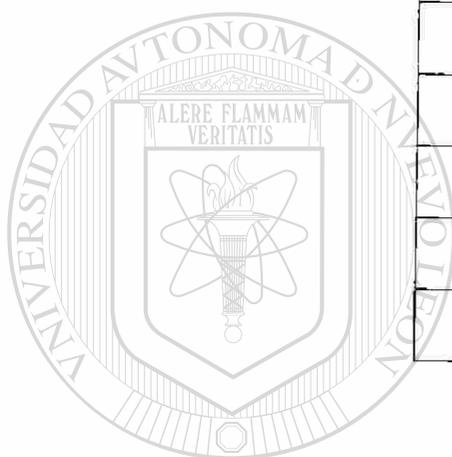
La duración del experimento fue la primera semana de noviembre del 2000 en que se terminaron las labores de preparación del suelo hasta el 17 de mayo del año siguiente en que se tomo la última lectura con el radiómetro según el siguiente calendario de lecturas (Tabla 4):



Fotografía 3. Toma de lecturas con el Radiómetro

Tabla 4. Toma de Lecturas

Lectura	Fecha
1	10 de diciembre de 2000
2	17 de diciembre de 2000
3	23 de diciembre de 2000
4	4 de enero de 2001
5	20 de enero de 2001
6	4 de marzo de 2001
7	21 de marzo de 2001
8	17 de mayo de 2001



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Variación Espectral del Suelo

La variación espectral del suelo es causada, principalmente, por dos tipos de variables; las que determinan su brillantez y las que determinan la forma de su curva espectral. Las primeras, conocidas como efectos primarios o efectos macros, son la textura, rugosidad, humedad, materia orgánica y ángulo de vista del sensor. Las segundas, conocidas como efectos secundarios o efectos micro, son la mineralogía que determina su color y los relacionados con las características de absorción de energía. Ambos efectos son complementarios.

En la Figura 4 se presenta la comparación de las curvas espectrales de los suelos y el cultivo de la alfalfa.

Atendiendo a los anteriores conceptos sobre el comportamiento espectral de los suelos, en la Figura 4 se comparan las curvas espectrales de los 3 suelos utilizados en el experimento: suelo natural (SN), suelo oscuro (SO) y suelo blanco (SB) con la curva espectral del cultivo de alfalfa. La línea amarilla que representa el suelo blanco manifiesta una superior reflectancia en las cuatro bandas comparada con los otros suelos. Los suelos oscuros y naturales presentaron valores similares de reflectancia, sin embargo, el suelo oscurecido

con materia orgánica presentó los valores más bajos en las bandas del visible que el suelo natural. La coincidencia observada en el valor de reflectancia en la banda IR manifestó similar comportamiento reflectivo en éste rango del espectro. Comparando la curva espectral del cultivo de alfalfa con la de los suelos se observó un bajo valor de reflectancia en las bandas azul y roja, la banda verde presentó un incremento comparado a las anteriores bandas, pero éste incremento sólo fue ligeramente superior al valor observado en el suelo oscuro. El incremento observado en la banda verde comparado al observado en el azul y rojo, es suficiente para encumbrarlo como color dominante, de ahí que el ojo humano identifique el verdor del cultivo.

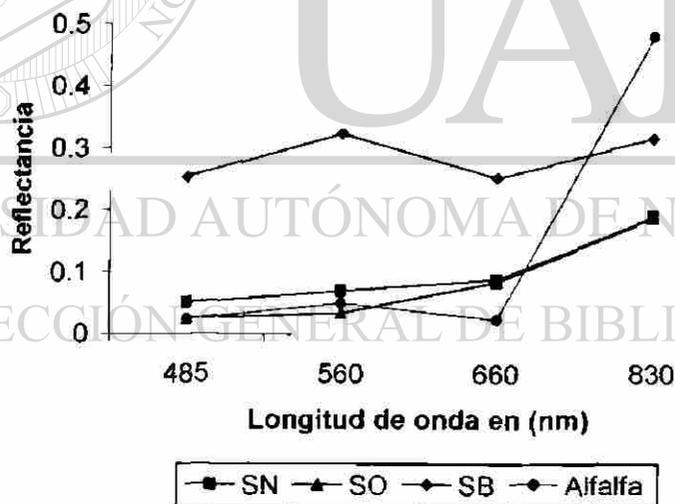


Figura 4. Comparación de las curvas espectrales de los tres suelos utilizados en el experimento y la del cultivo de alfalfa.

La curva espectral del cultivo de alfalfa, mostró el salto del rojo al IR. Como se ha expresado anteriormente, se presenta con la alta absorción en el rojo y la alta reflectancia en el IR. Es importante comparar que el valor de reflectancia

en el IR del cultivo de alfalfa superó el valor del IR del suelo blanco. Ésta característica reflectiva de las plantas en el IR es un importante factor de identificación de la señal de vegetación y al combinarse con la alta absorción en el rojo magnifica su efecto discriminante sobre las señales de otros cuerpos como pueden ser suelos o agua

4.2. Línea de Suelo

Como se mencionó en la parte de revisión de literatura, la línea de suelo es la relación lineal de la reflectancia del suelo en dos bandas. Las bandas roja e IR son las más reportadas. Estas bandas son seleccionadas por su alta correlación con las respuestas espectrales del suelo y la vegetación, lo que permite una clara separación entre estas dos señales. Este concepto es

utilizado para representar la variación espectral de los distintos tipos de suelo en estas dos bandas de acuerdo a su color y a sus respectivas variables de brillantes.

En la Figura 5 se presentaron los valores de reflectancia en las bandas rojas e IR de dos tipos de suelos y dos edades del cultivo de alfalfa. En ésta figura la línea de suelo es representada por la línea unida por los valores del suelo oscuro (SO) y el suelo blanco (SB). En la naturaleza, y debido al grado de la variación de tipos y colores de suelos, se esperaría que ésta línea fuera una elipse mostrando la variabilidad real. De igual manera, la elipse estaría delimitada por los suelos oscuros y los suelos brillantes mostrando una

pendiente en la misma tendencia. En ambos casos, la línea de suelo, representa el nivel de referencia a partir del cual va a iniciar un cultivo su desarrollo. En el caso de la vegetación nativa lo que se presenta son señales mezcladas. Regresando al comportamiento de los cultivos, y como se aprecia en la misma Figura 5, después de la germinación y a medida que un cultivo se desarrolla en sus etapas fenológicas, existe una migración de los valores en dirección de la banda IR como resultado de la absorción en el espectro rojo y mayor reflectancia en el IR. Los valores convergen en un punto cuando se produce la máxima madurez. Tal como se aprecia en las fechas 2 y 6, respectivamente. Después de ese momento, al disminuir la actividad fotosintética, existe un retorno de los valores hacia la línea de suelo como consecuencia de la marchites del cultivo. Esta migración de los valores de reflectancia desde la línea de suelo hacia el punto de máxima actividad

fotosintética y su regreso de manera inversa se le conoce como el modelo del "Taselled Cap" (Kauth y Thomas, 1976).

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

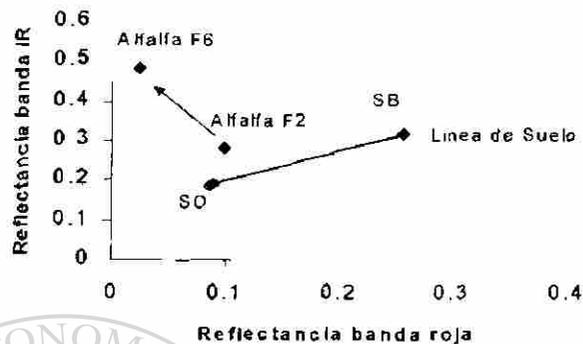


Figura 5. La línea del suelo y alfalfa en 2 fechas.

4.3. Variabilidad Espacial

Cuando se observa una perspectiva aérea de una zona agrícola usualmente se describe un mosaico de cultivos. Este mosaico resulta de los diversos tipos de especies establecidas, sus diferencias en edad dentro de un mismo cultivo, o debidas a variaciones de manejo originados por la diversa propiedad de los predios, entre otros factores.

Aun en la zona de unicultivo extensivo, cierto grado de variación puede ser visualmente observado como resultado de la edad de las plantas, por distinta condición de las mismas por aspectos de sanidad, fertilidad o humedad del suelo

En el presente estudio se han simulado condiciones de variabilidad considerando tres cultivos; avena, alfalfa, o cártamo. Cada uno de ellos presenta diferente estructura foliar y hábito fenológico iniciando desde su método de siembra: los dos primeros al voleo y el tercero en hileras. Se consideró además tres condiciones de suelo; suelo natural, suelo blanco inducido con perlita y suelo oscuro con gallinaza. La variación en color del suelo es radiométricamente importante hasta el momento que es cubierto completamente por la vegetación. Además, durante el desarrollo del cultivo, solo a la mitad de las parcelas se les controló plagas y enfermedades dejando el resto sin tratar. En este aspecto es importante reportar que solo el cultivo de avena presentó ataque significativo de roya (Puccinia coronata Cda) a partir del segundo tercio de su desarrollo. Los cultivos de cártamo y alfalfa presentaron daño mínimo de plagas y enfermedades.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

En el presente experimento se valora, además de la observación visual, la cuantificación de la energía reflejada por los cultivos midiéndola con el radiómetro Exotech. En la Figura 6 se presenta la variabilidad de valores de reflectancia en el espectro rojo e infrarrojo en dos épocas de crecimiento a los 13 días (F1) y 97 días (F6) después de la fecha de siembra. Como se aprecia en esta figura, los valores del rojo e IR en la fecha 1 (F1) presentan un menor rango de diferencia como resultado de una mayor influencia del suelo. A medida que se desarrolla el cultivo, una vegetación sana refleja alto en el IR y absorbe el rojo como producto de la absorción, en esta porción del espectro

por la clorofila durante la actividad fotosintética. Nótese en la Figura 6 que los valores de estas bandas se polarizan.

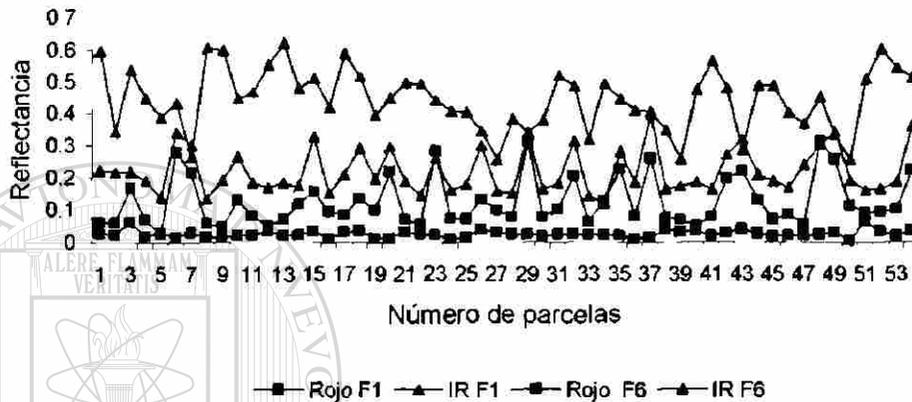


Figura 6. Variabilidad de los valores de reflectancia en la banda roja e IR para las parcelas experimentales.

4.4. Bandas Individuales

4.4.1. Análisis Temporal

En la Figura 7 se presenta el comportamiento temporal de las cuatro bandas en el cultivo del cártamo. Este cultivo fue sembrado en hileras con una separación de 75 cm y 25 cm entre plantas. Esta forma de siembra provoca que cuando se toman lecturas, de manera aleatoria dentro de la parcela experimental, en algunas domine la influencia de suelo y en otras la señal de vegetación hasta que se tenga una cobertura total por el cultivo. En base a esta consideración se puede observar en la Figura 7 que las bandas en el espectro

óptico; azul, verde y rojo, presentan valores similares de reflectancia los cuales son bajos si se les compara con la banda del IR.

La banda IR, como ocurrió con los demás cultivos, presentó valores altos con respecto a las otras tres bandas y en la figura se observa que hasta la cuarta lectura (39 días después de la siembra) se presentó una respuesta compartida entre la señal del cultivo y la del suelo. Después de la cuarta fecha se nota un incremento en la curva del IR como dominancia de la señal de vegetación alcanzando su máximo crecimiento en la sexta fecha, manteniéndose hasta la séptima fecha, a partir de la cual inicia su decaimiento fotosintético por la terminación de su ciclo de crecimiento. La afirmación de la participación del suelo en las primeras cuatro lecturas es respaldada por la mayor reflectancia de la banda roja comparada con la verde. La dominancia de la banda verde se presenta en las fechas cinco, seis y siete. La banda roja domina nuevamente en la octava lectura.

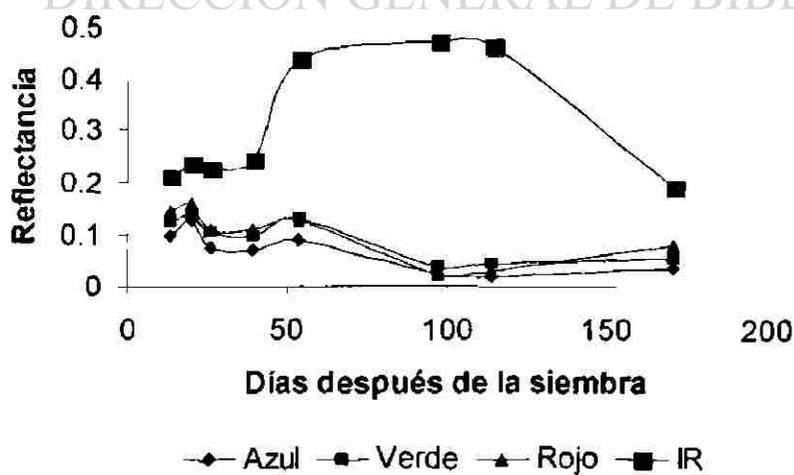


Figura 7. Comportamiento temporal de las bandas en el cultivo de cártamo

La Figura 8 presenta el comportamiento temporal de las bandas en el cultivo de alfalfa. Al observar las bandas del espectro óptico se puede notar que a los 13 días después de la siembra, cuando se realizó la primera lectura, se reportaron valores similares entre las señales de las bandas en el espectro rojo y verde. Esta coincidencia de valores resultó por la combinación de señales del suelo y de la vegetación en esa fecha.

A medida que el cultivo cubre completamente el terreno, el verde inicia su dominancia sobre los otros dos colores como resultado del principio que dice “en el óptico, vemos el color que reflejan los cuerpos”. Nótese que esta dominancia no se pierde a lo largo del período de estudio por ser este cultivo de hábito de crecimiento perenne.

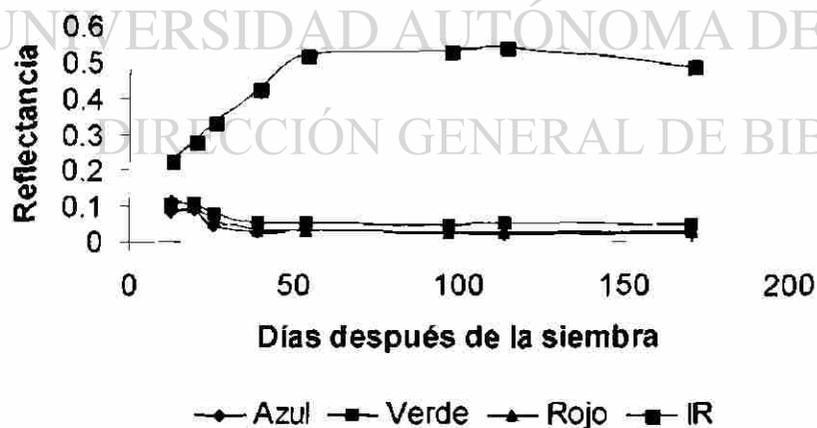


Figura 8. Comportamiento temporal de las bandas en el cultivo de alfalfa.

Adicionalmente en ésta Figura 8 se puede apreciar el comportamiento temporal de la banda IR. En ella se puede apreciar un incremento en el valor promedio de reflectancia en esta banda, a medida que el cultivo incrementa su desarrollo. La curva llega a un máximo el cual tiende a mantenerse durante el tiempo del experimento sin mostrar un decrecimiento por aspectos de senescencia.

En la Figura 9 se presenta el comportamiento temporal de las bandas en el cultivo de avena. A diferencia del cultivo de alfalfa, el cultivo de avena presenta la curva del IR describiendo un decaimiento por senescencia después de alcanzar su punto máximo de crecimiento, a los 54 días después de la siembra. Al igual que la alfalfa en la primera lectura, se presentaron valores similares entre el rojo y el verde. Este comportamiento se prolongó hasta la segunda lectura, a los 20 días después de la fecha de siembra. Debido a este comportamiento espectral se puede asumir que el cultivo de avena tiene una velocidad de crecimiento menor que la alfalfa reflejado en la cobertura vegetal.

Otra diferencia interesante entre los cultivos comparados es el resurgimiento de la dominancia de los valores en la banda roja sobre la verde en la última fecha de lectura. Este comportamiento se explica como resultado de la baja actividad fotosintética de la avena en esta fecha resultando en su amarillamiento característico.

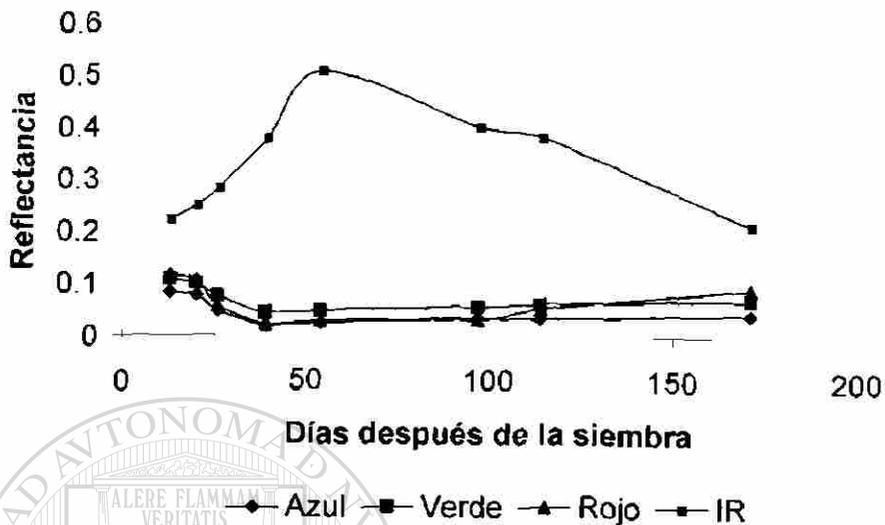


Figura 9. Comportamiento temporal de las bandas en el cultivo de avena.

4.4.2. Análisis Espectral

El comportamiento espectral de un cultivo describe el grado de absorción o reflectancia que presenta en las lecturas de las distintas bandas. El radiómetro Exotech proporciona información en cuatro canales teniendo como valor promedio de banda 485, 560, 660, y 830 nm que corresponden a los espectros azul, verde, rojo e IR, respectivamente. Como se ha descrito anteriormente, las plantas que tienen una alta actividad fotosintética absorben el azul y el rojo como consecuencia de la fijación de energía en estos espectros, proceso que ocurre en los pigmentos azules y rojos presentes en los cloroplastos. En contraparte, las células turgentes reflejan alto el IR como resultado del proceso de dispersión que ocurre en el interior de las células del parénquima esponjoso

y lagunar. Este proceso de dispersión es reportado como un proceso similar al que ocurre con el paso de la luz solar a través de la atmósfera.

En la Figura 9 se presenta el comportamiento espectral del cultivo de cártamo con lecturas en tres fechas después de la siembra. El valor de reflectancia es el valor obtenido al promediar todas las parcelas experimentales incluyendo con plaga y sin plaga. La fecha 1 corresponde a la lectura realizada 13 días, la lectura 6 a la realizada a los 97 días, y la lectura 8 a la realizada a los 171 días después de la fecha de siembra, respectivamente. Se eligieron estas tres fechas por ser el inicio del experimento, la fecha 6 por ser una fecha en la que los cultivos se encontraron en su punto máximo de crecimiento y por indicar el final del experimento o del cultivo.

En la Figura 10 se aprecia que la curva de la fecha 1 presenta una pendiente ascendente sin reaccionar notoriamente en las distintas bandas. Esta forma de curva es muy similar a las curvas típicas de los suelos. En contraste la curva de la fecha 6 presenta una mayor absorción en las bandas del espectro óptico. Dentro de este espectro, la banda verde presenta un valor ligeramente mayor al de las otras dos bandas. Al compararse con la curva de la fecha 1 se puede denotar que en esta porción del espectro la vegetación es opaca. Con respecto a la banda del IR se observa un incremento significativo al compararse con las otras bandas. Este cambio es conocido como "salto al IR" y ocurre en periodos fenológicos de alta producción fotosintética. Al llegar a la fecha 8 el cultivo de cártamo se encontraba color amarillo como consecuencia

de la culminación de su ciclo. En esta fecha se obtuvo una curva de forma similar a la de la fecha 1 pero con menor reflectancia. Un ligero incremento en la pendiente al pasar del rojo al IR puede ser observado, pero aun con valores de reflectancia menores.

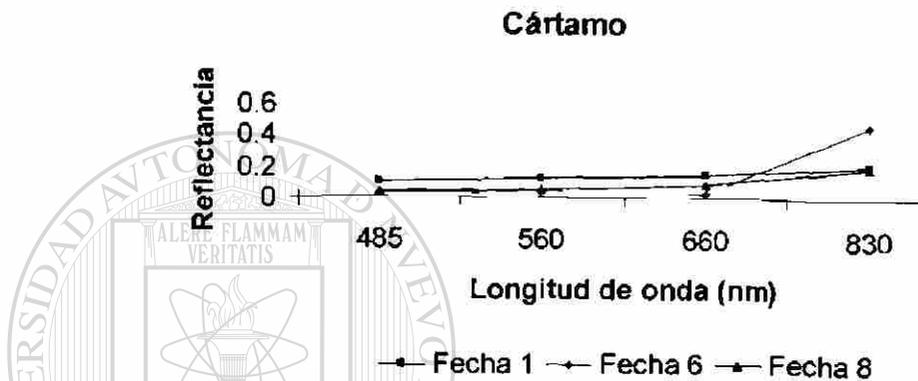


Figura 10. Comportamiento espectral del cultivo de cártamo en tres estados de crecimiento.

En la Figura 11 se presenta el comportamiento espectral del cultivo de alfalfa en tres estados de crecimiento. Las tres fechas son idénticas a las descritas en el cultivo del cártamo.

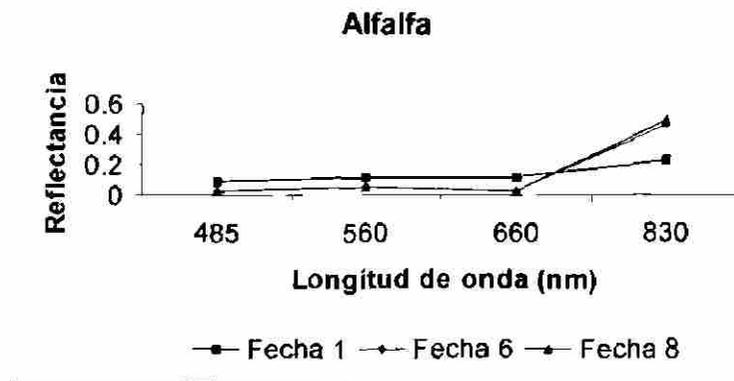


Figura 11. Comportamiento espectral del cultivo de alfalfa en tres estados de crecimiento.

En ésta Figura, la fecha 1 presenta una curva similar a la mencionada curva de suelos. Las fechas 6 y 8 presentan un idéntico comportamiento en las cuatro bandas. Esto explica que una vez que el cultivo llega a su clímax, este se mantiene hasta la última lectura 8. De hecho continuó mas allá del período del experimento. Nótese que la reflectancia en el IR en los cultivos de cártamo y alfalfa es mayor que al obtenido en avena. Una explicación a esta respuesta puede fundamentarse en las diferencias entre la estructura celular de las dicotiledóneas y las monocotiledóneas.

En la Figura 12 se presenta el comportamiento espectral para el cultivo de avena en tres etapas de crecimiento. De manera general, en ésta gráfica, se puede observar un comportamiento similar al observado en el cultivo de cártamo para la respectiva fecha. Un par de diferencias pueden resaltar el valor en el IR en las primeras dos fechas con respecto al cártamo. Primero, la diferencia entre las dos curvas es menor que en el cultivo del cártamo. Segundo, la pendiente hacia el valor del IR es mayor. La razón de estas diferencias es la forma del cultivo de la avena al voleo que incrementa la cobertura vegetal y la capacidad de rebrote que tuvo el cultivo al momento de la lectura 8.

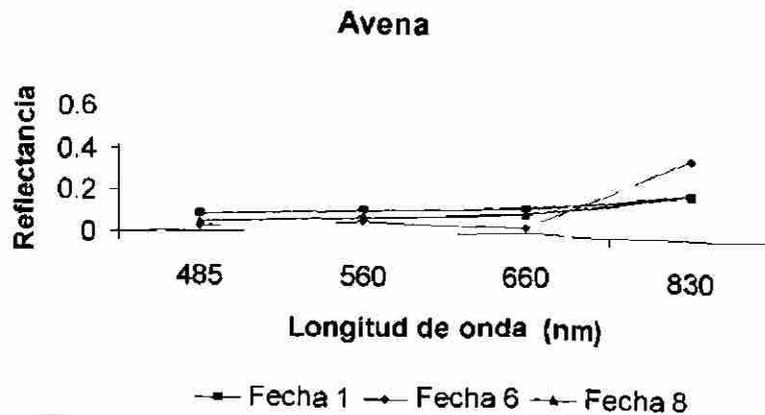


Figura 12. Comportamiento espectral del cultivo de avena en tres estados de crecimiento.

4.4.3. Análisis de los Índices de Vegetación

A partir de los valores de reflectancia de las distintas bandas se calculan los índices de brillantez, verdor y de vegetación como se describen en los

apéndices 4, 5 y 6. El resultado final del cálculo de éstos índices se concentra en las siguientes Tabla 5, 6 y 7 para los cultivos considerados en éste estudio.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Tabla 5. Resultados de las variables y de los Índices de Vegetación del cultivo de la alfalfa.

Superficie	BR	VER	PVI	RVI	NDVI	SAVI
Suelo B	0.5536	0.1666	0.0000	1.2473	0.1100	0.0881
Suelo O	0.1283	0.1668	0.0000	2.2147	0.3779	0.2014
40%Veg/SB	0.4361	0.3181	0.2225	2.3301	0.3994	0.3225
40%Veg/SO	0.1315	0.1765	0.0394	4.0658	0.6052	0.2933
100% Veg	0.2204	0.5362	0.5613	16.3260	0.8846	0.6966

Tabla 6. Resultados de las variables y de los Índices de Vegetación del cultivo de la avena.

Superficie	BR	VER	PVI	RVI	NDVI	SAVI
Suelo B	0.5536	0.1666	0.0000	1.2473	0.1100	0.0881
Suelo O	0.1283	0.1668	0.0000	2.2147	0.3779	0.2014
40%Veg/SB	0.3929	0.2491	0.1018	1.7093	0.2618	0.2047
40%Veg/SO	0.1319	0.2040	0.0841	4.5962	0.6426	0.3313
100% Veg	0.2048	0.5220	0.5481	19.3192	0.8471	0.6948

Tabla 7. Resultados de las variables y de los Índices de Vegetación del cultivo del cártamo.

Superficie	BR	VER	PVI	RVI	NDVI	SAVI
Suelo B	0.5536	0.1666	0.0000	1.2473	0.1100	0.0881
Suelo O	0.1283	0.1668	0.0000	2.2147	0.3779	0.2014
40%Veg/SB	0.4443	0.4528	0.3979	2.687	0.4575	0.4066
40%Veg/SO	0.2404	0.3349	0.2569	4.0438	0.6035	0.4285
100% Veg	0.1874	0.4926	0.5028	20.9156	0.9087	0.6768

En las tablas 5, 6 y 7 se observa que es posible identificar mediante el valor de un índice las distintas etapas fenológicas de un cultivo. Para utilizar teledetección, la variabilidad de los tipos de suelo debe de ser normalizada si se desea conocer la actividad fotosintética productiva de la vegetación. El método descrito en estas tablas permite además cuantificar la sobreestimación en la medición de vegetación que causan algunos índices como NDVI y SAVI.

Como se ha mencionado en la revisión de literatura un buen índice de vegetación debe ser sensible cuando existe vegetación activa y debe permanecer insensible en ausencia de ella. En éste aspecto el PVI resultó eficiente discriminando entre las señales de vegetación y suelo presentando valores de 0 para las condiciones de suelo blanco (SB) y suelo oscuro (SO).

En estas mismas tablas también se puede observar que el índice de brillantez disminuye a medida que se incrementa la cubierta vegetal. De ahí que el suelo es considerado como una superficie brillante y la vegetación como una superficie opaca en el espectro visible. Por lo contrario, siguiendo su lógica, el índice de verdor incrementa su valor con el crecimiento vegetativo.

Los valores presentados, en las tablas mencionadas, pueden ser indicadores del estado y la cubierta de los cultivos cuando se utilizan imágenes digitales de los diversos sensores y satélites para estudios en agricultura, siempre y cuando, se elimine el efecto atmosférico.

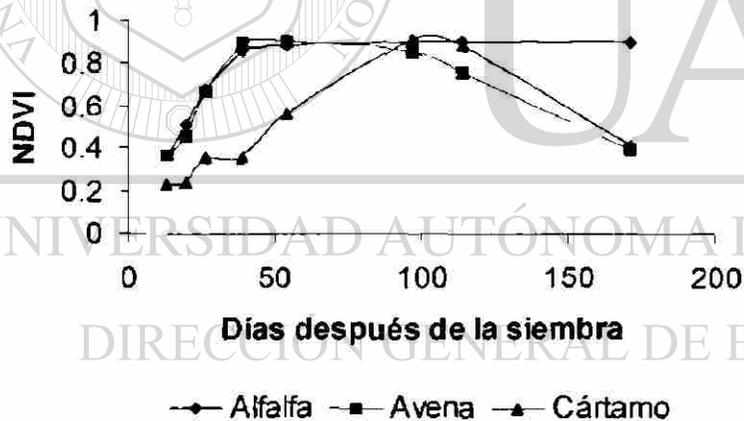


Figura 13. Distribución temporal del Índice de Vegetación NDVI de los cultivos.

En la anterior gráfica se puede ver como la curva de cada uno de los cultivos es de acuerdo a su hábito de crecimiento que resalta a los de cobertura total como lo son la alfalfa y la avena. Haciendo un análisis de las curvas podremos explicar como, a diferencia de los otros dos cultivos la alfalfa de color azul tuvo una reflectancia de su Índice *constante* ya que ella es perenne, caso similar lo

es la avena que tuvo una gráfica parecida a la de la alfalfa, solo que a los 97 días después de la siembra, el efecto de la presencia de la roya y el comienzo de la finalización del cultivo, disminuyó la cobertura demostrándose con la precipitación de la gráfica. Lo mismo sucedió con el cártamo en cuanto a su senescencia.

4.4.4. Análisis de Varianza

Tabla 8. Análisis de Varianza

No. De lectura	Variable	P>F
PF1	Suelos	0.003**
PF2	Cultivos	0.044*
PF3	Suelos	0.005**
PF4	Plagas, Suelos y Cultivos	0.048, 0.015 y 0.034*
PF5	Suelos	0.000**
PF6	Suelos	0.001**
PF7	Suelos	0.000**
PF8	Ninguna	
MS1	Suelos	0.021*
MS2	Ninguna	
MS3	Suelos	0.026*
MS4	Plaga y Suelos	0.012 y 0.004**
MS5	Suelos	0.000**
MS6	Suelos	0.000**
MS7	Suelos	0.000**
MS8	Ninguna	
COB1	Suelos	0.000**
COB2	Suelos	0.000**
COB3	Suelos	0.000**
COB4	Suelos	0.000**
COB5	Suelos	0.000**
PPF	Suelos	0.001**
PMS	Suelos	0.002**
PCOB	Suelos y Suelos-Cobertura	0.000 y 0.04**

Notas: PF = peso fresco; MS = materia seca, COB = cobertura; PPF = promedio de peso fresco; PMS = promedio de materia seca y PCOB = promedio de cobertura; * =significativo **=altamente significativo.

El análisis de varianza se corrió con los datos de peso fresco (PF), materia seca (MS) y cobertura (COB). Fueron 8 fechas de muestreo las que se analizaron en peso fresco y materia seca y sólo 5 en cobertura por la razón de que en ésta se alcanzó el 100% en los 3 cultivos.

La Tabla 8 tiene concentrados los resultados del análisis de varianza de cada una de las variables y al final, las últimas 3, donde se analiza su promedio total. Los resultados se ven claramente marcando una diferencia altamente significativa en la mayoría a excepción de la cobertura en su promedio total (PCOB) que diferencia también la interacción suelo-cultivo.

La traducción de los resultados estadísticos anteriormente expuestos a las variables analizadas como son: el manejo (con plaga y sin plaga); los suelos (SN, SO y SB) y los cultivos (alfalfa, avena y cártamo), significa que en la realidad el efecto de la actividad de cada variable en su contexto no tuvo trascendencia a excepción del suelo que sí arrojó diferencias altamente significativas. Esto permitió que los cultivos ahí desarrollados fueran altamente influenciados por las características que diferenciaban a cada uno de los suelos.

4.4.5. Análisis de Regresión

Tabla 9. Coeficientes de determinación de NDVI de 3 cultivos y las variables biofísicas: peso fresco, materia seca y cobertura.

	Con 8 observaciones	Con 5 observaciones
Alfalfa-Peso Fresco	0.4517	0.8320
Alfalfa-Materia Seca	0.3663	0.7252
Alfalfa-Cobertura	0.9203	0.9390
Avena-Peso Fresco	0.2470	0.8208
Avena-Materia Seca	0.0008	0.8008
Avena-Cobertura	0.4079	0.9676
Cártamo-Peso Fresco	0.8494	0.9666
Cártamo-Materia Seca	0.3695	0.9753
Cártamo-Cobertura	0.5385	0.7667

La relación existente entre el cultivo y las variables: peso fresco, materia seca y cobertura se ve altamente significativa en la alfalfa y la avena con la cobertura (0.9390 y 0.9676 respectivamente sus coeficientes de determinación) seguramente por el tipo de habito de crecimiento de los cultivos que es similar a diferencia del cártamo que de entrada su cobertura inicial es muy deficiente (0.7667 de coeficiente de determinación).

Tabla 10. Coeficientes de determinación de SAVI de 3 cultivos y las variables biofísicas: peso fresco, materia seca y cobertura

	Con 8 observaciones	Con 5 observaciones
Alfalfa-Peso Fresco	0.4221	0.6977
Alfalfa-Materia Seca	0.3340	0.6118
Alfalfa-Cobertura	0.9521	0.9484
Avena-Peso Fresco	0.2123	0.6564
Avena-Materia Seca	0.0001	0.6319
Avena-Cobertura	0.3632	0.9478
Cártamo-Peso Fresco	0.9051	0.9068
Cártamo-Materia seca	0.4697	0.9152
Cártamo-Cobertura	0.6366	0.7723

El Índice de Vegetación SAVI tiene ventaja sobre el NDVI respecto a su precisión en el estimar el parámetro biofísico de la cobertura de la vegetación por lo que debemos considerar los valores obtenidos en ésta última búsqueda del coeficiente de determinación favoreciendo a los obtenidos por medio del SAVI, en la alfalfa y el cártamo se incrementaron los coeficientes de determinación a excepción de la avena que bajo de .96 a .94.

0091710

5. CONCLUSIONES

Atendiendo los resultados en función de los objetivos planteados en la presente investigación se considera lo siguiente:

Existe un resultado que nos induce a pensar que podemos separar la influencia de la interacción suelo-planta como nos lo demuestra la figura 4 donde claramente se ven las diferentes reflectancias provocadas por cada uno de los suelos (SN, SO y SB y el cultivo de la alfalfa) donde predomina el suelo blanco con una mayor reflectancia en las cuatro bandas con excepción de la alfalfa en el IR (Objetivos e hipótesis a y b).

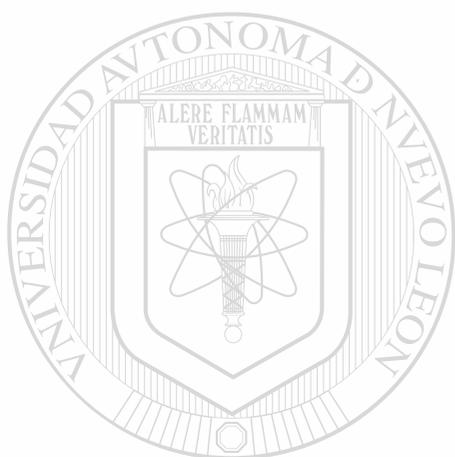
También la figura 4 nos refuerza el punto anterior además de agregar que el cultivo representa una reflectancia producto de su estado físico. En ésta figura se ve a la alfalfa en la fecha 2 con una menor reflectancia que la fecha 6 la cual tiene un diferente estado físico y obviamente, una diferente productividad por su desarrollo fenológico avanzado (Objetivo e hipótesis a). La Figura 5 nos complementa ya que los valores del rojo e IR en la fecha 1 (F1) presentan un menor rango de diferencia como resultado de una mayor influencia del suelo.

Utilizar la radiometría para inferir sobre el estado de producción y de sanidad de las plantas se puede constatar en las figuras 6, 7, 8 y 9 donde se ve el predominio del verde sobre el azul y el rojo y un comportamiento del IR a irse incrementando conforme va el cultivo obteniendo mayor desarrollo o declinando cuando el cultivo comienza a fenecer (Objetivos e hipótesis a, b y c).

En la figura 13 el Índice de vegetación NDVI nos demuestra como la reflectancia de las bandas individuales pueden ser usadas para determinar el estado de producción de los cultivos y crear la expectativa de que los Índices actuales todavía se pueden mejorar (Objetivos c y d)

Definitivamente la presente investigación nos arroja la experiencia que existen metodologías que todavía no son aplicadas en nuestra zona y de manera extensiva e intensiva en México. Con la mundialización es menester adquirir todas las formas y sus actualizaciones para proveernos de una seguridad en nuestra producción agrícola. Es importante aplicar la teledetección, en un futuro, (que ya fue ayer en México) para monitorear los cultivos en cada una de sus etapas fenológicas y vigilar su desarrollo programado o detectar las deficiencias fisiológicas; la identificación de la cobertura vegetal. Hay aplicaciones más allá del beneficio agrícola como la prevención de incendios forestales en países como Canadá, Francia, España y EE UU. Finalmente creo que si un conocimiento alguien lo busco o generó,

nosotros tenemos la obligación profesional de utilizarlo en beneficio de nuestro país y/o de la humanidad.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

6. LITERATURA REVISADA

Agricultural Research. 1998. World Weather: Tha soil has a role too. Vol. 46

No. 4.

Agricultural Research. 1999. Researchers capture "Ground Truth ". vol. 47

No. 3.

Asrar, G., M. Fuchs, E.T. Kanemasu, and J.L. Hatfield. 1984. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance

in wheat. Agron. J. 76:300-306.

Campbell J.B. 1987. Introduction to Remote Sensing The Guilford Press.

New York. 551 pp.

Chuvieco Emilio. 1996. Fundamentos de teledetección espacial. 3era. Edición.

Editorial RIALP, S.A Madrid, España

Colwell, J.E. 1974. Vegetation canopy reflectance. Remote Sens Environ

3 175-183.

Collins, W. 1978. Remote sensing of crop type and maturity. *Photogr. Eng. Remote Sens.* 44: 43-55.

Elvidge, C.R. and R.J. Lyon. 1985. Influence of rock-soil spectral variations on the assessment of green biomass. *Remote Sens. Environ.* 17:256-279

Huete, A.R., R.D. Jackson, and D.F. Post. 1985. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote Sens. Environ.* 17:37 – 53.

Huete A.R. and A.W. Warrick. 1990. Assessment of vegetation and soil water regimens in partial canopies with optical remotely sensed data. *Remote Sens. Environ.* 32:155-167.

Huete A.R., G.Hua, J.Qi, A. Chebouni, and W.J.D. van Leeuwen. 1992.

Normalization of the multidirectional red and NIR reflectances with the SAVI. *Remote Sens. Environ.* 41:143-154.

Huete A.R., H.Q. Liu, K. Batchilly, and W. Van Leeuwen. 1996. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images.

Jackson, R.D. and A.R. Huete. 1991. Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine.* 11:185-200

Jordan, C.F. 1969. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*. 50:663-666.

Justice, C.O., J.R.G. Townshend, B.N. Holben, and C.J. Tucker. 1985. Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. *Int. J. Remote Sensing*. 6:1271-1318.

Kaufman, Y. y Tanré, D. 1992. Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30:261-270.

Kauth, R. J. y Thomas, G. S. 1976. The Tasseled Cap: A graphic description of spectral temporal development of agriculture crops as seen by Landsat .

Proceedings of 2nd International Symposium a Machine Processing of Remotely Sensed Data. Purdue University West Laffayette. P 41-51.

Liu, H. and A.R. Huete. 1995. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 33(2):457-465.

Molina M. Luis Carlos. 1984. Sensores activos de microondas. Sistema de radar (Notas de clase preliminares) Circulación restringida. Bogota, Colombia.

Montoya Perez J. Antonio. 1986. Relaciones de la radiación electromagnética con algunos cuerpos naturales. Centro Interamericano de Fotointerpretación (CIAF). Bogota, Colombia. Notas de clase preliminares.

_____. 1986. Percepción remota. Clasificación de los sensores remotos. Plataformas utilizadas en percepción remota. Centro Interamericano de Fotointerpretación (CIAF). Bogota, Colombia. Notas de clase de sensores remotos, circulación restringida.

NASA. 1984. Thematic Mapper, design through flight evaluation. Final Report. Santa Barbara Research Center.

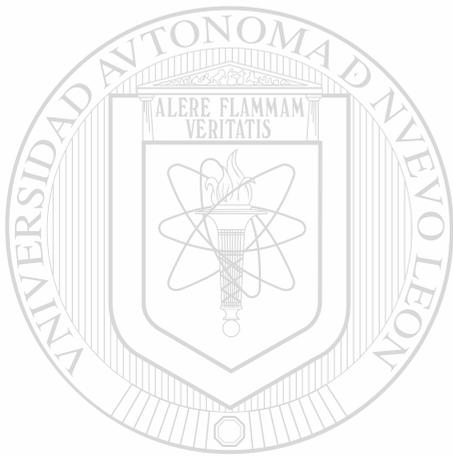
Rondeaux, G., M. Steven, and F. Baret. 1996. Optimizacion of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sens. Environ.* 55:95-107.

Teillet, P.M. 1989. Surface reflectance retrieval using atmospheric correction algorithms. *Proceedings 1989 Int. Geosci. Remote Sensing Symposium (IGARSS '89)*. Vancouver, British Columbia: IGARSS.

Tucker C.J., B.N. Holben, J.H. Elgin, and McMurtey. 1981. Remote sensing of total dry matter accumulation in winter wheat. *Remote Sens Environ* 7:171

Tucker, C.J. and C.P.J. Sellers. 1986. Satellite remote sensing of primary productivity. *Int. J. Remote Sens.* 7:1395-1416.

Wiegand, C.L., A.J. Richardson, D.E. Escobar, and A.H. Gebermann. 1991. Vegetation indices in crop assessment. *Remote Sens. Envir.* 35:105-119.

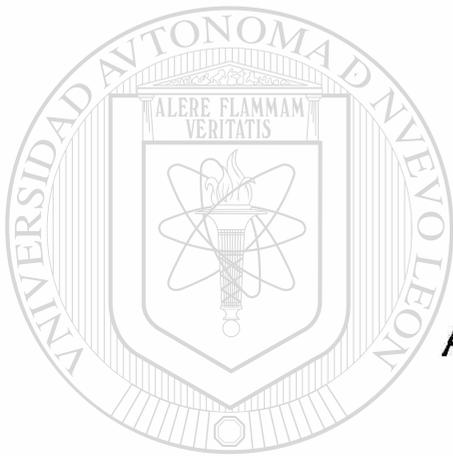


UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



APENDICES

UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

APÉNDICE 1

RESULTADO DEL ANÁLISIS DE LA MUESTRA DEL SUELO DEL EXPERIMENTO

DETERMINACIÓNANÁLISISCLASIFICACIÓNAGRONÓMICA

Color

(Escala Munsell)

Seco 5/2 10YR

Café grisáceo

Húmedo 3/1 10YR

Gris muy oscuro

Reacción

(Relación suelo-agua 1:2) ph: 7.8

Ligeramente

alcalino

Textura

Arena 22.28%

(Método del hidrómetro)

Limo 30.72%

Arcilla

Arcilla 47.00%

Materia orgánica

(Método Walkley y Black)

3.97%

Medianamente

rico

Nitrógeno total



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

(Método Kjeldahl) 0.198% Mediano

Fósforo aprovechable

(Método Olsen) 59.57% Óptimo

Potasio aprovechable

(Método Peech y English) 2.53 meq/100 g. Óptimo

Sales solubles totales

Conductividad

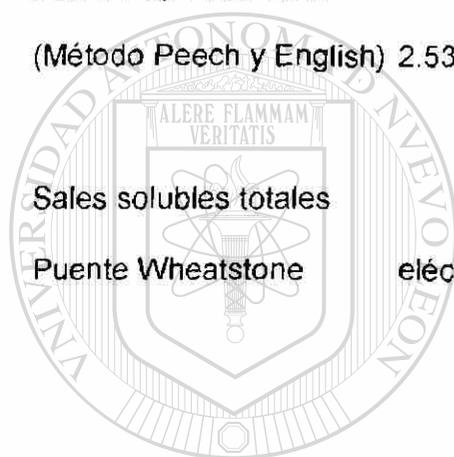
Puente Wheatstone

eléctrica a 25° C

Medianamente

4.62 mmhos/cm.

salino



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

APENDICE 2

EJEMPLO DE UNA SERIE DE LECTURAS DEL RADÍOMETRO:

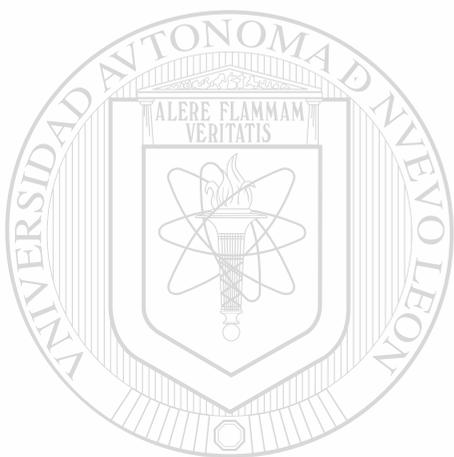
**HEADERINFO

344.000	1210.000	197.000	49.304	OCEJO1	001	25.000	3673
15.000	SRT-99180	11247.251	-8713.072	4992.981	222.777	.000	.000
1.000	1.000	1.000	30.000	.000	.000	0	.000
557.404	.000	955.000	.000	.000	.763	1.068	-.458
1041.000	.000	.000	1.221	.763	-.153	2.289	.000
.000	.000	100.000	1000	777.777	11141.966	-8710.630	4996.338
.845	.845	686.646	.000	1111.000	1111.000	1111.000	.000
.000	.000						.000

EXOT/IRT VOLTAGE DATA

1	9.9997	632.9	1369.2	981.6	1425.9
1	10.0006	630.3	1370.2	976.4	1433.6
1	10.0017	630.5	1363.2	977.6	1431.6
1	10.0025	629.0	1361.8	980.2	1436.0
1	.0000	.0	.0	.0	.0
2	10.0269	21.5	54.5	63.5	256.2
2	10.0317	28.5	54.0	73.5	547.9
2	10.0350	14.0	68.8	47.6	221.3
2	10.0372	21.7	34.0	67.3	325.9
2	.0000	.0	.0	.0	.0
3	10.0425	39.4	103.6	68.2	304.0
3	10.0461	27.8	109.9	77.4	459.4
3	10.0486	30.1	92.8	60.6	401.0
3	10.0511	21.1	107.0	45.6	164.8
3	.0000	.0	.0	.0	.0
4	10.0697	55.8	197.4	204.8	384.8
4	10.0719	37.8	485.2	85.3	327.0
4	10.0756	67.4	124.7	180.1	299.7
4	10.0792	96.7	140.7	226.3	332.3
4	.0000	.0	.0	.0	.0
5	10.0814	19.1	125.4	107.6	334.8
5	10.0844	35.6	100.4	64.8	312.8
5	10.0867	26.7	106.2	75.1	286.3
5	10.0886	43.0	105.4	48.4	247.7
5	.0000	.0	.0	.0	.0
6	10.0908	15.0	65.0	35.4	169.2
6	10.0928	11.1	34.8	25.6	164.2
6	10.0958	21.5	85.4	22.1	278.8
6	10.0983	16.2	69.9	29.9	253.9
6	.0000	.0	.0	.0	.0

7	10.1006	151.2	476.8	321.5	446.2
7	10.1028	81.8	173.5	213.3	391.5
7	10.1047	166.3	373.4	414.7	712.3
7	10.1072	182.2	347.6	223.5	565.9
7	.0000	.0	.0	.0	.0
8	10.1156	98.1	204.0	373.2	485.7
8	10.1178	106.4	339.1	158.2	485.2
8	10.1197	151.5	231.2	90.9	455.9
8	10.1222	37.8	195.6	293.6	450.6



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

APÉNDICE 3

CRONOLOGÍA DE ACTIVIDADES

23 de noviembre. Se procedió a medir el experimento en el terreno de acuerdo al croquis de campo con tres repeticiones de 9 metros de ancho por 18 metros de largo, cada una y separadas entre si por una franja de 1 metro. Las divisiones internas nos permiten tener en cada repetición 2 parcelas de 9X9 metros que corresponden a las variables: Con plaga (CP) y Sin Plaga (SP); 6 sub-parcelas de 3X9 metros que corresponden a las variables: Suelo Natural (SN), Suelo Oscuro (SO) y Suelo Blanco (SB); y 18 parcelas de 3X3 metros donde se establecieron las variables de los cultivos: alfalfa variedad Cuf-101, avena variedad Cuauhtémoc y Cártamo variedad Gila.

24 de noviembre.- Se nivelaron las repeticiones eliminando los terrones grandes que había dejado el tractor para facilitar la siembra.

25 de noviembre.- Se sembró la primera repetición.

26 de noviembre.- Se sembró la segunda repetición

27 de noviembre.- Se sembró la tercera repetición. Al final se regaron las tres repeticiones con manguera y una regadera fina para amortiguar el golpe del agua al caer sobre la semilla y evitar descubrirla.

28 de noviembre.- Se regó nuevamente durante la mañana para asegurar la humedad necesaria para la completa invivición de la semilla y su posterior éxito en la germinación y emergencia.

4 de diciembre.- Comienza la emergencia de la semilla de avena.

5 de diciembre.- Comienza la emergencia de la semilla de alfalfa.

7 de diciembre.- Comienza la emergencia de la semilla de cártamo.

10 de diciembre.- se tomaron las lecturas con el radiómetro tomando primero el plato dos veces para después comenzar con la parcela norte y oriente de la repetición I y seguir en dirección norte-sur, sur-norte y norte-sur para finalizar la repetición y posteriormente volver a hacer una lectura doble al plato y comenzar la repetición II. Se comenzó la repetición II en la misma dirección que la primera al igual que la repetición III.

Posteriormente se muestreó un área de 0.25X0.25 cm. equivalente a 0.0625

M2 de planta para obtener el peso fresco y su materia seca. Alturas (cm): alfalfa

2, avena 9 y cártamo 5. Humedad del suelo: 21.247%

17 de diciembre.- Las lecturas se tomaron con el radiómetro en la misma forma que la primera vez y en el mismo orden.

La forma del muestreo de las plantas van a ser en forma circular concéntrica considerando el centro de cada parcela sea el último que nos permita tener

23 de febrero.- se observaron pocas plantas con flor del cultivo de la avena.

26 de febrero.- Se aplicó insecticida y fungicida en los tratamientos ya marcados. El insecticida fue el diazinón en una dosis de 2 ml por litro de agua y el fungicida Tilt con una dosis de 5 ml por litro de agua. La observación después de la aplicación fue la de no presencia de la plaga vista anteriormente como la mosquita blanca, chicharrita y periquitos. La presencia de la roya sigue por el tratamiento que actúa lento esperando desaparezca después de la segunda aplicación. Se desyerbó la barrera de protección para ampliar el paso.

1 de marzo.- Se vieron 2 plantas de alfalfa con flor.

4 de marzo.- Se tomaron las lecturas al igual que las anteriores veces.

Alturas: alfalfa 27, avena 78, cártamo 103 cm. Humedad del suelo: 14.7%.

Observaciones: El 2 de marzo por la noche y en la madrugada del siguiente día se realizaron fuertes ventarrones por lo que encontramos un fuerte acame en la avena.

7 de marzo.- Se aplicó nuevamente los productos químicos anteriores para el control de plagas y prevención de enfermedades.

8 de marzo.- Se regó con el cañón viendo algunas fugas en el sistema completando lo que no se regó con la manguera y la regadera.

13 de marzo.- Se corrigió la fuga teniendo que cortar con segueta parte del tubo del tripié del cañón. Se regó nuevamente.

21 de marzo.- Se tomaron las lecturas igual que las anteriores. Alturas: alfalfa 33 cm. avena 85 cm. y cártamo 115 cm.

Observaciones: La diferencia de la avena Con Plaga y Sin Plaga es mucha ya que la presencia de roya es mayor en la primera. Humedad del suelo: 19.4%.

27 de marzo.- Se aplicó insecticida y fungicida en la parcela SP.

2 de abril.- Se regó con el cañón nuevo por la tarde.

28 de abril.- Se aplicó insecticida y fungicida en las parcelas SP.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

17 de mayo.- Igual que las anteriores fueron las lecturas. Alturas: alfalfa 54 cm. avena 90 cm. y cártamo 1.20.

Observaciones: La avena sin tratamiento de insecticida caducó a ésta fecha estando el cultivo cubriendo el suelo en un estado completamente flácido. En cambio la avena con tratamiento contra la roya se encontraba erecta, aunque ya el 70% se encontraba seco y el 30% estaba verde todavía. El cártamo desde la semana santa (15 de abril) ya había terminado su ciclo se encontraba totalmente seco Humedad del suelo 17.83%

APÉNDICE 4

CÁLCULOS PARA DETERMINAR LA BRILLANTES, VERDOR Y LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN: PVI, RVI, NDVI Y SAVI DE LA ALFALFA

	Reflectancias de la alfalfa			
	Azul (X1)	Verde (X2)	Rojo (X3)	IR (X4)
Suelo blanco	0.2532	0.3243	0.2548	0.3178
Suelo oscuro	0.025	0.0348	0.0857	0.1898
40% Veg/SB	0.1917	0.2068	0.1751	0.4080
40% Veg/SO	0.0296	0.0576	0.0471	0.1915
100%Vegetación	0.0301	0.0512	0.0319	0.5208

$$b_i = (X_{sb} - X_{so})$$

$$b_1 = 0.2282;$$

$$b_2 = 0.2895;$$

$$b_3 = 0.1691;$$

$$b_4 = 0.128$$

$$b_1^2 = 0.0521$$

$$0.0838$$

$$0.0286$$

$$0.0164$$

1.- Factor de normalización de Briliantez.

$$B = (\sum b_i)^{1/2}$$

$$= 0.1809$$

$$= 0.4253$$

2.- Coeficientes de Brillantez, vector de la línea de suelo.

$$A_{1i} = b_i/B$$

$$A_{11} = 0.5366$$

$$A_{12} = 0.6807$$

$$A_{13} = 0.3976$$

$$A_{14} = 0.3010$$

Con los anteriores coeficientes de brillantez obtenemos la fórmula:

$$BR = 0.5366 X_1 + 0.6807 X_2 + 0.3976 X_3 + 0.301 X_4$$

Debido a que existe una posibilidad infinita de vectores ortogonales con respecto a la línea del suelo, es necesario un píxel para calcular el vector del Verdor.

3.- Considerar la diferencia entre los puntos de verdor y el suelo blanco ($X_v - X_{sb}$).

$$X_v - X_{sb} = (-0.2231, -0.2731, -0.2229, 0.203)$$

4.- Calcule el producto del vector de verdor ($X_v - X_{sb}$) y el vector de la línea del suelo A_{il} . Este procedimiento es conocido como la ortogonalización de Gram-Schmidt y asegura que un vector sea ortogonal a la línea del suelo.

$$\begin{aligned} D_{21} &= \sum (X_v - X_{sb}) A_{il} \\ &= (-0.2231)(0.5366) + (-0.2731)(0.6807) + (-0.2229)(0.3976) + (0.203)(0.301) \\ &= -0.3331 \end{aligned}$$

5.- Encontrar el vector del verdor U_i

$$\begin{aligned} D_{21} A_{il} &= (-0.3331)(0.5366), (-0.3331)(0.6807), (-0.3331)(0.3976), \\ &\quad (-0.3331)(0.301) \\ &= (-0.1787, -0.2267, -0.1324, -0.1003) \end{aligned}$$

$$U_i = (X_v - X_{sb}) - D_{21} A_{il}$$

$$\begin{aligned} &= (-0.2231) - (-0.1787), (-0.2731) - (-0.2267), (-0.2229) - (-0.1324), (0.203) - (-0.1003) \\ &= -0.0444; \quad -0.0464, \quad -0.0905; \quad 0.3033 \end{aligned}$$

6 - Normalizando

$$V = (\sum v_i^2)^{1/2} = [(-0.0444)^2 + (-0.0464)^2 + (-0.0905)^2 + (0.3033)^2]^{1/2}$$

$$V = 0.07967632$$

$$=0.2823$$

7.- Los coeficientes de verdor son:

$$A_{2i} = U_i \div V$$

$$=-0.0444/0.2823, -0.0464/0.2823, -0.0905/0.2823, 0.3033/0.2823$$

$$= -0.1573, -0.1644, -0.3206, 1.0744$$

Con los anteriores coeficientes formamos la ecuación del Verdor:

$$VER = (-0.1573X_1) + (-0.1644X_2) + (-0.3206X_3) + (1.0744X_4)$$

8.- Cálculos para obtener la fórmula del PVI

Solo trabajamos con las bandas 3 y 4 (rojo e IR)

	Rojo (X ₃)	IR (X ₄)
Suelo blanco	0.2548	0.3178
Suelo oscuro	0.0857	0.1898
40% Veg/SB	0.1125	0.1734
40% Veg/SO	0.0735	0.1356
100% Vegetación	0.0319	0.5208

$b_1 = \text{suelo blanco-suelo oscuro}$

$$b_1 = 0.2548 - 0.0857$$

$$= 0.1691$$

$$b_2 = 0.3178 - 0.1898$$

$$= 0.128$$

$$B = [(0.1691)^2 + (0.128)^2]^{1/2}$$

$$= 0.2121$$

$$A_{11} = b_1 / B$$

$$A_{11} = b_1 / B = 0.1691 / 0.2121$$

$$= 0.7973$$

$$A_{14} = b_4 / B = 0.128 / 0.2121$$

$$= 0.6035$$

$$BR = 0.7973X_3 + 0.6035X_4$$

$$D_{21} = \sum (Xg - Xs) \cdot A_{1i}$$

$$= (0.0319 - 0.2548)(0.7973) + (0.5208 - 0.3178)(0.6035)$$

$$= -0.0552$$

$$g_1 = (Xg - Xs) - D_{21}A_{1i}$$

$$g_3 = (0.0319 - 0.2548) - (-0.0552)(0.7973)$$

$$= -0.1789$$

$$g_4 = (0.5208 - 0.3178) - (-0.0552)(0.6035)$$

$$= 0.2363$$

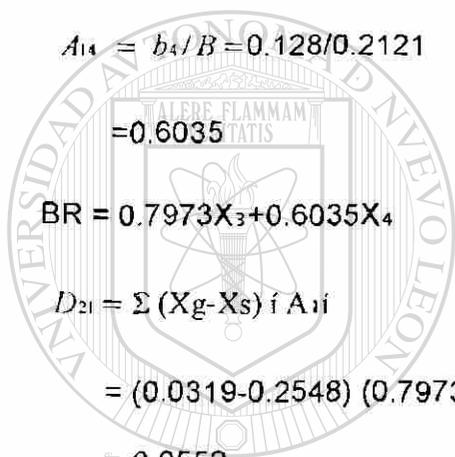
$$G = (\sum g_i^2)^{1/2}$$

$$[(-0.1789)^2 + (0.2363)^2]^{1/2}$$

$$= 0.1543$$

$$i_1 = g_3 / G$$

$$= -0.1789 / 0.1543$$



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

$$= -1.1594$$

$$A_2 = g_1/G$$

$$= 0.2363/0.1543$$

$$= 1.5314$$

$$GR = -1.1594 X_3 + 1.5314 X_4$$

$$= 0.1913$$

Por lo tanto nuestra fórmula final de PVI es la siguiente:

$$PVI = -1.1594 X_3 + 1.5314 X_4 - 0.1913$$

9.- Fórmula para calcular RVI

$$RVI = IR/rojo$$

10.- Fórmula para calcular NDVI

$$NDVI = (IR-rojo)/(IR + rojo)$$

11.- Fórmula para calcular SAVI

$$SAVI = (IR-rojo)/(IR+rojo+0.5)1.5$$

12. RESULTADOS DE LAS VARIABLES Y DE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN DEL CULTIVO DE LA ALFALFA

Superficie	BR	VER	PVI	RVI	NDVI	SAVI
Suelo B	0.5536	0.1666	0.0000	1.2473	0.1100	0.0881
Suelo O	0.1283	0.1668	0.0000	2.2147	0.3779	0.2014
40% Veg SB	0.4361	0.3181	0.2225	2.3301	0.3994	0.3225
40% Veg/SO	0.1315	0.1765	0.0394	4.0658	0.6052	0.2933
100% Veg	0.2204	0.5362	0.5613	16.3260	0.8846	0.6966

APÉNDICE 5

CÁLCULOS PARA DETERMINAR LA BRILLANTES, VERDOR Y LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN: PVI, RVI, NDVI Y SAVI DE LA AVENA.

Reflectancias de la avena				
	Azul (X1)	Verde (X2)	Rojo (X3)	IR (X4)
Suelo blanco	0.2532	0.3243	0.2548	0.3178
Suelo oscuro	0.025	0.0348	0.0857	0.1898
40% Veg/SB	0.1594	0.1823	0.2009	0.3434
40% Veg/SO	0.0289	0.0486	0.0468	0.2151
100%Vegetación	0.0227	0.0457	0.0260	0.5023

$$b_i = (X_{sb} - X_{so})$$

$$b_1 = 0.2282; \quad b_2 = 0.2895; \quad b_3 = 0.1691; \quad b_4 = 0.128$$

$$b_i^2 = 0.0521 \quad 0.0838 \quad 0.0286 \quad 0.0164$$

1.- Factor de normalización de Brillantez.

$$B = (\sum b_i)^{-2}$$

$$= 0.1809$$

$$= 0.4253$$

2.- Coeficientes de Brillantez, vector de la línea de suelo:

$$A_{1i} = b_i / B$$

$$A_{11} = 0.5366$$

$$A_{12} = 0.6807$$

$$A_{13} = 0.3976$$

$$A_{14} = 0.3010$$

Con los anteriores coeficientes de brillantez obtenemos la fórmula.

$$BR = 0.5366 X_1 + 0.6807 X_2 + 0.3976 X_3 + 0.301 X_4$$

Debido a que existe una posibilidad infinita de vectores ortogonales con respecto a la línea del suelo, es necesario un píxel para calcular el vector del Verdor.

3.- Considerar la diferencia entre los puntos de verdor y el suelo blanco $(X_v - X_{sb})$.

$$X_v - X_{sb} = -0.2305, -0.2786, -0.2288, 0.1845$$

4.- Calcule el producto del vector de verdor $(X_v - X_{sb})$ y el vector de la línea del suelo A_{1i} . Este procedimiento es conocido como la ortogonalización de Gram-Schmidt y asegura que un vector sea ortogonal a la línea del suelo.

$$\begin{aligned} D_{2i} &= \sum (X_v - X_{sb}) A_{1i} \\ &= (-0.2305)(0.5366) + (-0.2786)(0.6807) + (-0.2288)(0.3976) + (0.1845)(0.301) \\ &= -0.3488 \end{aligned}$$

5.- Encontrar el vector del verdor U_i

$$D_{2i} A_{1i} = (-0.3488)(0.5366), (-0.3488)(0.6807), (-0.3488)(0.3976), (-0.3488)(0.301)$$

$$= (-0.1872, -0.2374, -0.1387, -0.1050)$$

$$U_i = (X_v - X_{sb}) - D_{2i} A_{1i}$$

$$= (-0.2305) - (-0.1872), (-0.2786) - (-0.2374), (-0.2288) - (-0.1387), (0.1845) - (-0.1050)$$

$$= -0.0433; \quad -0.0412, \quad -0.0901 \quad 0.2895$$

6.- Normalizando

$$V = (\sum v_i^2)^{1/2} = [(-0.0433)^2 + (-0.0412)^2 + (-0.0901)^2 + (0.2895)^2]^{1/2}$$

$$V = 0.07211991$$

$$=0.2686$$

7.- Los coeficientes de verdor son:

$$A_{2t} = U_i \div V$$

$$=-0.0433/0.2686; -0.0412/0.2686; -0.0901/0.2686; 0.2895/0.2686$$

$$=-0.1612; -0.1534; -0.3354; 1.0778$$

Con los anteriores coeficientes formamos la ecuación del Verdor:

$$VER = (-0.1612 X_1) + (-0.1534 X_2) + (-0.3354 X_3) + (1.0778 X_4)$$

8.- Cálculos para obtener la fórmula del PVI

Solo trabajamos con las bandas 3 y 4 (rojo e IR)

	Rojo (X ₃)	IR (X ₄)
Suelo blanco	0.2548	0.3178
Suelo oscuro	0.0857	0.1898
40% Veg/SB	0.2009	0.3434
40% Veg/SO	0.0468	0.2151
100% Vegetación	0.0260	0.5023

$h_1 = \text{suelo blanco-suelo oscuro}$

$$h_1 = 0.2548 - 0.0857$$

$$= 0.1691$$

$$h_2 = 0.3178 - 0.1898$$

$$= 0.128$$

$$B = [(0.1691)^2 + (0.128)^2]^{1/2}$$

$$=0.2121$$

$$A_{11} = b_1/B$$

$$A_{13} = b_3/B = 0.1691/0.2121$$

$$=0.7973$$

$$A_{14} = b_4/B = 0.128/0.2121$$

$$=0.6035$$

$$BR = 0.7973 X_3 + 0.6035 X_4$$

$$D_{21} = \sum (X_g - X_s)_i A_{1i}$$

$$= (0.0260 - 0.2548)(0.7973) + (0.5023 - 0.3178)(0.6035)$$

$$= -0.071$$

$$g_1 = (X_g - X_s)_1 - D_{21} A_{11}$$

$$g_1 = (0.0260 - 0.2548) - (-0.071)(0.7973)$$

$$= -0.1722$$

$$g_2 = (0.5023 - 0.3178) - (-0.071)(0.6035)$$

$$= 0.2373$$

$$G = (\sum g_i^2)^{1/2}$$

$$[(-0.1722)^2 + (0.2373)^2]^{1/2}$$

$$= 0.1484$$

$$A_{11} = g_1/G$$

$$= -0.1722/0.1484$$

$$= -1.1604$$

$$A_4 = g_4/G$$

$$= 0.2273/0.1484$$

$$= 1.5317$$

$$GR = -1.1604 X_3 + 1.5317 X_4$$

$$= 0.1911$$

Por lo tanto nuestra fórmula final de PVI es la siguiente:

$$PVI = -1.1604 X_3 + 1.5317 X_4 - 0.1911$$

9.- Fórmula para calcular RVI

$$RVI = IR/rojo$$

10.- Fórmula para calcular NDVI

$$NDVI = (IR-rojo)/(IR + rojo)$$

11.- Fórmula para calcular SAVI

$$SAVI = (IR-rojo)/(IR+rojo+0.5)1.5$$

12. RESULTADOS DE LAS VARIABLES Y DE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN DEL CULTIVO DE LA AVENA

Superficie	BR	VER	PVI	RVI	NDVI	SAVI
Suelo B	0.5536	0.1666	0.0000	1.2473	0.1100	0.0881
Suelo O	0.1283	0.1668	0.0000	2.2147	0.3779	0.2014
40% Veg SB	0.3929	0.2491	0.1018	1.7093	0.2618	0.2047
40% Veg SO	0.1319	0.2040	0.0841	4.5962	0.6426	0.3313
100% Veg	0.2048	0.5220	0.5481	19.3192	0.8471	0.6948

APÉNDICE 6

CÁLCULOS PARA DETERMINAR LA BRILLANTES, VERDOR Y LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN: PVI, RVI, NDVI Y SAVI DEL CÁRTAMO.

Reflectancias del Cártamo

	Azul (X1)	Verde (X2)	Rojo (X3)	IR (X4)
Suelo blanco	0.2532	0.3243	0.2548	0.3178
Suelo oscuro	0.025	0.0348	0.0857	0.1898
40% Veg/SB	0.1368	0.1955	0.1971	0.5296
40% Veg/SO	0.0604	0.0942	0.0891	0.3603
100%Vegetación	0.0213	0.0373	0.0225	0.4706

$$b_i = (X_{sb} - X_{so})$$

$$b_1 = 0.2282;$$

$$b_2 = 0.2895;$$

$$b_3 = 0.1691;$$

$$b_4 = 0.128$$

$$h_i^2 = 0.0521$$

$$0.0838$$

$$0.0286$$

$$0.0164$$

1.- Factor de normalización de Brillantez:

$$B = (\sum b_i)^{-1/2}$$

$$= 0.1809$$

$$= 0.4253$$

2.- Coeficientes de Brillantez, vector de la línea de suelo:

$$A_{11} = b_1/B$$

$$A_{11} = 0.5366$$

$$A_{12} = 0.6807$$

$$A_{13} = 0.3976$$

$$A_{14} = 0.3010$$

Con los anteriores coeficientes de brillantez obtenemos la fórmula:

$$BR = 0.5366 X_1 + 0.6807 X_2 + 0.3976 X_3 + 0.301 X_4$$

Debido a que existe una posibilidad infinita de vectores ortogonales con respecto a la línea del suelo, es necesario un píxel para calcular el vector del *Verdor*.

3.- Considerar la diferencia entre los puntos de verdor y el suelo

blanco ($X_v - X_{sb}$).

$$X_v - X_{sb} = (-0.2319; \quad -0.287; \quad -0.2323; \quad 0.1528)$$

4.- Calcule el producto del vector de verdor ($X_v - X_{sb}$) y el vector de la línea del suelo A_{1l} . Este procedimiento es conocido como la ortogonalización de Gram-Schmidt y asegura que un vector sea ortogonal a la línea del suelo.

$$D_{21} = \sum (X_v - X_{sb}) A_{1l}$$

$$= (-0.2319)(0.5366) + (-0.287)(0.6807) + (-0.2323)(0.3976) + (0.1528)(0.301)$$

$$= -0.3662$$

5.- Encontrar el vector del verdor U_i

$$D_{21} A_{1l} = (-0.3662)(0.5366), (-0.3662)(0.6807), (-0.3662)(0.3976),$$

$$(-0.3662)(0.301)$$

$$= (-0.1965; \quad -0.2493; \quad -0.1456; \quad -0.1102)$$

$$U_i = (X_v - X_{sb}) - D_{21} A_{1l}$$

$$= (-0.2319) - (-0.1965), (-0.287) - (-0.2493), (-0.2323) - (-0.1456), (0.1528) - (-0.1102)$$

$$= -0.0354; \quad -0.0377; \quad -0.0867, \quad 0.263$$

6 - Normalizando

$$V = (\sum v_i^2)^{1/2}$$

$$= [(-0.0354)^2 + (-0.0377)^2 + (-0.0867)^2 + (0.263)^2]^{1/2}$$

$$V = 0.05897766$$

$$-0.2429$$

7.- Los coeficientes de veredor son:

$$A_{2i} = U_i : V$$

$$= -0.0354/0.2429; -0.0377/0.2429; -0.0867/0.2429; 0.263/0.2429$$

$$= -0.1457; -0.1552; -0.3569; 1.0828$$

Con los anteriores coeficientes formamos la ecuación del Veredor:

$$VER = (-0.1457 X_1) + (-0.1552 X_2) + (-0.3569 X_3) + (1.0828 X_4)$$

8.- Cálculos para obtener la fórmula del PVI

Solo trabajamos con las bandas 3 y 4 (rojo e IR)

	Rojo (X ₃)	IR (X ₄)
Suelo blanco	0.2548	0.3178
Suelo oscuro	0.0857	0.1898
40% Veg/SB	0.1971	0.5296
40% Veg/SO	0.0891	0.3603
100% Vegetación	0.0225	0.4706

h_1 = suelo blanco-suelo oscuro

$$h_1 = 0.2548 - 0.0857$$

$$= 0.1691$$

$$h_2 = 0.3178 - 0.1898$$

$$= 0.128$$

$$B = [(0.1691)^2 + (0.128)^2]^{1/2}$$

$$= 0.2121$$

$$A_{1i} = b_i / B$$

$$A_{13} = b_3 / B = 0.1691 / 0.2121$$

$$= 0.7973$$

$$A_{14} = b_4 / B = 0.128 / 0.2121$$

$$= 0.6035$$

$$BR = 0.7973 X_3 + 0.6035 X_4$$

$$D_{2i} = \sum (X_{gi} - X_{s_i}) A_{1i}$$

$$= (0.0225 - 0.2548)(0.7973) + (0.4706 - 0.3178)(0.6035)$$

$$= -0.093$$

$$g_i = (X_{gi} - X_{s_i}) - D_{2i} A_{1i}$$

$$g_3 = (0.0225 - 0.2548) - (-0.093)(0.7973)$$

$$= -0.1582$$

$$g_4 = (0.4706 - 0.3178) - (-0.093)(0.6035)$$

$$= 0.209$$

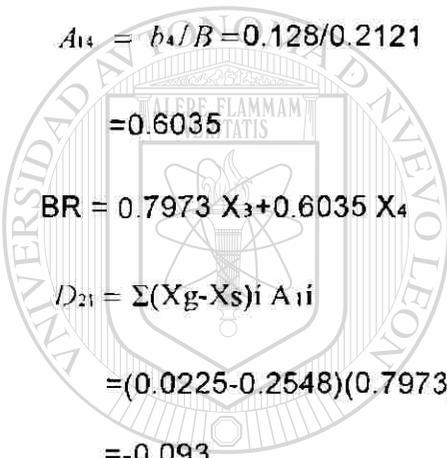
$$G = (\sum g_i^2)^{-1/2}$$

$$[(-0.1582)^2 + (0.209)^2]^{1/2}$$

$$= 0.1366$$

$$i = g_i / G$$

$$= -0.1582 / 0.1366$$



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCION GENERAL DE BIBLIOTECAS

$$= -1.1581$$

$$a_3 = g/G$$

$$= 0.209/0.1366$$

$$= 1.53$$

$$GR = -1.1581 X_3 + 1.53 X_4$$

$$= 0.1912$$

Por lo tanto nuestra fórmula final de PVI es la siguiente:

$$PVI = -1.1581 X_3 + 1.53 X_4 - 0.1912$$

9.- Fórmula para calcular RVI

$$RVI = IR/rojo$$

10.- Fórmula para calcular NDVI

$$NDVI = (IR-rojo) / (IR+rojo)$$

11.- Fórmula para calcular SAVI

$$SAVI = (IR-rojo) / ((IR+rojo+0.5)1.5)$$

12 RESULTADOS DE LAS VARIABLES Y DE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN DEL CULTIVO DEL CÁRTAMO

Superficie	BR	VER	PVI	RVI	NDVI	SAVI
Suelo B	0.5536	0.1666	0.0000	1.2473	0.1100	0.0881
Suelo O	0.1283	0.1668	0.0000	2.2147	0.3779	0.2014
40% Veg SB	0.4443	0.4528	0.3979	2.687	0.4575	0.4066
40% Veg SO	0.2404	0.3349	0.2569	4.0438	0.6035	0.4285
100% Veg	0.1874	0.4926	0.5028	20.9156	0.9087	0.6768

