



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**  
INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN  
CIENCIAS AGRÍCOLAS

**CAMPUS MONTECILLO**  
POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

**ALCANCES Y LIMITACIONES DE LA INFORMACIÓN  
ESPECTRAL MULTI-ANGULAR PARA LA  
CLASIFICACIÓN DE LA VEGETACIÓN.**

**ALEJANDRO DE JESÚS CANO GONZÁLEZ**

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE

**DOCTOR EN CIENCIAS**

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

MAYO 2008

La presente tesis, titulada: “**Alcances y limitaciones de la información espectral multi-angular para la clasificación de la vegetación**”, realizada por el alumno: “**Alejandro de Jesús Cano González**”, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS

HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



Dr. Enrique Mejía Sáenz

DIRECTOR DE TESIS:



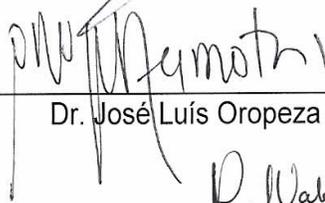
Dr. Fernando Paz Pellat

ASESOR:



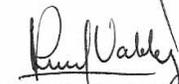
Dr. Enrique Palacios Vélez

ASESOR:



Dr. José Luis Oropeza Mota

ASESOR:



Dr. René Valdez Lazalde

Montecillo, Texcoco, México, 28 de mayo de 2008

## **ALCANCES Y LIMITACIONES DE LA INFORMACIÓN ESPECTRAL MULTI-ANGULAR PARA LA CLASIFICACIÓN DE LA VEGETACIÓN.**

**Alejandro de Jesús Cano González, Dr.**

**Colegio de Postgraduados, 2008**

El uso de información espectral multi-angular se ha justificado como una estrategia para aumentar la precisión de los sistemas de clasificación de cultivos y vegetación natural. En este trabajo se discuten los esquemas de caracterización de la información espectral multi-angular asociada a la vegetación, así como su uso en los sistemas de clasificación. Los resultados mostraron que, dejando fijo el fondo de la vegetación, es posible discriminar sistemas arbolados y, cuando el fondo de la vegetación varía, existe confusión con coberturas aéreas bajas. Por lo tanto, se planteo un segundo experimento, presentando un modelo de los efectos del ángulo cenital de visión e iluminación en las reflectancias bi-cónicas (Conical-Conical Reflectance Factor, CCRF) de especies vegetales contrastantes y suelo desnudo. Los resultados analizados para el efecto del suelo y la densidad de plantas muestran que hay importantes zonas de confusión (traslape de información) entre las especies, al considerar efectos combinados, para diversas diferencias acimutales. Estos resultados ponen en duda el uso en forma generalizada de la información espectral multi-angular y solo justifican este enfoque de clasificación si se dejan fijos el fondo de la vegetación y la densidad de plantas (cantidad de follaje), situación irreal en un sistema operacional. Debido a esto se presentó un esquema de modelación global de los ángulos cenitales y acimutales en la reflectancia de la vegetación, extendiendo los desarrollos al caso de los efectos de cambios en las propiedades ópticas del fondo de la vegetación (suelos) y de la densidad de plantas (follaje), ratificándose el problema de confusión en la discriminación de especies. Para poder concluir de manera definitiva sobre el uso de la información multi-angular, se recomienda realizar otro tipo de modelaciones, relacionando los parámetros B y las reflectancias a nadir y el efecto multi-angular en las curvas iso-IAF.

**Palabras clave:** Clasificación, información espectral muti-angular, sensores remotos, CCRF.

**SPCOPES AND RESTRICTIONS OF MULTI-ANGLE SPECTRAL INFORMATION  
FOR VEGETATION CLASSIFICATION.**

**Alejandro de Jesús Cano González, Dr.**

**Colegio de Postgraduados, 2008**

The use of multi-angular spectral information has been justified like a strategy to increase the precision of vegetation classification systems. In this work the schemes of characterization of the multi-angular spectral information associated to the vegetation, as well as its use in the classification systems are discussed. The results showed that leaving the bottom of the vegetation unchanging, it is possible to discriminate tree systems and, when the bottom of the vegetation varies, exist confusion with low aerial covers. Therefore, a second experiment was considered to analyze the discrimination of the vegetation under different approaches of characterization, being presented a model of the effects of the zenithal angle of vision and illumination in biconical reflectances (Conical-Conical Reflectance Factor, CCRF) of contrast vegetal species and bare soil. The results analyzed for the effect of the ground and the density of plants show that there are important zones of confusion (overlaps of information) between the species, when considering combined effects, for diverse azimuth differences. These results put in doubt the use in a generalized form of the multi-angular spectral information and only justify its use if the bottom of the vegetation and the density of plants (amount of foliage) are left unchanging, unreal situation in an operational system. Due to this a scheme of global modeling of the zenith and azimuth angles in the reflectance of the vegetation appeared, extending the developments to the case of changes in the optical properties of the bottom of the vegetation (grounds) and the density of plants (foliage), ratifying the problem of confusion in the discrimination of species. In order to be able to conclude in a definitive way on the use of the multi-angular information, it is recommended to make another type of modeling, relating B parameters and nadir reflectance's and the multi-angular effect in the iso-IAF curves.

**Key words:** Classification, multi angular spectral information, remote sensing, CCRF.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico brindado durante los estudios de doctorado en el Colegio de Postgraduados, sin el cual no hubiera sido posible la realización de los mismos.

Al Colegio de Postgraduados, por la enorme oportunidad de formarme como Doctor en ciencias, en una institución tan reconocida como ésta.

Al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT) por el apoyo económico brindado para la culminación de la investigación mediante su programa de beca tesis.

Al Dr. Fernando Paz Pellat, por la confianza brindada, por el apoyo incondicional y por motivarme a ser mejor profesionista mediante la magnitud de los retos impuestos en los proyectos de investigación.

Al Dr. Enrique Mejía Sáenz, por el apoyo brindado durante la estancia en el Programa de Hidrociencias a través de su gestión.

Al Dr. José Luís Oropeza Mota, por la confianza depositada en mi para la realización del proyecto y por las facilidades otorgadas durante la fase experimental en el simulador de lluvia.

Al Dr. Enrique Palacios Vélez, por ser un excelente académico y por sus observaciones para el enriquecimiento de este trabajo.

Al Dr. René Valdez Lazalde, por el apoyo brindado durante las diversas revisiones del trabajo, por sus consejos y discusiones para la mejora del mismo.

Al M.C. José Donaldo Ríos Berber, por la confianza y apoyo durante la fase experimental de este trabajo, y por las observaciones hechas durante el experimento.

A la M.C. Isabel Marín y al Ing. Eliézer, por el apoyo brindado para culminar con el experimento, aún y cuando fui un jefe negro.

A las personas que apoyaron durante las mediciones experimentales: M.C. José Chávez, M.C. Enrique Romero e Ing. Marcos Casiano, cuya colaboración fue fundamental para concluir el experimento.

Al Dr. Alfonso Zarco, por sus colaboraciones durante el diseño e implementación del SIGO.

A todo el equipo de GRENASER, Dr. Martín Bolaños, M.C. Fermín Pascual, MC. Nahielli, M.C. Magali, y Paty Ibarra por acompañarme y apoyarme durante esta travesía en las malas y en las buenas.

A la congregación de Yucatecos, comandada por M.C. Alvaro Can y sub-comandada por Ing. Ismael Tucuch Hass, quienes además de su amistad me brindaron hospedaje en estos últimos meses.

A todo el personal de Hidrociencias quienes siempre procuraron ayudarme en lo necesario.

## RECONOCIMIENTOS

La realización del presente trabajo de investigación fue mediante el financiamiento parcial de los siguientes proyectos:

- La primera campaña de mediciones fue realizada mediante el financiamiento parcial del proyecto: “Catalogo de Firmas Espectrales de Especies Forestales Maderables en México”, CONAFOR-2004-CO4-43, planteado en función de los términos de referencia de la Convocatoria CONAFOR-CONACYT del año 2004.
- La segunda campaña de mediciones fue realizada mediante el financiamiento parcial del proyecto: “Desarrollo de un sistema de clasificación de la vegetación natural y estimación de la capacidad de carga usando sensores remotos”, CONTRATO NO. ADJ-DCTA-C-VEG-033-2007 con AGROASEMEX, S.A. de C.V.

## DEDICATORIA

A Nelda, mi esposa, sin la cual esta aventura de siete años en Texcoco no sería lo mismo dada la gran cantidad de cosas que nos ha tocado experimentar, como el nacimiento de nuestra hija Alejandra, quien sin duda iluminó nuestros rumbos. SIEMPRE TE AMARE.

A mi hermosísima hija Alejandra, estímulo principal de mi existencia desde el día que nació.

A mis padres, Bernardo y Conchita, que siempre me han alentado a seguir adelante sin importar los obstáculos que haya que vencer.

A mi hermano Bernardo, quien en la manera que ha podido me ha apoyado en este largo peregrinar.

A mis suegros Nelda y Joaquín quienes siempre han puesto de su parte para facilitar la culminación de esta meta.

A mis cuñados Joaquín, Lázaro y Regina, quienes siempre me han apoyado en lo necesario para llegar al fin de este camino.

A las inigualables amistades de: Arturo Carrillo e Ileana Siller, Faustino y Sonia, Naima, Arturo Transito, Agustín, Marlene y a Juan Cetina.

**CONTENIDO**

**CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL..... 1**

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA ..... 3

DESCRIPCIÓN DE CAPÍTULOS DE LA TESIS ..... 4

OBJETIVO GENERAL ..... 5

HIPÓTESIS GENERAL..... 5

REVISIÓN DE LITERATURA..... 5

*Clasificación de la vegetación* ..... 5

*Bases de datos de vegetación en México* ..... 8

*Clasificación de la vegetación mediante sensores remotos* ..... 9

*Enfoque Bostoniano* ..... 10

*Enfoque de Nemani y Running*..... 11

*Información satelital angular* ..... 13

LITERATURA CITADA..... 15

**CAPÍTULO II. SOBRE LA CLASIFICACIÓN DE SISTEMAS ARBOLADOS  
USANDO INFORMACIÓN ESPECTRAL MULTI-ANGULAR..... 19**

RESUMEN..... 19

INTRODUCCIÓN..... 19

INFORMACIÓN ESPECTRAL MULTI-ANGULAR ..... 21

*Modelos de la BRDF* ..... 21

*Clasificación de la vegetación con información espectral multi-angular*..... 22

EXPERIMENTOS CON SISTEMAS ARBOLADOS..... 23

*Modelo de la BRDF usado* ..... 25

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS..... 26

CONCLUSIONES ..... 32

LITERATURA CITADA..... 33

**CAPÍTULO III. FACTOR DE LA REFLECTANCIA BI-CÓNICA EN ESPECIES  
VEGETALES CONTRASTANTES: MODELACIÓN DE LOS ÁNGULOS  
CENTALES ..... 38**

---

RESUMEN.....	38
INTRODUCCIÓN.....	38
<i>Modelos espectrales multi-angulares</i> .....	41
<i>Modelación del ángulo cenital de iluminación y visión</i> .....	42
EXPERIMENTOS BAJO CONDICIONES CONTROLADAS DE LABORATORIO..	44
<i>Patrones angulares de la CCRF de los experimentos</i> .....	50
CONCLUSIONES .....	59
<b>LITERATURA CITADA.....</b>	<b>60</b>
<b>CAPÍTULO IV. FACTOR DE LA REFLECTANCIA BI-CÓNICA EN ESPECIES</b>	
<b>VEGETALES CONTRASTANTES: MODELACIÓN GLOBAL .....</b>	<b>66</b>
RESUMEN.....	66
INTRODUCCIÓN.....	66
MODELACIÓN GLOBAL DEL SISTEMA SUELO-VEGETACIÓN .....	68
<i>Modelación del ángulo cenital de iluminación y visión</i> .....	69
<i>Modelación de la diferencia angular acimutal</i> .....	70
EXPERIMENTOS BAJO CONDICIONES CONTROLADAS DE LABORATORIO..	73
<i>Ajuste de los modelos de ángulos cenitales y acimutales</i> .....	79
<i>Ajuste de los modelos del efecto del suelo y del follaje</i> .....	83
<i>Modelo global ajustado y discriminación de especies</i> .....	84
CONCLUSIONES .....	86
LITERATURA CITADA.....	86
<b>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES .....</b>	<b>91</b>
CONCLUSIONES .....	91
RECOMENDACIONES.....	93
<b>ANEXO A EXPERIMENTO: SISTEMAS ARBOLADOS.....</b>	<b>94</b>
A-1. INTRODUCCIÓN.....	94
A-2. EXPERIMENTOS CONTROLADOS.....	94
<i>Especies forestales medidas</i> .....	94
<i>Estructura de medición</i> .....	98

---

---

<i>Instrumentos de medición</i> .....	98
<i>Área de medición</i> .....	99
<i>Densidades utilizadas</i> .....	102
<i>Procedimiento de medición</i> .....	104
<b>A-3. DESCRIPCIÓN DE INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN</b> .....	<b>105</b>
<i>Radiómetro hiperspectral ASD</i> .....	105
<i>Colección de luz</i> .....	106
<i>Optimización</i> .....	106
<i>Corriente oscura (DC)</i> .....	107
<i>Promedio de espectros y ruido</i> .....	107
<i>Radiómetro multi –espectral (Cropscan)</i> .....	107
<i>Radiómetro multiespectral</i> .....	108
Teclado (ct 100) .....	109
<i>Datalogger</i> .....	109
<i>Especificaciones</i> .....	110
<i>Termómetro de infrarojo</i> .....	110
<i>Especificaciones</i> .....	111
<i>Camara digital</i> .....	111
<i>Ceptómetro (ACCUPAR)</i> .....	112
<i>Especificaciones</i> .....	113
<i>Operación</i> .....	113
<b>ANEXO B. EXPERIMENTO: SISTEMA GONIOMÉTRICO (SIGO-CP) EN LABORATORIO</b> .....	<b>114</b>
B-1. INTRODUCCIÓN .....	114
B-2. ESPECIES FORESTALES MEDIDAS Y SUS MEZCLAS .....	114
<i>Densidades utilizadas</i> .....	119
<i>Suelos usados como fondo</i> .....	121
B-3. SISTEMA GONIOMÉTRICO (SIGO) .....	121
<i>Simulador de lluvia</i> .....	122
<i>Cuarto oscuro</i> .....	123

---

---



---

<i>Iluminación</i> .....	124
<i>Goniómetro</i> .....	125
<i>Bases y cajón para las plantas</i> .....	130
<b>B-4. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN</b> .....	135
<i>Radiómetro</i> .....	135
<i>Termómetro</i> .....	136
<i>Cámara</i> .....	137
<b>B-5. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO</b> .....	138
<i>Procedimientos adicionales</i> .....	143
<b>B-6. RECOMENDACIONES</b> .....	148
<b>B-7. DOCUMENTACIÓN DE ARCHIVOS DE REFLECTANCIA</b> .....	148
<b>B-8. LITERATURA CITADA</b> .....	149
<b>ANEXO C. GRÁFICAS DIRECCIONALES DE REFLECTANCIA</b> .....	150
<b>ANEXO D. GRAFICAS POLARES DEL PARAMETRO B</b> .....	207

**LISTA DE CUADROS**

Cuadro 2-1. Características de las especies forestales del experimento ..... 23

Cuadro 2-2. Características de las bandas espectrales usadas..... 25

Cuadro 3-1. Características de las especies forestales usadas en el experimento.... 44

Cuadro 3-2. Configuraciones geométricas asociadas a los ángulos cenitales de  
visión ..... 47

Cuadro 3-3. Codificación de los archivos del experimento..... 50

Cuadro 3-4. Coberturas aéreas asociadas a las densidades de plantas ..... 51

Cuadro 4-1. Características de las especies vegetales usadas en el experimento... 74

Cuadro 4-2. Codificación de los archivos del experimento..... 78

Cuadro 4-3. Coberturas aéreas asociadas a las densidades de plantas ..... 79

Cuadro A-1. Características de las especies forestales medidas..... 95

Cuadro A-2. Características de los instrumentos de medición utilizados ..... 99

Cuadro B-1. Especies utilizadas en el experimento ..... 115

Cuadro B-2. Mezclas analizadas en el experimento ..... 119

Cuadro B-3. Textura de los suelos utilizados como fondo ..... 121

Cuadro B-4. Dimensiones de las elipses formadas ..... 129

Cuadro B-5. Porcentajes de coberturas del área de observación a nadir. .... 144

Cuadro B-6. Porcentajes de coberturas de las áreas de observación elípticas..... 144

Cuadro B-7. Anchos de banda que fueron eliminados de la firma espectral de cada  
especie y mezcla medida ..... 148

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 2-1. Configuraciones geométricas de los experimentos, donde cada cuadro sombreado representa la posición de un arbolito y los cuadros con sombreado más claro del perímetro no son usados. El círculo en la figura corresponde al área de medición..... 24

Figura 2-2. Ajuste del modelo de la BRDF para el fresno. .... 26

Figura 2-3. Ajuste del modelo de la BRDF para el suelo desnudo claro. .... 27

Figura 2-4. Ajuste del modelo entre las pendientes b para varios ángulos cenitales solares..... 28

Figura 2-5. Relación entre la pendiente B y COB para suelo claro. .... 28

Figura 2-6. Relación entre la pendiente B y COB para suelo oscuro. .... 29

Figura 2-7. Efecto del suelo en la diferenciación de fresno y pino montezumae..... 30

Figura 2-8. Efecto del suelo en la diferenciación de encino y pino greggii. .... 30

Figura 2-9. Espacio del R-IRC para las especies arbóreas analizadas..... 31

Figura 2-10. Espacio del Rn-IRCN para las especies arbóreas analizadas..... 32

Figura 3-1. Geometría sol-sensor de iluminación y visión..... 43

Figura 3-2. Densidades usadas: a) alta (49 plantas), b) media (25 plantas) y c) baja (12 plantas). Cada círculo relleno representa la posición de una planta y los cuadros perimetrales rellenos sólo contienen suelo. El círculo mostrado al centro de los cuadros es el área de visión del sensor hiperespectral con un ángulo de visión a nadir. .... 45

Figura 3-3. Geometría de medición del radiómetro montado en el arco cenital de SIGO-CP. .... 47

Figura 3-4. CCRF para las reflectancias de las bandas del R e IRC para diferentes propiedades ópticas del suelo de la especie Casuarina..... 53

Figura 3-5. CCRF para las reflectancias del R para un suelo claro seco y mojado, para diferentes cobertura aéreas (densidad de plantas) para el pasto Navajita. .... 54

Figura 3-6. CCRF para las reflectancias del R para un suelo claro seco para todas las especies analizadas, dentro de una cobertura aérea del 18 al 28 %..... 55

---

Figura 3-7. Ajuste del modelo multi-angular para los efectos de los ángulos cenitales de visión e iluminación para todas las especies analizadas, incluyendo los suelos..	57
Figura 3-8. Gráficos polares para el parámetro $b$ del rojo para el caso Encino-Pino. .....	58
Figura 3-9. Gráfico acimutal de $b$ para la reflectancia de la banda del R, para las especies contrastantes encino-pino y palo dulce-navajita. Las flechas punteadas verticales corresponden al área de traslape entre especies. ....	59
Figura 4-1. Espacio espectral IRC-R para las simulaciones del cultivo maíz.....	71
Figura 4-2. Patrón entre los patrones $a_{0,IAF}$ y $b_{0,IAF}$ de las curvas iso-IAF .....	73
Figura 4-3. Densidades usadas: a) alta (49 plantas), b) media (25 plantas) y c) baja (12 plantas). Cada círculo relleno representa la posición de una planta y los cuadros perimetrales rellenos sólo contienen suelo. El círculo mostrado al centro de los cuadros es el área de visión del sensor hiperespectral con un ángulo de visión a nadir. ....	75
Figura 4-4. Áreas de visión del SIGO-CP a nadir: a) $\theta_v$ de $0^\circ$ a $30^\circ$ y b) $\theta_v$ de $30^\circ$ a $60^\circ$ (escala en cm) .....	76
Figura 4-5. Ajuste del modelo de los ángulos cenitales para las bandas del V, R e IRC.....	80
Figura 4-6. Diagramas acimutales de las bandas del R e IRC para un suelo claro seco y húmedo, con cobertura aérea a nadir mayor del 61 %. ....	81
Figura 4-7. Diagramas acimutales de las bandas del R e IRC para un suelo claro seco y húmedo, con cobertura aérea a nadir entre el 45 y 55 %. ....	81
Figura 4-8 Diagramas acimutales de las bandas del R e IRC para un suelo claro seco y húmedo, con cobertura aérea a nadir entre el 18 y 28 %.....	82
Figura 4-9. Peor ajuste del modelo de las diferencias acimutales para todas las especies y suelos. ....	83
Figura 4-10. Patrones multi-angulares de los espacios B del R-B del IRC y $\alpha$ - $\beta$ para la especie 2. ....	83
Figura 4-11. Patrones multi-angulares de los espacios B del V-B del R y $\alpha$ - $\beta$ para la especie 2. ....	84
Figura 4-12. Espacio supra-paramétrico AA-BB para las bandas del R e IRC.....	85

---

---

Figura 4-13. Espacio supra-paramétrico AA-BB para las bandas del V y R.....	85
Figura A-1. Oyamel ( <i>Abies religiosa</i> ).....	95
Figura A-2. Fresno ( <i>Fraxinus uhdei</i> ).....	96
Figura A-3. Encino ( <i>Quercus rugosa</i> ).....	96
Figura A-4. Pino Greggii ( <i>Pinus greggii</i> ).....	97
Figura A-5. Pino montezumae ( <i>Pinus montezumae</i> ).....	97
Figura A-6. Estructura de medición BRDF. ....	98
Figura A-7. Instrumentos de medición sobre la estructura metálica.....	99
Figura A-8. Procedimiento de armado de la plataforma de medición.....	100
Figura A-9. Plataforma de medición, visión nadir (suelo claro). ....	101
Figura A-10. Plataforma de medición, visión nadir (suelo oscuro). ....	101
Figura A-11. Plataforma y área de medición .....	102
Figura A-12. Densidad 1: tres bolillo 10x10cm .....	103
Figura A-13. Densidad 2: Marco real 20x20cm .....	103
Figura A-14. Densidad 3: Marco real 30x30cm .....	104
Figura A-15. Radiómetro hiperespectral ASD .....	106
Figura A-16. Radiómetro multiespectral Cropscan.....	108
Figura A-17. Bandas instaladas en el radiómetro multiespectral Cropscan .....	109
Figura A-18 Teclado para operar el Radiómetro multiespectral Cropscan.....	109
Figura A-19. Datalogger para almacenar información adquirida con el radiómetro multiespectral Cropscan.....	110
Figura A-20. Termómetro de Infrarrojo.....	111
Figura A-21. Calculo del porcentaje de cobertura de suelo y vegetación (Figura b) a partir de una imagen digital (Figura a).....	112
Figura A-22 Ceptómetro .....	113
Figura B-1. Oyamel ( <i>Abies religiosa</i> ).....	115
Figura B-2. Mimosa ( <i>Acacia retinodes</i> ). ....	116
Figura B-3. Casuarina ( <i>Casuarina equisetifolia</i> ).....	116
Figura B-4. Fresno ( <i>Fraxinus uhdei</i> ).....	117
Figura B-5. Encino ( <i>Quercus rugosa</i> ).....	117
Figura B-6. Pino Greggii ( <i>Pinus greggii</i> ).....	118

---

Figura B-7. Colecta y transporte de palo dulce ( <i>Eysenhardtia polystachya</i> ) .....	118
Figura B-8. Colecta de pasto navajita ( <i>Bouteloa gracilis</i> ).....	119
Figura B-9. Dimensiones de la estructura de medición. El círculo corresponde al ángulo de visión (nadir), la zona clara esta ocupada por plantas y suelo, y la zona oscura únicamente va cubierta por suelo.....	120
Figura B-10. Mediciones biofísicas de las plantas.....	120
Figura B-11. Densidades: a) Alta, b) Media, y c) Baja.....	121
Figura B-12. Contraste de los suelos utilizados: a) claro y b) oscuro.....	121
Figura B-13. Componentes de SIGO .....	122
Figura B-14. Laboratorio Simulador de Lluvias .....	123
Figura B-15. Aplicación de 8.3mm de lluvia al cajón .....	123
Figura B-16. Cortinas del área de medición: a) vista interna y b) vista externa .....	124
Figura B-17. a) Dimensiones del reflector, b) reflector con lámpara de halógeno, c) inclinación de la lámpara (38°) y d) base telescópica para la lámpara.....	124
Figura B-18. Lámpara de halógeno de cuarzo. ....	125
Figura B-19. Imagen de las partes del Goniómetro.....	126
Figura B-20. Esquema de las partes del Goniómetro.....	127
Figura B-21. Detalle del rodamiento para el desplazamiento del arco cenital.....	128
Figura B-22. Posición de los sensores por debajo del arco cenital. ....	128
Figura B-23. Sombra ocasionada por el diseño del goniómetro.....	129
Figura B-24. Esquema de las bases para transportación del cajón con planta al simulador.....	130
Figura B-25. Imagen de una de las bases colocada dentro del simulador de lluvia .....	131
Figura B-26. Esquema del cajón .....	131
Figura B-27. Vista en planta del cajón y la malla de fondo de 1 x 1cm entre hilos..	132
Figura B-28. Cajón con las maderas sostenidas por las barras de PTR de ½ pulgadas.....	132
Figura B-29. Mallas que permiten el arreglo de las plantas en el cajón .....	133
Figura B-30. Marco metálico para deslizar el cajón entre las bases .....	134
Figura B-31. Detalle del rodamiento tipo carretilla del marco metálico.....	134

Figura B-32. Traslado del cajón entre las bases .....	135
Figura B-33. Radiómetro hiperespectral ASD .....	136
Figura B-34. Sensor de temperatura Apogee ITRS.....	137
Figura B-35. Cámara digital Sony Cyber-shot DSC-V1 y otros sensores.....	137
Figura B-36. Vista en planta de la ubicación de la lámpara y del goniómetro con respecto al cajón .....	139
Figura B-37. Colocación del panel blanco de referencia para calibrar el ASD .....	140
Figura B-38. Armado del goniómetro .....	141
Figura B-39. Proceso de cernido del suelo .....	142
Figura D-1. SUELO .....	207
Figura D-2. Abies .....	208
Figura D-3. Acacia.....	210
Figura D-4. Casuarina .....	212
Figura D-5. Encino .....	214
Figura D-6. Fresno .....	216
Figura D-7. Matorral .....	218
Figura D-8. Pino Greggii.....	220
Figura D-9. Pastizal.....	222

## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL

La clasificación de la vegetación es un tema de importancia en todo el mundo. Cada país ha desarrollado su metodología general de mapeo terrestre de acuerdo a una combinación de rasgos ecológicos, principalmente el clima, la fisiografía, los materiales superficiales, la geología, el suelo y la vegetación. Siendo la vegetación el factor más importante, como indicador del resto de los rasgos.

En nuestro país existen infinidad de trabajos relacionados con clasificación de vegetación. Las clasificaciones se remontan hasta 1519-1526 en los documentos realizados por Cortés, el cual, en sus *Cartas de Relación* da a conocer al Viejo Mundo una nueva naturaleza (González, 2003). González Medrano (2003), en su documento “Comunidades Vegetales de México” realiza una excelente descripción, en orden cronológico, de cada una de los diferentes intentos de clasificar la vegetación en México. A pesar de este gran acervo de información, el primer trabajo que propuso un sistema de clasificación de los tipos de vegetación y una nomenclatura, fue el realizado por Miranda y Hernández en 1959 y publicado en 1963. Esta enorme brecha en la clasificación de la vegetación en México se debe, ente otras cosas, a la rica biodiversidad del país y a su compleja orografía.

El trabajo de Miranda y Hernández fue el detonador y base para trabajos como el realizado por la Comisión Técnico Consultiva de Coeficientes de Agostadero, COTECOCA, el cual inició en el Estado de Coahuila en 1968 y esta clasificación se basó en la separación de la vegetación en estratos climáticos y edáficos, subdividiéndolos por su potencial forrajero. Este es el único trabajo en su tipo, hasta la fecha.

En la actualidad, la información de cobertura vegetal y uso del suelo del país existe en diferentes escalas y sistemas de clasificación, en su mayoría basados en la propuesta de Miranda y Hernández (1963). Destacán las cartas de uso de suelo y vegetación a escala 1:50,000, de las cuales, sólo se cuenta con el 35 % del país; la cobertura nacional en escalas 1:250,000, 1:1'000,000 en dos series (INEGI, 1976 y 1993). Sin embargo, el trabajo más extenso e integrado del conocimiento de la vegetación en México, es el publicado en 1978 por Rzedowski, “Vegetación de

México” (González, 2003). En este documento, *Rzedowski*, menciona que “*La elaboración de una nueva clasificación de la vegetación de México no figura entre los objetivos inmediatos de quien escribe, y en su opinión más vale esperar para hacerlo hasta que nuevas y más profundas aportaciones permitan abordar el problema al nivel más apropiado y ofrecer así un cuadro realmente satisfactorio para todo tipo de usuario*”.

En este contexto, el presente trabajo se sustenta en lo dicho por *Rzedowski* (1978) y en la necesidad de contar con estudios sobre cambio en la cobertura y uso de suelo que proporcionen la base para conocer las tendencias de los procesos de deforestación, degradación, desertificación y pérdida de biodiversidad de una región determinada. Así, para lograr un estudio de la cobertura y uso de suelo, capaz de considerar los factores anteriores, es necesario considerar los avances tecnológicos, las propuestas de unificación de nomenclaturas y las necesidades de los usuarios para el desarrollo de un sistema de clasificación de la vegetación que sea actualizable periódicamente y a bajo costo; por lo que el presente trabajo se enfoca a la parte relacionada con los avances tecnológicos, ya que se considera el detonante primordial para el desarrollo de un sistema de clasificación de tales características. Lo anterior se soporta en el desarrollo cada vez mayor de metodologías de clasificación de la vegetación basadas en tecnología satelital, desarrollándose infinidad de técnicas como: análisis de clusters, evolución temporal, árboles de decisión y redes neuronales (*Loveland et al.*, 1995, *Nemani y Running*, 1997, *Lotsch et al.*, 2000).

La identificación y clasificación de la vegetación en tipos de cobertura o en ecosistemas, por medio de sensores remotos, es viable por al menos dos razones: Primero, los cambios de cobertura y uso de suelo inferidos de planos de vegetación no es la única evidencia directa del impacto del hombre y del clima en la tierra, si no además es una pieza clave para el estudio de los ciclos biogeoquímicos. Segundo, la mayoría de los modelos y algoritmos climáticos y biogeoquímicos que estiman variables biofísicas de datos satelitales utilizan mapas de vegetación para asignar parámetros clave que ayudarán a reducir el número de problemas desconocidos (*Zhang et al.*, 2002a).

No obstante el desarrollo de nuevas y mejores tecnologías satelitales y de computo, los resultados obtenidos hasta la fecha en la clasificación de vegetación no han sido del todo satisfactorios y generalmente se han concretado a la obtención de relaciones empíricas, válidas localmente y para condiciones específicas de adquisición, que requieren de su constante recalibración para poder ser aplicadas con fines prácticos y extensivos.

México no ha estado exento de la aplicación de los sensores remotos para la clasificación de la vegetación. Ejemplos de esto son los planos de uso de suelo y vegetación del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEGI) e inventarios forestales de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), pero dado que la metodología utilizada no difiere de los principales métodos mencionados anteriormente, la metodología no puede extrapolarse a todo el país.

Por lo tanto, para poder desarrollar una metodología que permita la clasificación de la vegetación basada en información satelital, y su relación con parámetros biofísicos, en lugar de aproximaciones estadísticas es necesario analizar los diferentes enfoques y herramientas que se presentan en la literatura, como es el caso de la información multi-angular.

Las superficies naturales y, en particular las cubiertas vegetales, no son difusores lambertianos, por lo que la reflectividad de las cubiertas vegetales se debe interpretar teniendo en cuenta su comportamiento difusor. Para ello se puede utilizar el factor bidireccional de la reflectancia, que caracteriza las propiedades difusoras de las superficies vegetales y, en consecuencia, muestra un comportamiento anisótropo según el tipo de vegetación.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Para desarrollar una metodología aplicable a un sistema de clasificación de la vegetación con sensores remotos se requiere utilizar datos fisionómicos y florísticos. Los últimos no son posibles de obtener con imágenes satelitales, incluso en los sistemas de clasificación terrestre este tipo de información demanda un gran nivel de preparación del personal así como de mucho tiempo; sin embargo, los datos

morfológicos, de fenología de la hoja y las características fisionómicas si pueden ser interpretados de los datos satelitales mediante la estimación del albedo foliar y de parámetros estructurales (cobertura, altura) a través de datos multi-angulares.

El uso de información espectral multi-angular se ha justificado como una estrategia para aumentar la precisión de los sistemas de clasificación de superficies cubiertas de vegetación, ya que los usados actualmente sólo utilizan datos espectrales, bajo un esquema de análisis multivariado o de árboles de decisión, pero dada la diversidad de enfoques e interpretaciones del tema y la falta de su análisis generalizado, en este trabajo se discuten los esquemas de caracterización de la información espectral multi-angular asociada a la vegetación, así como su uso en los sistemas de clasificación.

## **DESCRIPCIÓN DE CAPÍTULOS DE LA TESIS**

El presente documento, resultado de la investigación, se encuentra escrito en formato de manuscrito de artículos científicos. Cada capítulo corresponde a un tema específico de la investigación y está estructurado con su respectiva introducción, desarrollo del tema, conclusiones y referencias bibliográficas.

El capítulo I corresponde a la introducción general, se presenta una revisión de literatura general de los temas relacionados y los objetivos e hipótesis generales de la investigación.

En el capítulo II se trata lo referente a los sistemas de clasificación arbolados usando información espectral multi-angular. Se discuten los esquemas de caracterización de la información espectral multi-angular asociada a la vegetación, así como su uso en los sistemas de clasificación.

El capítulo III analiza el factor de la reflectancia bi-cónica en especies vegetales contrastantes mediante un modelo de los efectos de los ángulos cenitales de visión e iluminación en las reflectancias. El modelo valida en un conjunto de experimentos de especies contrastantes bajo condiciones de iluminación-visión bi-cónicas.

En el capítulo IV se trata la modelación global del factor de la reflectancia bi-cónica en especies vegetales contrastantes. Se presenta una modelación global de los ángulos cenitales y acimutales en la reflectancia de la vegetación, extendiendo

los desarrollos al caso de los efectos de cambios en las propiedades ópticas del fondo de la vegetación y de la densidad de plantas.

El capítulo V está conformado por las conclusiones y recomendaciones generales de la investigación.

Finalmente, también se anexan cuatro apéndices que soportan el trabajo de investigación de la siguiente forma: Anexo A) Metodología del experimento referente al capítulo II, anexo B) Metodología de la segunda fase experimental, bajo condiciones controladas e implementación de SIGO-CP, que sustenta los capítulos III y IV de la investigación, anexo C) Gráficas diferenciales de reflectancia resultantes del SIGO-CP y el anexo D) Gráficas polares de los valores del parámetro B.

### **OBJETIVO GENERAL**

Analizar los alcances y limitaciones de los datos espectrales multi-angulares para la clasificación de la vegetación.

### **HIPÓTESIS GENERAL**

El uso de datos espectrales multi-angulares en la clasificación de la vegetación contribuirá a una mejor diferenciación de la cobertura vegetal terrestre.

### **REVISIÓN DE LITERATURA**

#### **Clasificación de la vegetación**

Existen numerosas metodologías y sistemas de nomenclatura para clasificar y nombrar la vegetación existente en un área determinada. Como ejemplos a nivel nacional se tienen “Los Tipos de Vegetación de México y su Clasificación” de F. Miranda y E. Hernández Xolocotzin publicado en 1963. En 1971 aparece el “Mapa de Tipos de Vegetación de La República Mexicana” a escala 1:2'000,000 con una breve memoria descriptiva y que en general sigue el sistema de clasificación de Miranda y Hernández. En 1978, aparece la obra “Vegetación de México” de Jerzy Rzedowski que vino a presentar un nuevo enfoque de la clasificación de las comunidades vegetales en el país, presentando además un mapa escala 1:8'000,000. Finalmente,

se tienen los trabajos de INEGI y de la CONAFOR a escalas 1:250,000, que son la base de todo estudio de vegetación actualmente.

En los Estados Unidos de Norteamérica se cuenta con el enfoque de la clasificación de la vegetación de la *National Vegetation Classification Standard (NVCS)* el cual está estructurado en un orden jerárquico, conteniendo un pequeño número de categorías generalizadas y un gran número incremental de categorías más detalladas en los niveles inferiores. Combina las características fisionómicas y florísticas de la vegetación, permitiendo su identificación mediante un enfoque de "arriba hacia abajo" (divisivo) y "de abajo hacia arriba" (aglomerativo). El enfoque de arriba hacia abajo permite el uso de los rasgos fisionómicos distintivos para ayudar en el mapeo de la vegetación y para estratificar el muestreo donde no se cuenta con información florística para delimitar tipos de vegetación.

Miranda y Hernández (1963) mencionan que los tipos de vegetación se definieron fundamentalmente por su fisionomía, derivada a su vez de la forma de vida (biotipo) de las especies dominantes. La forma de vida y, en consecuencia, la fisionomía, son expresión de los factores del ambiente, ya sean climáticos, edáficos o bióticos, en que los elementos de la vegetación se desarrollan. Estos autores presentan una guía para determinar 32 principales tipos de vegetación en México usando un formato similar al de Dansereau (1957), pero con la lógica de la clasificación del NVCS.

Aún y cuando la mayoría de las bases de datos de vegetación han sido creadas bajo la propuesta de Miranda y Hernández existen inconsistencias, tanto en la clasificación como en la nomenclatura; por consiguiente, González (2003) presentó un análisis y una propuesta de clasificación y nomenclatura de la vegetación de México con la finalidad de estandarizar los criterios de clasificación y su nomenclatura, tanto de las bases de datos existentes como de las próximas a desarrollarse.

El arreglo jerárquico permite identificar los atributos que explican las variantes de la vegetación a diferentes escalas. En función de esto, se habla de mapas a gran escala, a escala media y pequeña. Las escalas pequeñas identifican grandes unidades de vegetación a nivel de bioma y/o series de formaciones, estrechamente

relacionados con los rasgos climáticos y fisiográficos, y en ocasiones relacionados al estrato geológico. Su representación puede hacerse a escalas 1:1'000,000, 1:2'000,000 o menores. El siguiente nivel de integración de la vegetación, la formación (en sentido amplio, equivalente al tipo de vegetación), se representa en escalas medias 1:500,000; 1:250,000, como lo ha hecho la Comisión Técnico Consultiva de Coeficientes de Agostadero, COTECOCA (1:500,000), e INEGI (1:250,000). Finalmente, las asociaciones y consociaciones se pueden representar a gran escala 1:50,000 o mayores, aunque las cartas de INEGI 1:50,000 se refieren a formaciones (tipos de vegetación).

Para que el sistema sea jerárquico es necesario resaltar los niveles de integración de la vegetación, por lo que en un país como México, con tanta variación fisiográfica, climática y biótica, las características más útiles para hacer una comparación y/o clasificación de la vegetación son la fisionomía y la estructura de la misma. La fenología contribuye de manera importante a diferenciar las comunidades; sin embargo, estos atributos de la vegetación a menudo no son claramente identificables en relación con los factores ambientales, por lo que la incorporación de características geográficas (templado y tropical), de montaña o climáticas, deberán ser consideradas en el esquema de clasificación.

Con la finalidad de considerar el dinamismo de la vegetación como consecuencia de las actividades antropogénicas, las etapas sucesionales resultantes son consideradas en la medida en que la clasificación se emplease tanto para comunidades primarias (poco o escasamente modificadas por actividades antropogénicas), como para aquellas etapas sucesionales, siempre y cuando se haga mención de su condición de vegetación secundaria (se explicará más adelante).

Las unidades reconocidas incluyen tanto la vegetación zonal como azonal, es decir, aquéllas que están respondiendo a la influencia más directa del clima y aquéllas en que la influencia sobre la comunidad está dada por características diferentes al clima como cantidad y calidad de agua, sustrato geológico o variantes edáficas.

La unidad mayor que se utilizó fue el *Bioma*, definido por la fisonomía de las comunidades, la cual esta dada por las formas de vida o biotipos dominantes. El siguiente nivel de integración son las *series de formaciones*; es decir, el agrupamiento de formaciones vegetales (tipos de vegetación), ecológicamente relacionadas entre si por algún gradiente ambiental. Así, se agrupan las formaciones vegetales clímax y las diferencias en formaciones climáticas (zonales) y formaciones edáficas (azonales). Con este concepto, en México se pueden hacer agrupaciones de series de formaciones.

### **Bases de datos de vegetación en México**

En México se han desarrollado hasta la fecha seis bases de datos de uso de suelo y vegetación con cobertura nacional: COTECOCA; INEGI series I, II y III, y los inventarios forestales de 1994 y 2000 de la CONAFOR; sin embargo, estudios de cambio de uso del suelo y cobertura han demostrado que los datos son difíciles de comparar en términos de las categorías de mapeo que se utilizan, así como de las escalas de trabajo (tiempo-espacio) (Velásquez *et al.*, 2002). Por tal motivo y rescatando los trabajos existentes (INEGI serie I y II, y los inventarios forestales de 1994 y 2000) por mandato del INE-SEMARNAT, el Instituto de Geografía-UNAM realizó una investigación con la finalidad de analizar y estandarizar las bases de datos, resultando tres bases depuradas y acopladas para su ínter combinación, las cuales son; Serie I ( $t_1$  1976±3), Serie II ( $t_2$  1993) y el Inventario Forestal 2000 (base de datos  $t_3$ ) (Velásquez *et al.*, 2002).

En cuanto a la base de datos de COTECOCA (1968-1981), aún y cuando fue realizada con un enfoque ganadero, su clasificación es primariamente estructural (fisonómica), con descripciones generales de la composición de la vegetación (florístico). Por otra parte, durante el año 2005, el Colegio de Postgraduados realizó un convenio con dicha institución para la digitalización y restitución de cada uno de los planos (corrección de los límites municipales y polígonos de vegetación), por lo que actualmente se cuenta con los 32 estados digitalizados y restituidos, así como con una extensa base de datos que se extrajo y codificó de las memorias estatales.

### **Clasificación de la vegetación mediante sensores remotos**

Según lo planteado anteriormente para los sistemas de clasificación terrestres, queda claro que incluso en esas situaciones resulta sumamente difícil y se requiere de mucho conocimiento a priori para poder clasificar la vegetación siguiendo un esquema jerárquico y basado en relaciones fisionómicas y florísticas.

Por consiguiente, y aprovechando las ventajas de observación sinóptica y temporalidad de los sensores remotos, se han establecido relaciones entre las variables biofísicas de la vegetación y los datos satelitales, desarrollándose un gran número de técnicas para clasificar los datos de los sensores remotos en clases o cubiertas vegetales. La mayoría de las clasificaciones usan algoritmos paramétricos de clasificación supervisada o no supervisada (Bastiaanssen, 1998); las más nuevas han utilizado técnicas de *clusters* para identificar grupos espectrales diferentes. Estas técnicas normalmente han utilizado imágenes de alta resolución como SPOT y LANDSAT; sin embargo, en las clasificaciones a escalas globales se ha empleado preferentemente información de NOAA/AVHRR (Nemani y Running, 1997). Los ejemplos predominantes de este tipo de clasificación son los *clusters* no supervisados en conjunto con bases de datos y etiquetamiento manual de los mismos. Actualmente existe una nueva propuesta basada en algoritmos de árboles de decisión para la clasificación de datos globales, la cual tiene la ventaja de ser muy flexible y computacionalmente eficiente (Lotsch, 1999). Asimismo, existe otra tendencia en los algoritmos de clasificación, la cual se fundamenta en la magnitud o dinámica temporal de los índices espectrales de vegetación, como el NDVI (Justice *et al.*, 1985; Loveland *et al.*, 1995; DeFries and Townshend, 1994).

La revisión de literatura realizada permitió identificar dos enfoques importantes basados en sensores remotos que relacionan a una variable biofísica vegetal para la clasificación de la vegetación natural: el primero se basa en los desarrollos del grupo de investigación de clima y vegetación del Dr. Ranga B. Myneni del Departamento de Geografía de la Universidad de Boston (el cual será denominado en lo siguiente como Enfoque Bostoniano); el segundo, es una propuesta de clasificación presentada por R. Nemani y S. Running (1997) (Enfoque de Nemani y Running).

### *Enfoque Bostoniano*

Las bases de este enfoque y las del siguiente surgen de la hipótesis que las condiciones hidro-meteorológicas determinan el crecimiento y estructura de las plantas, es decir que las plantas crecen al optimizar el uso de los recursos naturales (agua, nutrientes del suelo y radiación solar). Por lo tanto, el efecto de adaptación a estas condiciones naturales puede modificar los atributos de la vegetación, incluyendo: tamaño de la planta, tipo y longevidad de la hoja y densidad. Esta capacidad de las plantas a adaptarse al entorno natural genera una gran variedad de tipos de vegetación, ocasionando un sinnúmero de diferentes formas, tipos, tamaños y atributos de follajes.

Considerando lo anterior y con la finalidad de caracterizar el follaje de la vegetación de una manera útil, el Enfoque Bostoniano utiliza el Índice de Área Foliar (IAF) y la Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa (FPAR, por sus siglas en inglés), por su ya probada representatividad de las características estructurales de la vegetación (Ruimy *et al.* 1994; Sellers *et al.* 1986), para la clasificación de la vegetación en seis biomas diferentes.

El IAF está definido, en follajes de hoja ancha, como el área de las hojas por unidad de suelo y, en follajes de hoja angosta, como la proyección total del área foliar, ignorando la complejidad de la geometría del follaje, la caracterización de la vegetación mediante el IAF en lugar de la composición de especies, es una simplificación crítica usada para hacer una comparación global de los ecosistemas terrestres. El IAF provee una medida de la fisiología, la cual está más directamente relacionada con la energía, agua y el proceso de intercambio de CO<sub>2</sub> (Lotsch, 1999).

Asrar *et al.* (1992) encontraron que bajo ciertas condiciones de la vegetación, la FPAR se relaciona linealmente con el NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), mientras que el IAF presenta una relación de tipo curvilínea. Autores como Myneni *et al.* (1992), Myneni y Williams (1994), han demostrado que la relación entre el FPAR y el NDVI es similar en follajes tanto en una como en las tres dimensiones. El FPAR es frecuentemente usado para relacionar datos satelitales a estimaciones simples de producción primaria y actividad fotosintética; sin embargo, es importante mencionar que diferentes biomas presentan diferencias en sus

relaciones de NDVI/IAF y NDVI/FPAR (Lotsch, 1999). Esencialmente, estas diferencias son usadas en el algoritmo del MODIS/MISR (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer y Multi-angle Imaging Spectroradiometer, respectivamente) (Knyazikhin *et al.*, 1998) para la clasificación, pero si los tipos de follaje tienen relaciones similares de NDVI-IAF/FPAR se requiere de información adicional relacionada a la cobertura vegetal, por lo que muchos sistemas de clasificación, basados en mediciones ecológicas, botánicas o funcionales, no son necesariamente aptos para la estimación de IAF/FPAR.

Myneni *et al.* (1997) definen seis biomas basados en la estructura de su follaje: pastos y cultivos de cereales (Bioma 1), matorrales (Bioma 2), cultivos de hoja ancha (Bioma 3), sabanas (Bioma 4), bosque de hoja ancha (Bioma 5) y bosques de hoja angosta (Bioma 6), los cuales requieren de diferentes modelos de transferencia de la radiación para estimar IAF/FPAR de datos obtenidos de sensores remotos, lo que los hace inconfundibles.

En base a lo anterior, se puede decir que el Enfoque Bostoniano se basa en un árbol de decisión fundamentado en las relaciones obtenidas del IAF y el FPAR a partir del NDVI, provenientes de ambos sensores (MODIS/MISR). Considerando que la estructura del follaje de la vegetación está definida por la geometría y estructura de la planta, el uso del sensor MISR obtendrá múltiples ángulos de visión de la superficie terrestre, lo que mejora la información referente a las propiedades estructurales del follaje de la vegetación (Knyazikhin *et al.*, 1998). Lotsch (1999) logró mejorar la clasificación realizada con el sensor MODIS en un 5% al incluir datos del MISR.

El Enfoque Bostoniano presenta la problemática de que su clasificación de la vegetación está limitada a la identificación de seis biomas preestablecidos con información global, lo que podría llevar a problemas de calibración al pasarlo a una escala diferente, rompiendo la regla de los sistemas de clasificación, que indica que deberán de ser ampliamente aplicables.

#### *Enfoque de Nemani y Running*

Esté sistema de clasificación utiliza, al igual que el Enfoque Bostoniano, un árbol de decisión; sin embargo, se planteó como independiente ya que basa su criterio de

clasificación de la vegetación en un enfoque totalmente diferente, el cual deja abierta la puerta a cuatro posibles nuevas clases de cobertura.

Nemani y Running (1997) demostraron el potencial de la combinación de los índices espectrales de vegetación y las observaciones de la temperatura de la superficie,  $T_s$ . Su metodología se basa en el conocimiento del proceso de intercambio de energía, en lugar de asociaciones estáticas de tipos de vegetación y propiedades espectrales.

Esta metodología difiere a la comúnmente utilizada para la clasificación de la vegetación en tres factores, principalmente: a) Sólo utiliza atributos de las planta, b) Se basa únicamente en información proveniente de sensores remotos y c) provee un sistema estable de clasificación para un modelo biogeoquímico global (Nemani y Running 1997)

Los fundamentos ecológicos para este sistema de clasificación fueron propuestos en Nemani *et al.* (1994a) y la clasificación se basa en tres atributos de la estructura del follaje de la planta (permanencia de la biomasa sobre la tierra, vida de las hojas y tipos o formas de las hojas). La combinación de estos tres atributos producen las seis clases siguientes: 1) Perennifolia de hoja angosta (bosques), 2) Perennifolia de hoja ancha (selvas), 3) Caducifolia de hoja angosta, 4) Caducifolia de hoja ancha, 5) Hoja ancha anual (agrícola), y 6) Pastos (los cereales pueden ser incluidos aquí). Los matorrales se consideraron como una clase especial que incluye vegetación tanto de hojas anchas como de hojas angostas, pero con pequeña permanencia de biomasa.

La capacidad de las plantas para acoplarse a la atmósfera tiene un fuerte impacto en el intercambio de energía y por consiguiente en la temperatura del follaje (Szeicz y Endrodi, 1969). Por ejemplo, los bosques son excelentes disipadores de energía y mantienen la temperatura del follaje en 2-3° C por debajo de la temperatura del aire, similarmente, la vegetación de hoja angosta que tiene poca resistencia aerodinámica. En contraste, la temperatura de los pastizales y cultivos puede ser significativamente más alta.

Evidencia teórica y experimental demuestra que los índices de vegetación espectrales están relacionados con FPAR, IAF, Bm (Biomasa) y COB (cobertura)

(Myneni *et al.*, 1990; Asrar *et al.*, 1992; Goward *et al.*, 1994). Por otra parte, la temperatura de la superficie obtenida de los satélites está en función de la proporción del suelo y vegetación en el píxel, así como de la humedad de la superficie. Existe evidencia que demuestra que la temperatura de la superficie en condiciones secas esta correlacionada linealmente con la densidad del follaje en diferentes tipos de vegetación; sin embargo, en condiciones de superficies mojadas esta relación no es clara (Nemani *et al.*, 1993).

Este enfoque parte de la generación de cuatro grupos divididos por los límites de  $NDVI = 0.4$  y  $T_s = 35^\circ C$ . Los límites se basan en que a valores de  $NDVI = 0.4$  muchos tipos de vegetación absorben más del 75% de la Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR, por sus siglas en inglés) (Myneni *et al.*, 1990; Asrar *et al.*, 1992). Asimismo, la temperatura de superficies bien regadas y follajes cerrados no excede los  $32^\circ C$  bajo un amplio rango de condiciones de radiación neta (Gay, 1972; Priestley y Taylor, 1972), lo que genera cuatro grupos: Grupo 1: Limitados por agua, Grupo 2: Limitados por energía, Grupo 3: Desacoplados atmosféricamente, y Grupo 4: Acoplados atmosféricamente. Una vez establecidos los límites, el siguiente paso es implementar la lógica de la clasificación (Nemani y Running, 1997).

Finalmente, se pueden mencionar las siguientes problemáticas: 1) La selección de los límites puede ser en ocasiones arbitraria, y 2) La banda térmica del sensor MODIS se encuentra a diferente resolución espacial que las bandas del espectro R/IRC (rojo e infrarrojo cercano).

### **Información satelital angular**

De los dos enfoques mencionados con anterioridad se puede establecer que sus sistemas de clasificación se basan, respectivamente, en las características estructurales del follaje de la vegetación utilizando entre otras, información multi-angular (propiedades ópticas del follaje), relación de las propiedades estructurales de los follajes con su información térmica (biogeoquímico).

Aún cuando la aplicación de la información espectral, temporal y espacial en la clasificación con sensores remotos ha sido bien establecida en la literatura, es poca

la información referente a las aplicaciones generalizadas de los datos multi-angulares.

La reflectancia de la superficie de cualquier tipo de cobertura vegetal es una función del ángulo cenital solar, ángulo cenital de visión y de la diferencia entre los ángulos de visión azimutal solar y de visión. La dependencia de la reflectancia de la superficie con respecto a la geometría sol-sensor es representada por la función BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*) (Nicodemus *et al.*, 1977; Kimes, 1983). La mayoría de los satélites miden la radiación en un punto específico de la geometría sol-sensor, siendo esto un problema, principalmente en los de moderada y baja resolución espacial (TERRA y NOAA); por lo que, con la finalidad de reconstruir la BRDF de un área en específica (píxel o grupo de píxeles), los métodos tradicionales utilizan observaciones multi-angulares a partir de mediciones hechas en diferentes fechas (Li, 1996; Cabot y Dedieu, 1997; d'Entremont *et al.*, 1999), lo cual es válido únicamente bajo el supuesto de que las propiedades de la superficie en cuestión no cambian durante periodos de tiempo.

Con el avance de la tecnología satelital han surgido nuevas generaciones de sensores capaces de generar datos multi-angulares; así como los que toman datos simultáneamente de múltiples ángulos y múltiples-resoluciones espectrales, como el ATSR-2, POLDER y el MISR (Stricker *et al.*, 1995; Deschamps *et al.*, 1994; Diner *et al.*, 1998d). El uso de estos nuevos sensores con resoluciones globales (1km), mejoran la estimación de datos ecológicos, biogeoquímicos y aspectos biofísicos de la cobertura terrestre, ya que estos sensores presentan tres ventajas principales con respecto a los de un solo ángulo de observación: a) Los datos se toman simultáneamente, cuando todas las condiciones de la superficie terrestre y de la atmósfera no han cambiado, b) Estos sensores multi-ángulo facilitan la implementación de algoritmos avanzados, diseñados para diferenciar las diversas contribuciones de las señales satelitales, como los efectos radiativos de la superficie y, c) Proveen más información al reducir el nivel de ruido debido a los parámetros geofísicos y al incrementar su consistencia (Zhang *et al.* 2001).

Concluyendo, la certeza de los mapas de vegetación generados a partir de imágenes satelitales, a escalas regionales o continentales, varía enormemente

---

---

dependiendo de numerosos factores (puntos de control, información satelital utilizada y método de clasificación), por lo que se sugiere la implementación de datos multiangulares en la clasificación de la vegetación (Sellers *et al.*, 1996; Zhang *et al.* 2002a).

### LITERATURA CITADA

- Asrar, G., Myneni, R., and Choudhury, B. 1992. Spatial heterogeneity in vegetation canopies and remote sensing of absorbed photosynthetically active radiation: A modeling study. *Remote Sensing of Environment*, 41: 85-103.
- Bastiaanssen, W. G. M, 1998. Remote sensing in water resources management: The state of the art. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute.
- Cabot, F., and Dedieu, G. 1997. Surface albedo from space: Coupling bidirectional models and remotely sensed measurements. *Journal of Geophysics Research*, 102:19,645-19,663.
- d'Entremont, R.E., Schaaf, C.L.B., Lucht, W., y Strahler, A.H. 1999. Retrieval of red spectral albedo and bidirectional reflectance using AVHRR HRPT and GOES satellite observations of the New England region. *Journal of Geophysics Research*, 104:6229-6239.
- Dansereau, P. 1957. *Biogeography an ecological perspectiva*. The Ronald Press. NY. 394 p.
- Deschamps, P.Y., Brèon, F. M., Leroy, M., Podaire, A., Bricaud, A., Buriez, J. C., y Seze, G. 1994. The POLDER Mission: Instrument Characteristics and Scientific Objectives. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32:598-615.
- DeFries, R.S., and Townshend, J.R.G. 1994. NDVI-derived land cover classification at global scales. *International Journal of Remote Sensing*, 15:3567-3586.
- Diner, D., Beckert, J.C., Reilly, T.H., Brueggle, C.J., Conel, J.E., Kahn, R.A., Martonchik, J.V., Ackerman, T.P., Davis, R., Gerstl, A.A.W., Gordon, H.R., Muller, J.-P., Myneni, R.B., Sellers, P.J., Pinty, B., y Verstraete, M. M. 1998. Multiangle imaging spectroradiometer (MISR) instrument description and

- experiment overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36:1072-1087.
- González, M; F. 2003. *Las Comunidades Vegetales de México*. INE-SEMARNAT, 77 p.
- Goward, S. N., R. H. Waring, D. G. Dye, and J. Yang. 1994. Ecological remote sensing at OTTER: satellite macroscale observations. *Ecological Applications*, 4: 322-343.
- Justice, C. O., J. R. G. Townshend. B. N. Holben, y C. J. Tucker. , 1985. Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 6:1271-1381.
- Kimes, D.S. 1983. Dynamics of directional reflectance factor distributions for vegetation canopies. *Applied Optics*, 22:1364-1372.
- Knyazikhin, y., Martonchik, J.V., Diner, D.J., Myneni, R.B., Verstraete, M., Pinty, B. and Gobron, N., 1998b. Estimation of vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from atmosphere-correct MISR data, *Journal of Geophysics Research*, 103 (D24), 32239-32256.
- Knyazikhin, Y., Martonchik, J.V., Myneni, R.B., Diner, D.J. and Running, S.W., 1998a. Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data, *Journal of Geophysics Research*, 103: 32257-32275.
- Li, Z. 1996. On the angular correction of satellite radiation measurements: The performance of ERBE angular dependence model in the Arctic. *Theor. Appl.Climatol.*, 54:235-248.
- Lotsch, A. 1999. Biome level classification of land cover at continental scales using decision trees. Tesis de Maestria. Graduate School Of Art And Sciences Boston University
- Lotsch A., Y. Tian., M.A. Friedl., and R.B. Myneni. 2003. Land cover mapping in support of LAI and FAPAR retrievals from EOS-MODIS and MISR: classification methods and sensitivities to errors. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 10, 1997-2016.

- Loveland, T. R., Merchant, J. W., Brown, J. F., Ohlen, D. O., Reed, B. C., Olsen, P., and Hutchinson, J. 1995. Seasonal Land Cover of the United States. *Annals of the Association of American Geographers*, 85 2:339-355.
- Miranda, F. G., Hernández-X. 1963. Los tipos de vegetación de México y su clasificación. *Bol. Soc. Bot. Mex*, 29-179.
- Myneni, R., Asrar, G., and Hall, F. 1992. A three dimensional radiative transfer method for optical remote sensing of vegetated land surfaces. *Remote Sensing of Environment*, 41: 05-121.
- Myneni, R., G. Asrar, and S. A. W. Gerstl. 1990. Radiative transfer in three dimensional leaf canopies. *Transport Theory and Statistical Physics* 19: 1-54.
- Myneni, R.B., Nemani, R. R., and Running, S. W. 1997. Estimation of global leaf area index and absorbed PAR using radiative transfer models. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 35:1380-1393.
- NBS/NPS Vegetation Mapping Program, 1994. Standardized National Vegetation Classification System-Final Draft.  
<http://biology.usgs.gov/npsveg/classification/index.html>
- Nemani, R., L. L. Pierce, S. W. Running, and S. N. Goward. 1993. Developing satellite derived estimates of surface moisture status. *Journal of Applied Meteorology*, 32: 548-557.
- Nemani, R. y S. W. Running. 1997. Land cover characterization using multitemporal red, near-ir and thermal-ir data from NOAA/AVHRR. *Ecological Applications*, 7:79-90.
- Nicodemus, F.E., Richmond, J.C., Hsia, J.J., Ginsberg, I.W., and Limperis, T. 1977. *Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance*, NBS Monogr., No. 160, National Bureau of Standards, U.S. Department of Commerce, 52 p.
- Rzedowski, J. 1978. *Vegetación en México*. Editorial Limusa, México.
- Ruimy, A., Saugier, B., and Dedieu, G. 1994. Methodology for the estimation of net primary production from remotely sensed data. *Journal of Geophysics Research*, 99: 5263-5283.
- Sellers, P.J., Los, S.O., C.J. Tucker, C.O. Justice, D.A. Dazlich, G.J. Collatz and D.A. Randall. 1996. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric

- GCMs, Part II: the generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data. *Journal of Climate*, 9:706-737.
- Stricker, N.C.M., Hahne, A., Smith, D.L., Delderfield, J., Oliver, M.B., and Edwards, T. 1995. ATSR-2: The evolution in its design from ERS-1 to ERS-2. *ESA Bull.*, 83:32-37.
- Velázquez, A., J.F. Mas, J.L. Palacio, J.R. Díaz, R. Mayorga, C. Alcántara, R. Castro y T. Fernández. 2002. Análisis de cambio de uso del suelo. Informe técnico. Convenio INE-Instituto de Geografía, UNAM.
- Zhang Y., Y. Tian., R.B. Myneni., and Y. Knyazikhin. 2002a. Required consistency between biome definitions and signatures with the physics of remote sensing. I: empirical arguments. *Remote Sensing of Environment*, 80: 418-434.
- Zhang Y. 2001. LAI and FPAR for estimation and land cover identification with multiangle multispectral satellite data. Tesis Doctoral. Graduate School Of Art and sciences Boston University.

## **CAPÍTULO II. SOBRE LA CLASIFICACIÓN DE SISTEMAS ARBOLADOS USANDO INFORMACIÓN ESPECTRAL MULTI-ANGULAR**

### **RESUMEN**

El uso de información espectral multi-angular se ha justificado como una estrategia para aumentar la precisión de los sistemas de clasificación de cultivos y de la vegetación natural, ya que los usados actualmente sólo utilizan información espectral uní angular, bajo un esquema de análisis multivariado o de árboles de decisión. En este trabajo se discuten los esquemas de caracterización de la información espectral multi-angular asociada a la vegetación, así como su uso en los sistemas de clasificación. Para revisar la factibilidad de uso de datos espectrales multi-angulares, se diseñó un experimento tipo maqueta con sistemas arbolados, cinco especies forestales; y se realizaron mediciones asociadas a la función de distribución bidireccional de las reflectancias (BRDF, por sus siglas en ingles). Los datos multi-angulares se modelaron en forma compacta y se usó para definir un parámetro general, la pendiente, que engloba toda la variación angular de las reflectancias. Los resultados muestran que, dejando fijo el fondo de la vegetación, es posible discriminar sistemas arbolados y que, cuando el fondo de la vegetación varia, existe confusión con coberturas aéreas bajas, la cual se reduce al incrementarse ésta.

**Palabras clave:** Clasificación, BRDF, sistemas arbolados, sensores remotos.

### **INTRODUCCIÓN**

La clasificación de la vegetación usando sensores remotos ha sido uno de los objetivos de largo plazo de la tecnología satelital. Para clasificar la vegetación se ha usado una gran variedad de sensores remotos montados en plataformas espaciales, donde predominan los que son gratuitos y con resolución espacial suficiente para análisis regionales o globales. Uno de los sensores más usado con fines de clasificar la vegetación es el AVHRR, con resolución espacial a nadir de 1.1km, el cual ha estado disponible, en diferentes versiones, desde 1978. Actualmente el sensor

MODIS, con resolución a nadir de 250, 500 y 1000m, en operación desde el año 2000 es usado intensivamente en el mapeo de la vegetación a escalas locales y globales. Ambos sensores son de barrido ancho, por lo que los píxeles en una escena son vistos con diferentes ángulos cenitales de visión e iluminación solar, generando un problema de geometría sol-sensor. La información multi-angular asociada a la vegetación, geometría sol-sensor, ha sido la base para el desarrollo de sensores operacionales como el POLDER, que tiene hasta 14 ángulos de observación y una resolución espacial de 7km; el ATSR-2 con 2 ángulos de visión y una resolución de 1km; y, el MISR, con 9 ángulos de visión y resolución espacial de 275m a 1.1km. Así, la información espectral multi-angular es inherente a los sensores actuales de cubrimiento global y alta resolución temporal.

La mayoría de los sistemas de clasificación utilizan algoritmos paramétricos de clasificación multivariada, supervisada o no supervisada (Bastiaanssen, 1998). Los ejemplos destacados de este tipo de clasificación son los conglomerados no supervisados (*clusters*) en conjunto con bases de datos y etiquetamiento manual de los mismos. Algunas propuestas están basadas en algoritmos de árboles de decisión para la clasificación de datos globales, los cuales tiene la ventaja de ser muy flexibles y computacionalmente eficientes (Lotsch *et al.*, 2003). Existe otra tendencia en los algoritmos de clasificación, la cual se fundamenta en la magnitud o dinámica temporal de los índices espectrales de vegetación, como el NDVI (Justice *et al.*, 1985; Loveland *et al.*, 1995; DeFries y Townshend, 1994).

Uno de los sistemas de clasificación de la vegetación con mayor uso es la del grupo del sensor MODIS/MISR (Knyazikhin *et al.*, 1998a y b; Lotsch *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2002a y b). Un punto crítico de este sistema de clasificación es el uso de las relaciones del índice espectral NDVI con la RFAA (radiación fotosintéticamente activa absorbida) y el IAF, en sus patrones temporales y espectrales. La relación entre el NDVI y la RFAA y el IAF ha sido discutida en su validez y, bajo ciertas condiciones, se ha establecido una relación más o menos lineal (Asrar *et al.*, 1992; Myneni *et al.*, 1992; Myneni y Williams, 1994).

Con un enfoque de clasificación basado en árboles de decisión, Nemani y Running (1997) usaron la relación entre el NDVI y la temperatura de superficie,  $T_s$ , para

discriminar diferentes clases de vegetación, usando balances de energía y agua como paradigma. El problema de este enfoque es que se requiere de contar con una banda térmica de los sensores y los multi-angulares rara vez cuentan con este tipo de banda.

Los sistemas de clasificación discutidos, basados en sensores remotos, utilizan el NDVI como parte importante de sus algoritmos de discriminación, lo cual los hace poco atractivos para ecosistemas con mucho follaje, debido al problema de saturación de la banda del rojo (R), que esta incluida en el NDVI junto con la banda del infrarrojo cercano (IRC). Paz *et al.* (2007) discuten el diseño de índices de vegetación y muestran que las hipótesis implícitas del NDVI son de las más inadecuadas para capturar la dinámica del crecimiento de la vegetación.

### **INFORMACIÓN ESPECTRAL MULTI-ANGULAR**

Los objetos terrestres generalmente reflejan la energía solar en forma anisotrópica, de tal forma que esta señal angular puede ser usada para distinguir o clasificar los diferentes objetos en una escena con un satélite multi-angular (Diner *et al.*, 1999; Asner, 2000). La caracterización de las mezclas suelo-vegetación ha sido estudiada experimentalmente por muchos autores (Kimes, 1983; Ranson *et al.*, 1985; Goel, 1988) y ha servido de base para plantear que la información espectral multi-angular puede ser usada para una mejor discriminación y caracterización de los cultivos y ecosistemas.

#### **Modelos de la BRDF**

Una función utilizada para caracterizar la variación de las reflectancias con la geometría sol-sensor es la BRDF (Nicodemus *et al.*, 1977) o función de distribución de la reflectancia bidireccional. Esta función caracteriza a las reflectancias en función de los ángulos (cenitales y acimutales) de visión y de iluminación. La modelación de la BRDF ha sido abordada con enfoques empíricos (Minnaert, 1941; Hapke, 1981; Walthall *et al.*, 1985) o basados en la teoría de transferencia radiativa de medios turbios u homogéneos (Ross, 1981; Goel, 1988) o basados en óptica geométrica (Li y Strahler, 1985, 1986, 1992; Strahler y Jupp, 1991).

Los modelos de la BRDF más usados son los basados en funciones matemáticas que representan las componentes esenciales del proceso de transferencia de radiación (*kernels*) que combinan modelos de medios turbios y de óptica geométrica (Wanner *et al.*, 1995). Estos modelos semi-empíricos de *kernels* pueden ser lineales (Roujean *et al.*, 1992; Lucht y Roujean, 2000) o no lineales (Staylor y Suttles, 1986; Rahman *et al.*, 1993). En general los modelos de la BRDF requieren de al menos tres parámetros, lo que obliga a contar con información multi-angular con mínimas variaciones de las reflectancias de las superficies a caracterizar.

Recientemente se ha introducido una nueva familia de modelos de la BRDF que simplifican el problema de modelación, ya que sólo requieren un parámetro para su caracterización (Bolaños *et al.*, 2007).

### **Clasificación de la vegetación con información espectral multi-angular**

Se ha argumentado que la información espectral multi-angular mejora la precisión de las clasificaciones de la vegetación (Bicheron *et al.*, 1997; Hyman y Barnsley, 1997; Asner, 2000). Barnsley *et al.* (1997) y Hyman y Barnsley (1997) muestran que usar información multi-angular en una sola banda espectral en la clasificación de la vegetación, da resultados similares a utilizar información de múltiples bandas espectrales con un sólo ángulo de visión; aunque reconocen que la discriminación de clases de vegetación está fuertemente influenciada por las diferencias a nivel espectral y, en menor medida, a nivel angular.

Desde una perspectiva teórica y estadística, Zhang *et al.* (2002a y b) han argumentado que la clasificación de la vegetación debe basarse en principios de consistencia entre las propiedades radiativas de las clases y sus firmas espectrales distintivas, manteniendo fija la resolución espacial (problema de mezclas). Estos autores utilizan espacios espectrales (R-IRC, por ejemplo), y muestran que las clases de vegetación (radiativamente diferentes) están diferenciadas en función de su localización en el espacio espectral y tres métricas: inclinación, longitud e intercepción de los patrones cuasi-lineales en ese espacio. Así, los argumentos de estos autores favorecen la hipótesis de firmas espectrales multi-angulares únicas para las clases de vegetación.

Usando el modelo no lineal de la BRDF de Rahman *et al.* (1993), Pinty *et al.* (2002) y Gobron *et al.*, (2002) proponen que el parámetro  $k$  de este modelo puede usarse para discriminar tipos de vegetación con fondos muy reflectivos (nieve o desierto), de manera que la forma de la BRDF puede ser caracterizada en función de que sea cóncava ( $k > 1$ ), convexa ( $k < 1$ ) o lineal ( $k = 1$ ). Este enfoque ha sido utilizado por Nolin (2004).

### EXPERIMENTOS CON SISTEMAS ARBOLADOS

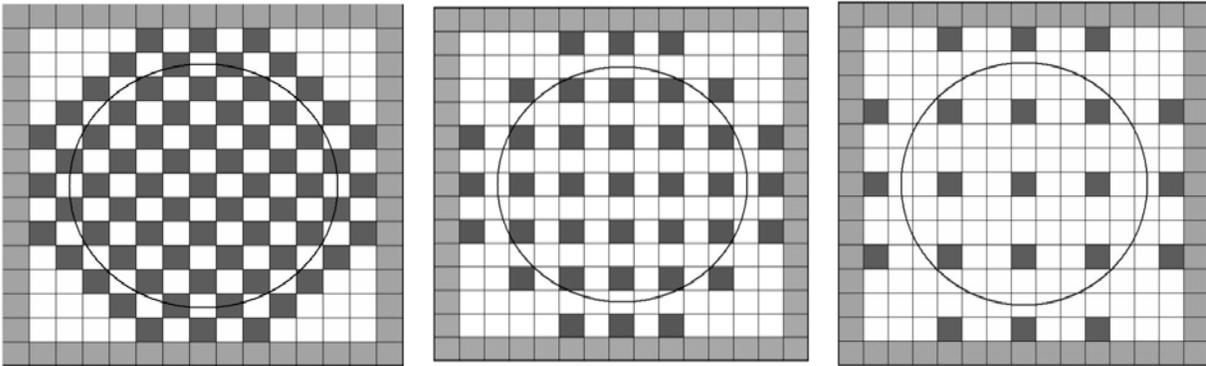
Para analizar si la información espectral multi-angular puede discriminar los diferentes tipos de vegetación, particularmente los arbolados, se diseñó un experimento tipo maqueta en las instalaciones del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Estado de México, en septiembre de 2006. El experimento consistió en la utilización de 5 especies forestales, cuyas características se muestran en el Cuadro 2-1.

**CUADRO 2-1. CARACTERÍSTICAS DE LAS ESPECIES FORESTALES DEL EXPERIMENTO**

Nombre común	Nombre científico	Tipo de hoja	Altura* (cm)	Diámetro de copa* (cm)	Diámetro basal* (mm)
Oyamel	<i>Abies religiosa</i>	Acicular	38.1 (9.3)	24.4 (2.7)	5.74 (0.6)
Fresno	<i>Fraxinus uhdei</i>	Ancha	75.6 (11.5)	37.8 (7.9)	9.7 (1.5)
Encino	<i>Quercus rugosa</i>	Ancha	73.9 (9.7)	21.6 (3.9)	6.92 (0.9)
Pino greggii	<i>Pinus greggii</i>	Acicular	34.2 (3.0)	14.5 (3.1)	4.8 (0.4)
Pino montezumae	<i>Pinus montezumae</i>	Acicular	8.9 (4.1)	41.8 (3.7)	11.34 (1.4)

\* Los datos entre paréntesis son la desviación estándar.

En cada especie forestal se midió su BRDF usando tres configuraciones geométricas (Figura 2-1).



**Figura 2-1. Configuraciones geométricas de los experimentos, donde cada cuadro sombreado representa la posición de un arbolito y los cuadros con sombreado más claro del perímetro no son usados. El círculo en la figura corresponde al área de medición.**

Para cada especie y configuración geométrica se usaron dos suelos como fondo uno franco arenoso (claro) y el otro franco arcilloso (oscuro) y se realizaron mediciones con tres o cuatro ángulos cenitales (y acimutales) de iluminación. En todos los casos se utilizó un equipo de BRDF diseñado *ex profeso* para medir ángulos de visión de 0 a 50°, con incrementos de 10°, tanto en la dirección de iluminación solar como en la contraria, obteniéndose así 12 mediciones por efectos de visión (los ángulos de nadir se midieron dos veces: tanto en la dirección iluminada y como en la sombreado). El equipo de BRDF mantiene constante el área de observación, reduciendo la altura de medición (para el ángulo de visión del radiómetro) en función del ángulo de visión. El radiómetro usado fue el modelo FR Jr de ASD<sup>MR</sup>, que es un radiómetro hiperespectral. En todas las mediciones se tomaron fotografías de la cobertura de la vegetación con una cámara digital modelo Cybershot DSC-V1 de Sony<sup>MR</sup>. Con estas fotografías se obtuvo la cobertura aérea (COB) de la vegetación, con un proceso de clasificación supervisada.

Adicionalmente se hizo un juego completo de mediciones para el caso de sólo suelo (COB = 0), para tener cuatro coberturas diferentes para cada especie analizada. El uso de suelo como fondo de la vegetación fue para ver los efectos de fondos con reflectancias contrastantes. En los sistemas naturales, el fondo de los

sistemas arbolados (bosques) varia estacionalmente (Miller *et al.*, 1997) y tiene su propia función BRDF (Peltonieri *et al.*, 2005).

Las reflectancias hiperespectrales se convirtieron a bandas espectrales del sensor TM (Landsat 5), usando las funciones de respuesta espectrales correspondientes, después de eliminar valores con problemas de vapor de agua atmosférico. En el Cuadro 2-2 se muestra las bandas espectrales usadas.

**CUADRO 2-2. CARACTERÍSTICAS DE LAS BANDAS ESPECTRALES USADAS**

Banda	Rango espectral (micrómetros)	Centro de banda (micrómetros)
A (azul)	0.450 - 0.515	0.485
V (verde)	0.525 - 0.605	0.570
R (rojo)	0.630 - 0.690	0.660
IRC (infrarrojo cercano)	0.780 - 0.900	0.840
IRM1 (infrarrojo medio 1)	1.550 - 1.750	1.650
IRM2 (infrarrojo medio 2)	2.090 - 2.350	2.220

**Modelo de la BRDF usado**

El modelo de la BRDF usado utiliza un sólo parámetro (Bolaños *et al.*, 2007), basado en la siguiente convención para el ángulo de visión:

$$\theta_v = -\theta_v \text{ si } \begin{cases} 0 \leq \text{abs}(\phi_s - \phi_v) \leq 90 \\ 270 \leq \text{abs}(\phi_s - \phi_v) \leq 360 \end{cases} \quad (2-1)$$

$$\theta_v = +\theta_v \text{ si } \{90 < \text{abs}(\phi_s - \phi_v) < 270\}$$

donde la geometría de iluminación está definida por el ángulo cenital solar ( $\theta_s$ ) y el ángulo acimutal solar ( $\phi_s$ ), mientras que la geometría de visión está definida por el ángulo cenital de visión ( $\theta_v$ ) y el ángulo acimutal de visión ( $\phi_v$ ).

Considerando que durante las mediciones de reflectancia se presentaron muchas variaciones en las componentes de la radiación solar (difusa y directa) y que el mayor contraste en las reflectancias angulares se da en la dirección contraria a la de la iluminación o  $\theta_v$  positivo (Barsnley *et al.*, 1997), en este trabajo sólo se analiza el modelo de la BRDF para ese caso (Bolaños *et al.*, 2006):

$$\chi = (90 - \theta_v) + \theta_s$$

$$\chi = 90 + bRn \quad (2-2)$$

donde  $R_n$  es una reflectancia normalizada, multiplicada por  $\cos(\chi)$ , y  $\chi$  es una variable angular de posición que reduce la complejidad de la BRDF al usar simetrías angulares.

### ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En la Figura 2-2 se muestra el ajuste del modelo de la BRDF para el caso del Fresno,  $COB = 91.76\%$ ,  $\theta_s = 14.4^\circ$  y en la Figura 2-3 el caso del suelo desnudo claro,  $\theta_s = 56.1^\circ$ . En ambos casos la regresión lineal fue forzada a tener una ordenada al origen de  $90^\circ$ .

En general, los ajustes del modelo analizado de la BRDF fueron excelentes ( $R^2 > 0.98$ ) para la gran mayoría de los casos, mostrando así que la BRDF puede ser aproximada en forma simple al usar simetrías angulares. Resultados similares fueron encontrados para el caso de pastizales (Bolaños *et al.*, 2007).

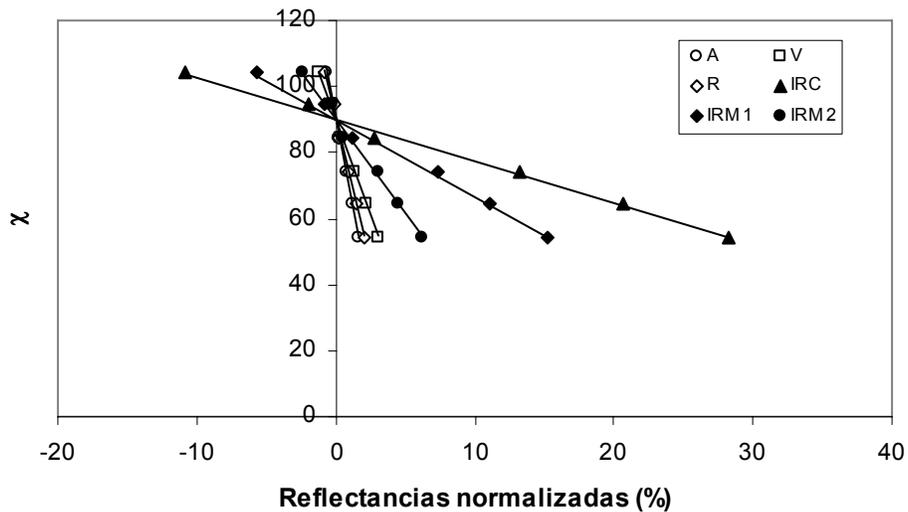
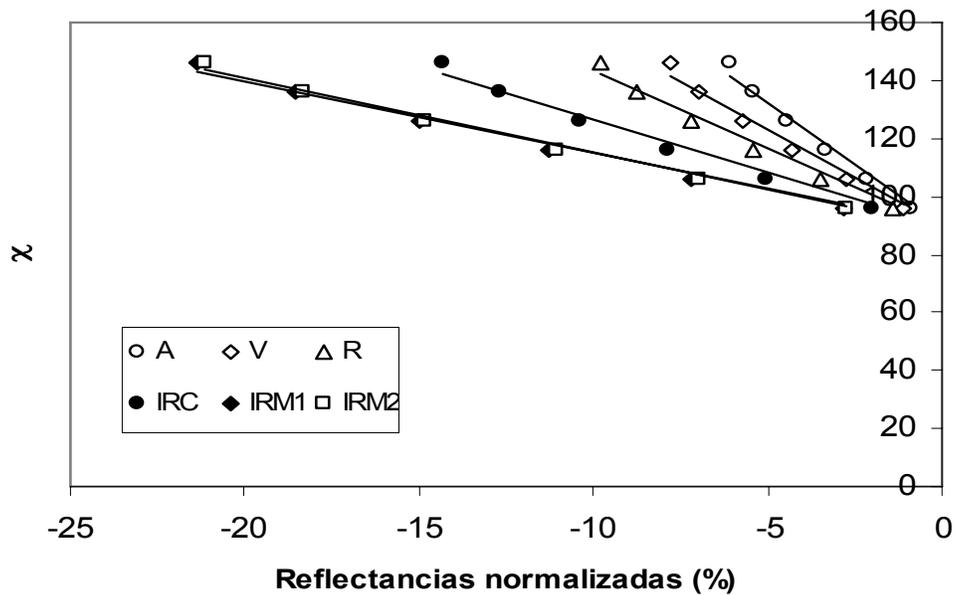


Figura 2-2. Ajuste del modelo de la BRDF para el Fresno.



**Figura 2-3. Ajuste del modelo de la BRDF para el suelo desnudo claro.**

Dado que las pendientes  $b$  de la función BRDF de las bandas espectrales están en función del ángulo cenital (y acimutal) solar, una forma de compactar (generalizar) la función BRDF es analizar la relación entre estas pendientes, dejando el ángulo cenital solar implícito. En este estudio las relaciones entre las  $b$  de la banda del R y del IRC fueron consideradas; aunque las relaciones entre el resto de las bandas presentan patrones similares al de éstas.

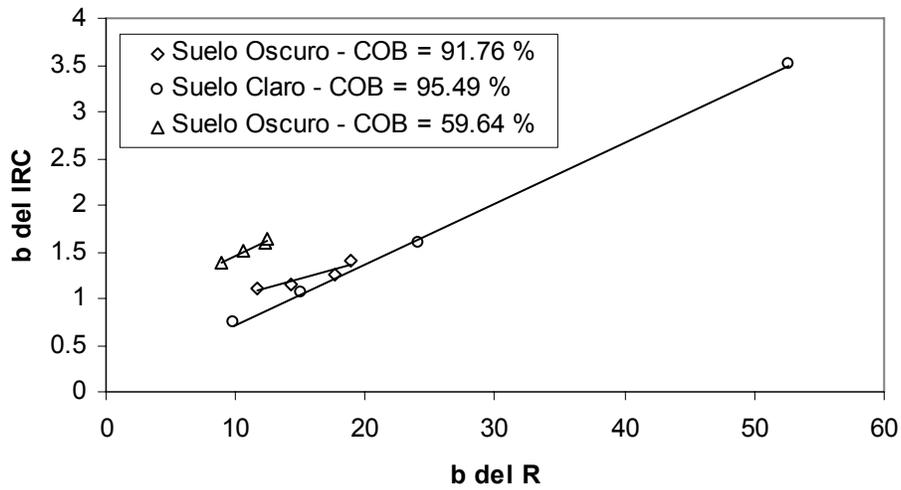
Para analizar las BRDF, en forma independiente del ángulo cenital solar, se usó la relación entre las pendientes del modelo BRDF de las bandas del R e IRC:

$$b \text{ del IRC} = A + B(b \text{ del R}) \quad (2-3)$$

El uso únicamente de las bandas del R e IRC es debido a que este par de bandas espectrales se presenta en prácticamente todos los sensores remotos a bordo de plataformas espaciales y en el alto contraste entre estas dos bandas para el caso de la vegetación.

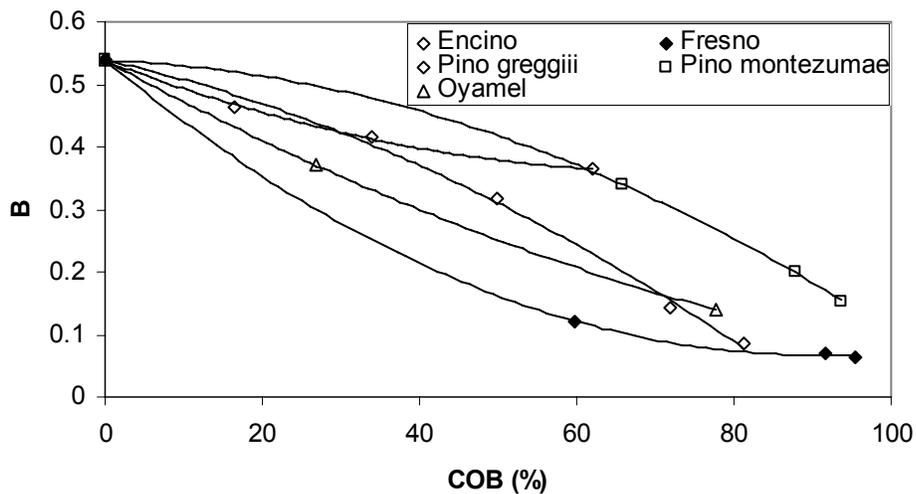
En la Figura 2-4 se muestra la relación (2-3) para el caso del Fresno. Demostrando que es posible el análisis de la BRDF en forma independiente del ángulo cenital solar, con ajustes de  $R^2 > 0.9$  para los casos analizados. El modelo

lineal propuesto puede considerarse como una consecuencia del modelo de la BRDF generalizado (Bolaños *et al.*, 2007).

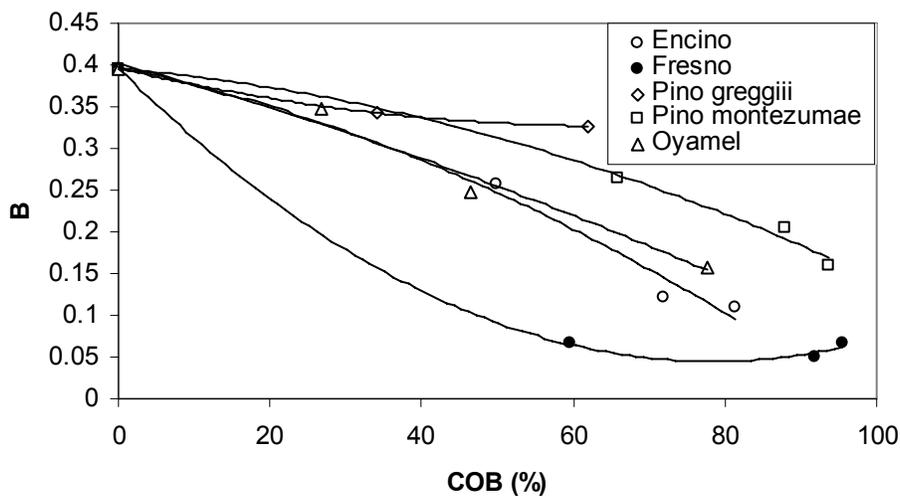


**Figura 2-4. Ajuste del modelo entre las pendientes b para varios ángulos cenitales solares.**

En la Figura 2-5 se muestra la variación de las pendientes B, relación (2-3), en función de la cobertura aérea, para las especies analizadas y el caso del suelo claro. En la Figura 2-6 se muestra esta misma información para el caso del suelo oscuro.



**Figura 2-5. Relación entre la pendiente B y COB para suelo claro.**

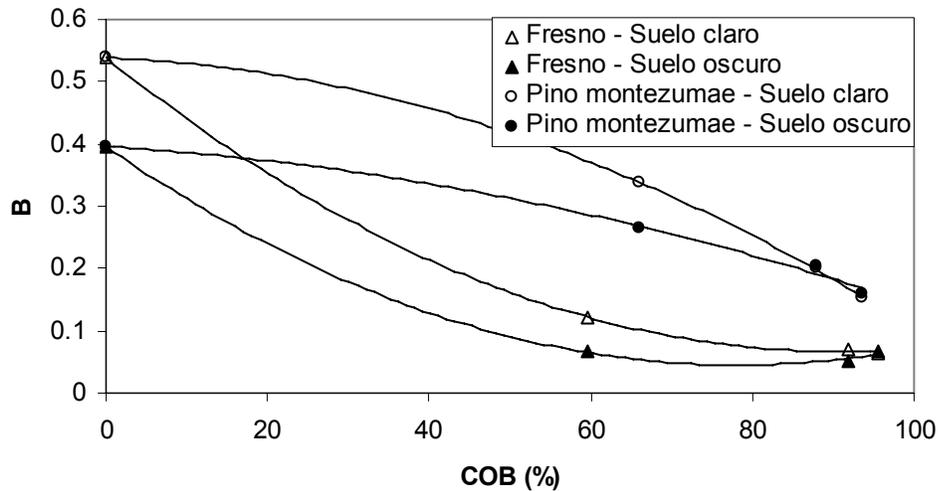


**Figura 2-6. Relación entre la pendiente B y COB para suelo oscuro.**

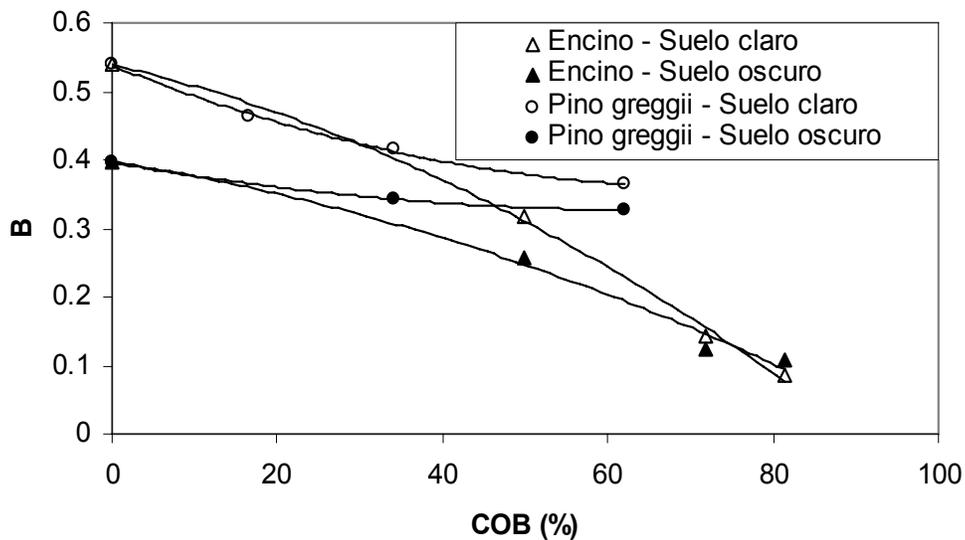
En las Figuras 2-5 y 2-6 se usó un polinomio de segundo grado para ajustar la relación entre B y COB, sólo para mostrar patrones. El uso de la pendiente B, relación (2-3), esta de acuerdo en que este parámetro captura las diferencias producto de cambios en la iluminación solar.

El análisis de las Figuras 2-5 y 2-6 muestra que los patrones espectrales multi-angulares de los sistemas arbolados analizados son separables (se les puede clasificar correctamente), si dejamos fijo el tipo de suelo como fondo de la vegetación. Esta evidencia experimental soporta la idea de utilizar información espectral multi-angular para una mejor discriminación de los tipos de vegetación naturales, particularmente los arbolados.

El caso de que el fondo de la vegetación varíe (caso normal), dejando fija la cantidad de vegetación, las Figuras 2-7 y 2-8 muestran que hay zonas de traslape de información (confusión en términos de clasificaciones), que hacen que no sea posible separar las señales usando la información espectral multi-angular. Esto se da particularmente para el caso de coberturas aéreas bajas y deja de presentarse cuando la cobertura aérea aumenta.



**Figura 2-7. Efecto del suelo en la diferenciación de fresno y pino montezumae.**



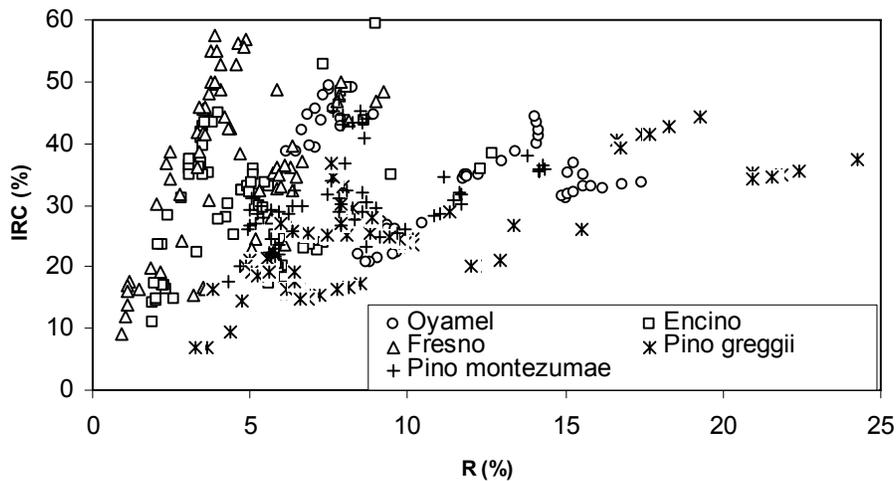
**Figura 2-8. Efecto del suelo en la diferenciación de encino y pino greggii.**

En las Figuras 2-7 y 2-8 se muestra que, independientemente del tipo de fondo (suelo) de la vegetación, los patrones espectrales angulares compactados de las especies analizadas muestran dos formas: cóncavos y convexos, definiendo así un camino de análisis de las señales espectrales multi-angulares, que puede usarse en forma similar a la propuesta por Pinty *et al.* (2002) y Gobron *et al.* (2002).

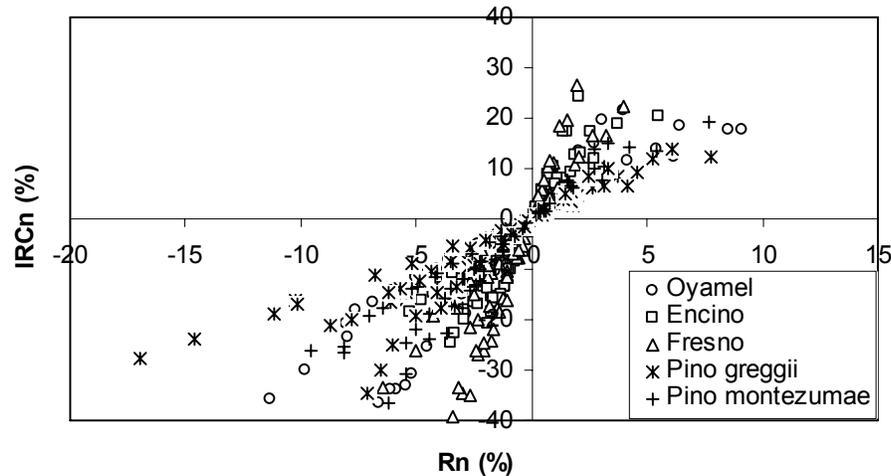
Para tener una perspectiva del problema de clasificación de sistemas arbolados usando un enfoque clásico espectral, en la Figura 2-9 se muestra el espacio del R-IRC para las especies analizadas (solo el caso de ángulos de visión contrarios al de

iluminación), teniendo como fondo un suelo claro y usando todas las coberturas aéreas analizadas por especie. Se observa de esta figura que hay importantes traslapes de información, por lo que la clasificación de especies resulta muy problemática.

En la Figura 2-10 se presenta la información de la Figura 2-9, pero utilizando reflectancias normalizadas, asociadas al modelo de la BRDF discutido. Se observa de esta figura que los patrones espectrales son más separables, usando algoritmos de discriminación basados en análisis angulares lineales, por lo que puede inferirse que con el formateo angular, normalización, de los espacios espectrales puede obtenerse una mejoría en las clasificaciones de la vegetación, cuando menos en los extremos.



**Figura 2-9. Espacio del R-IRC para las especies arbóreas analizadas**



**Figura 2-10. Espacio del Rn-IRCn para las especies arbóreas analizadas**

## CONCLUSIONES

En este trabajo se han analizado las diferentes aproximaciones de los sistemas de clasificación de la vegetación, basadas en el uso de los sensores remotos, como un medio para lograr clasificaciones operacionales de los sistemas de vegetación y se ha discutido sus resultados y limitaciones.

Partiendo de una discusión del uso de la información espectral multi-angular para clasificar y caracterizar a la vegetación, se han analizado las diferentes propuestas teóricas que soportan esta estrategia, así como los modelos de la función de distribución bidireccional de las reflectancias (BRDF).

Usando un modelo simplificado de la BRDF, dependiente de un sólo parámetro, se han analizado los resultados de un experimento de sistemas arbolados en maquetas, donde se realizaron mediciones de las reflectancias variando los ángulos cenitales de visión y de iluminación. El modelo ajustado de la BRDF resultó bastante bueno, para todas las bandas del sensor TM (Landsat 5).

La información del modelo de la BRDF fue compactada analizando las pendientes para las bandas del R e IRC, con el ángulo cenital solar implícito, de tal forma que se pudiera analizar los patrones de esta aproximación en función de la cobertura aérea de las cinco especies forestales analizadas. Los resultados mostraron que, dejando

el suelo del fondo de la vegetación fijo, las señales espectrales multi-angulares son separables, por lo que la estrategia propuesta puede usarse para clasificar sistemas arbolados. En el caso de que el suelo varíe (sus propiedades ópticas), entonces se presenta confusión en la información espectral multi-angular para el caso de coberturas aéreas bajas, reduciéndose este problema a medida que la cobertura aérea se incrementa.

### LITERATURA CITADA

- Asner, G.P. 2000. Contributions of multi-view angle remote sensing to land-surface and biogeochemical research, *Remote Sensing Reviews*, 1-26.
- Asrar G., R. Myneni, and B. Choudhury. 1992. Spatial heterogeneity in vegetation canopies and remote sensing of absorbed photosynthetically active radiation: A modeling study. *Remote Sensing of Environment*, 41: 85-103.
- Barnsley, M.J., D. Allison, and P. Lewis. 1997. On the information content of multiple view angle (MVA) images, *International Journal of Remote Sensing*, 18: 1937-1960.
- Bastiaanssen, W.G.M. 1998. Remote sensing in water resources management: The state of the art. International Water Management Institute. Colombo, Sri Lanka, 119 p.
- Bicheron P., M. Leroy, and F.M. Breon. 1997. Enhanced discrimination of boreal forest covers with directional reflectances from the airborne polarization and directionality of earth reflectances (POLDER) instrument, *Journal of Geophysics Research*, 102: 29517-29531.
- Bolaños, M., F. Paz, E. Palacios, E. Mejía, y A. Huete. 2007. Modelación de los efectos de la geometría sol-sensor en la reflectancia de la vegetación. *Agrociencia*, 41: 527-537.
- DeFries, R.S., and J.R.G. Townshend. 1994. NDVI-derived land cover classification at global scales. *International Journal of Remote Sensing*, 15:3567-3586.
- Diner, D.J., G.P. Asner., R. Davies., Y. Knyazhikin., J.P. Muller., A.W. Nolin., B. Pinty., C.B. Schaaf., and J. Stroeve. 1999. New directions in earth observing:

- scientific applications of multiangle remote sensing. *Bulletin of the Meteorological Society*, 80: 2209-228.
- Gobron N., B. Pinty., M.M. Verstraete., J.L. Widlowski., and D.J. Diner. 2002. Uniqueness of multiangular measurements – Part II: joint retrieval of vegetation structure and photosynthetic activity from MISR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40: 1574-1592.
- Goel, N.S. 1988. Models of vegetation canopy reflectance and their use in the estimation of biophysical parameters from reflectance data. *Remote Sensing Reviews*, 4: 1-222.
- Hapke, B. 1981. Bidirectional reflectance spectroscopy 1. Theory *Journal of Geophysics Research*, 86:3039-3054.
- Hyman, A.H., and M.J. Barnsley. 1997. On the potential for land cover mapping from multiple-view-angle (MVA) remotely-sensed images. *International Journal of Remote Sensing*, 18: 2471-2475.
- 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. *International Journal of Remote Sensing*, 6: 1271-1381.
- Kimes, D.S. 1983. Dynamics of directional reflectance factor distributions for vegetation canopies. *Applied Optics*, 22: 1364-1372.
- Knyazikhin Y., J.V. Martonchik., R.B. Myneni., D.J. Diner., and S.W. Running. 1998a. Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data. *Theory Journal of Gephysics Research*, 103: 32257-32275.
- Knyazikhin Y., J.V. Martonchik., D.J. Diner., R.B. Myneni., M. Verstraete., B. Pinty., and N. Gobron. 1998b. Estimation of vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from atmosphere-correct MISR data. *Theory Journal of Gephysics Research*, 103: 32239-32256.
- Li X, and A.H. Strahler. 1985. Geometrical-optical modeling of a conifer forest canopy. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 23:705-721.

- 
- 
- Li X, and A.H. Strahler. 1986. Geometrical-optical reflectance modeling of a conifer forest canopy. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 24:906-919.
- Li X, and A.H. Strahler. 1992. Geometrical-optical bidirectional reflectance modeling of the discrete crown vegetation canopy: effect of crown shape and mutual shadowing *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30:276-292.
- Lotsch A., Y. Tian., M.A. Friedl., and R.B. Myneni. 2003. Land cover mapping in support of LAI and FAPAR retrievals from EOS-MODIS and MISR: classification methods and sensitivities to errors. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 10, 1997-2016.
- Loveland, T. R., J. W. Merchant., J. F. Brown., D. O. Ohlen., B. C. Reed., P. Olsen., and J. Hutchinson. 1995. Seasonal Land Cover of the United States. *Annals of the Association of American Geographers*, 85, 2, 339-355.
- Lucht W., and J.L. Roujean. 2000. Considerations in the parametric modeling of BRDF and albedo from multiangle satellite sensor observations. *Remote Sensing Reviews*, 18:343-380.
- Miller, J.R., H.P. White., J.M. Chen., D.R. Peddle., G. McDermid., R.A. Fournier., P. Shepherd., I. Rubinstein., J. Freemantle., R. Soffer., and E. LeDrew. 1997. Seasonal change in understory reflectance of boreal forests and influence on canopy vegetation indices. *Journal of Geophysics Research*, 102: 29475-29482.
- Minnaert M. 1941. The reciprocity principle in lunar photometry. *Astrophysics Journal*, 93:403-410.
- Myneni, R.B., and D.L Williams. 1994. On the relationship between FAPAR and NDVI, *Remote Sensing of Environment*, 49: 200-211.
- Myneni R., G. Asrar., and F. Hall. 1992. A three dimensional radiative transfer method for optical remote sensing of vegetated land surfaces. *Remote Sensing of Environment*, 41: 105-121.
- Nemani R., and S. W. Running. 1997. Land cover characterization using multitemporal red, near-ir and thermal-ir data from NOAA/AVHRR. *Ecological Applications*, 7: 79-90.
- 
-

- Nicodemus, F.E., J.C. Richmond., J.J. Hsia., I.W. Ginsberg., and T. Limperis. 1977. Geometrical considerations and nomenclature for reflectance. NBS Monogr. No. 160, National Bureau of Standards, U.S. Department of Commerce, 52 p.
- Nolin, A.W. 2004. Towards retrieval of forest cover density over snow from the multi-angle imaging spectroradiometer (MISR). *Hydrological Processes*, 18: 3623-3636.
- Paz, F., E. Palacios, M. Bolaños, L.A. Palacios, M. Martínez, E. Mejía, y A. Huete. 2007. Diseño de un índice espectral de la vegetación: NDVIcp. *Agrociencia*, 41:539-554.
- Peltonieri, J.I., S. Kaasalainen., J. Näränen., M. Rautiainen., P. Stenberg., H. Smolander., S. Smolander., and P. Voipio. 2005. BRDF measurement of understory vegetation in pine forests. Dwarf shrubs, lichen, and moss. *Remote Sensing of Environment*, 94: 343-354.
- Pinty B., J.L. Widlowski., N. Gobron., M.M. Verstraete., and D.J. Diner. 2002. Uniqueness of multiangular measurements – Part I: an indicator of subpixel surface heterogeneity from MISR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40: 1560-1573.
- Rahman H., B. Pinty., and M.M. Verstraete. 1993. Coupled surface-atmosphere reflectance (CSAR) model 2. Semiempirical surfaces model usable with NOAA advanced very high resolution radiometer data. *Journal of Geophysics Research*, 98:20791-20801.
- Ranson, K.J., C.S.T. Daughtry., L.L. Biehl., and M.E. Bauer. 1985. Sun-view effects on reflectance factors of corn canopies. *Remote Sensing of Environment* 18:147-161.
- Ross, J. K. 1981. The radiation regime and architecture of plant stands. Dr. W. Junk Publishers, Norwell, Mass, 392 p.
- Roujeau, J.L., M. Leroy., and P.Y. Deschamps. 1992. A bidirectional reflectance model of the earth's surface for the correction of remote sensing data. *Journal of Geophysics Research*, 97: 20455-20468.

- Staylor, W.F., and J.T Suttles. 1986. Reflection and emission models for deserts derived from NIMBUS 7 ERB scanner measurements. *Journal of Climate Application Meteorology*, 25:196-202.
- Strahler, A.H., and D.L.B. Jupp. 1991. Modeling bidirectional reflectance of forests and woodlands using Boolean models and geometric optics. *Remote Sensing of Environment*, 34:153-166.
- Walthall, C.L., J.M. Norman., J.M. Welles., G. Campbell., and B. Blad. 1985. Simple equation to approximate the bidirectional reflectance from vegetation canopies and bare soil surfaces. *Applied Optics*, 24:383-387.
- Wanner W., X. Li., and A.H. Strahler. 1995. On the derivation of kernels for kernel-driven models of bidirectional reflectance. *Journal of Geophysics Research*, 100:21077-21089.
- Zhang Y., Y. Tian., R.B. Myneni., and Y. Knyazikhin. 2002a. Required consistency between biome definitions and signatures with the physics of remote sensing. I: empirical arguments. *Remote Sensing of Environment*, 80: 418-434.
- Zhang Y., N. Shabanov., Y. Knyazikhin., and R.B. Myneni. 2002b. Required consistency between biome definitions and signatures with the physics of remote sensing. II: theoretical arguments. *Remote Sensing of Environment*, 80: 435-446.

## CAPÍTULO III. FACTOR DE LA REFLECTANCIA BI-CÓNICA EN ESPECIES VEGETALES CONTRASTANTES: MODELACIÓN DE LOS ÁNGULOS CENITALES

### RESUMEN

La información multi-angular de las reflectancias de las clases de la vegetación natural ha sido planteada para su discriminación bajo diferentes enfoques de caracterización. Aunque en apariencia estos enfoques permiten definir en forma confiable firmas espectrales multi-angulares típicas, su uso generalizado no ha sido analizado. En este trabajo se presenta un modelo de los efectos del ángulo cenital de visión e iluminación en las reflectancias y se valida en un conjunto de experimentos de ocho especies vegetales contrastantes, suelo desnudo, bajo condiciones de iluminación-visión bi-cónicas (*Conical-Conical Reflectance Factor*, CCRF). Los resultados muestran que el modelo propuesto es robusto y confiable, por lo que puede usarse en forma operacional. Los análisis realizados para el efecto del suelo y la densidad de plantas muestran que hay importantes zonas de confusión (traslape de información) entre las especies al considerar efectos combinados, para diversas diferencias acimutales. Estos resultados ponen en duda el uso en forma generalizada de la información espectral multi-angular y sólo justifican este enfoque de clasificación si se dejan fijos el fondo de la vegetación y la densidad de plantas (cantidad de follaje).

**Palabras clave:** Clasificación, CCRF, modelación cenital, especies únicas, sensores remotos.

### INTRODUCCIÓN

Los sensores remotos a bordo de plataformas espaciales nos brindan la oportunidad para caracterizar y clasificar la vegetación natural en forma espacialmente continua y con tiempos de revisita al mismo sitio que van de horas hasta menos de un mes. De esta forma, la tecnología satelital ofrece un enorme potencial para obtener productos cartográficos de la vegetación a costos muy bajos y con la ventaja de obtener actualización en periodos de tiempo cortos. No obstante lo

anterior, las clasificaciones de la vegetación realizadas con sensores remotos todavía muestran problemas serios de estabilidad temporal y de confusión entre clases. Esta situación es mayormente producto de la utilización de enfoques empíricos de clasificación basados en supuestos, generalmente implícitos, que no son viables: homogeneidad espacial, temporal, angular, espectral; principalmente.

Uno de los sensores que ha sido más usado con fines de clasificar la vegetación es el AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), con resolución espacial a nadir de 1.1km, el cual ha estado disponible en diferentes versiones desde 1978. Actualmente, el sensor MODIS, resolución a nadir de 250, 500 y 1000m, en operación desde 2000 es usado intensivamente en el mapeo de la vegetación a escalas locales y globales. Ambos sensores son de barrido ancho, por lo que los píxeles en una escena son vistos con diferentes ángulos cenitales de visión e iluminación solar, generando un problema de geometría sol-sensor. La información multi-angular asociada a la vegetación, geometría sol-sensor, ha sido la base para el desarrollo de sensores operacionales, tales como el POLDER (*Polarization and Directionality of the Earth's Reflectances*), que tiene hasta 14 ángulos de observación y una resolución espacial de 7 km; el sensor ATSR-2 (*Along Track Scanning Radiometer*) con 2 ángulos de visión y una resolución de 1km; y, el sensor MISR, con 9 ángulos de visión y resolución espacial de 275 m a 1.1km.

Por el sistema de barrido de la superficie terrestre, los sensores AVHRR y MODIS introducen un efecto simultáneo de geometría sol-sensor y escala (el tamaño de los píxeles se incrementa con el ángulo de visión; esto es, los píxeles que se alejan de la línea orbital ortogonal a la superficie incrementan sus dimensiones producto de vistas oblicuas del sensor). En el otro extremo, el sensor MISR mantiene fijas las dimensiones de los píxeles a través de un muestreo de barrido temporal a lo largo de su línea orbital.

Los sistemas de clasificación basados en sensores remotos se han fundamentado en análisis de agrupaciones (Alvarez *et al.*, 2003), redes neuronales (Carpenter *et al.*, 1979), árboles de decisión (Running *et al.*, 1995; Friedl y Brodley, 1997) y reglas generadas por sistemas expertos (Daniels, 2006). En lo general, la evolución temporal de índices de vegetación como el NDVI o las reflectancias o temperaturas

radiativas es usada para mejorar las clasificaciones (DeFries y Townshed, 1994; Loveland *et al.*, 1995; Nemani y Running, 1997). Aunque interesantes estos enfoques, los resultados obtenidos no han sido lo suficientemente operacionales para usarse en forma confiable, por los problemas de confusión de clases que se presentan.

Un enfoque teórico de clasificación de la vegetación, actualmente operacional en los sensores MODIS y MISR, es el desarrollado por el grupo de la Universidad de Boston (Lotsch *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2002a y b), donde su base parte de una clasificación de tipos de vegetación usando propiedades radiativas y geométricas típicas de la mezcla suelo-vegetación para seis biomas distintivos en esos términos (Myneni *et al.*, 1997). Los biomas radiativamente definidos son usados para condicionar las extracciones de parámetros biofísicos usando información espectral (Knyazikhin *et al.*, 1998a y b). Aunque en el camino correcto, este enfoque usa simplificaciones muy fuertes (biomas tipo y propiedades asociadas con poca variación) que limitan su uso en términos operacionales a escalas locales o regionales.

Se ha argumentado que la información espectral multi-angular mejora las clasificaciones de la vegetación (Bicheron *et al.*, 1997; Asner, 2000; Diner *et al.*, 1999 y 2005). Barnsley *et al.* (1997) y Hyman y Barnsley (1997) muestran que el utilizar información multi-angular en una sola banda espectral, en la clasificación de la vegetación, da resultados similares a utilizar información de múltiples bandas espectrales con un sólo ángulo de visión; aunque estos autores reconocen que la separabilidad de clases de vegetación esta fuertemente influenciada por las diferencias a nivel espectral y, en menor medida, a nivel angular. Gerard (2003) plantea que el uso de un ángulo de visión, relacionado con la información a extraer, da resultados similares al uso de dos ángulos de visión.

En una perspectiva teórica y estadística, Zhang *et al.* (2002a y b), han argumentado que la clasificación de la vegetación debe basarse en principios de consistencia entre las propiedades radiativas de las clases y sus firmas espectrales distintivas, manteniendo fija la resolución espacial (problema de mezclas). Estos autores utilizan espacios espectrales (R o rojo e infrarrojo cercano o IRC, por

ejemplo), y muestran que las clases de vegetación (radiativamente diferentes) están diferenciadas en función de su localización en el espacio espectral y tres métricas: inclinación, longitud e intercepción de los patrones cuasi-lineales en ese espacio. Así, los argumentos de estos autores favorecen la hipótesis de firmas espectrales multi-angulares únicas para las clases de vegetación (los seis biomas definidos por Myneni *et al.*, 1997).

En este capítulo, se utiliza un modelo de la geometría sol-sensor muy compacto (un sólo parámetro) para analizar los patrones angulares de diferentes tipos de vegetación, contrastantes entre si, y revisar si la información espectral angular puede diferenciar las clases estudiadas.

### **Modelos espectrales multi-angulares**

Los objetos terrestres generalmente reflejan la energía solar en forma anisotrópica, de tal forma que esta señal angular puede ser usada para distinguir o clasificar los diferentes objetos en una escena con un satélite multi-angular. La caracterización de las mezclas suelo-vegetación ha sido estudiada experimentalmente por muchos autores (Kimes, 1983; Ranson *et al.*, 1985; Bolaños *et al.* 2007) y ha servido de base para plantear que la información espectral multi-angular puede ser usada para una mejor discriminación y caracterización de los cultivos y ecosistemas.

En la actualidad, los modelos de la función de distribución de la reflectancia bidireccional (BRDF, por sus siglas en inglés) más usado son los basados en *kernels* (funciones matemáticas) que combinan modelos de medios turbios y de óptica geométrica (Wanner *et al.*, 1995). Estos modelos semi-empíricos de kernels pueden ser lineales (Roujean *et al.*; 1992; Wanner *et al.*, 1995; Lucht y Roujean, 2000) o no lineales (Staylor y Suttles, 1986; Rahman *et al.*, 1993). Un modelo de la BRDF requiere de al menos tres parámetros (Engelson *et al.*, 1996): uno relacionado con la amplitud de la señal, otro que defina la dependencia con respecto a los ángulos cenitales solares y de visión y un último que tome en cuenta las variaciones acimutales. Ahora bien, si se requiere modelar en forma más fina los rasgos de la BRDF (pico de retro-iluminación o *Hot Spot* y el pico especular), es necesario incorporar más parámetros al modelo (Engelson *et al.*, 1996). En un caso de píxel

por píxel de una imagen satelital, los requerimientos de datos de los modelos actuales de la BRDF deben utilizar hipótesis restrictivas (homogeneidad temporal o espacial) para contar con información para caracterizar las BRDF.

La clasificación de la vegetación natural usando modelos de la BRDF ha sido realizada a través de los parámetros ajustados en dichos modelos. En el caso de los kernels lineales (isotrópicos, volumétricos y geométricos), los coeficientes ajustados han sido utilizados para buscar relaciones con la cobertura aérea y estructura de la vegetación (altura, composición, etc.) para diferentes tipos de vegetación (Gerard y North, 1997; Lovell y Graetz, 2002; Gao *et al.*, 2003). Aunque los resultados de estos estudios muestran relaciones congruentes, tendencias generales, entre los parámetros de los modelos de kernels lineales de la BRDF y la estructura de la vegetación, estos muestran confusión en las clasificaciones y errores de estimación altos en las variables asociadas a las clases de vegetación.

Usando el modelo no lineal de la BRDF de Rahman *et al.* (1993), Pinty *et al.* (2002) y Gobron *et al.* (2002) proponen que el parámetro  $k$  de este modelo puede ser usado para discriminar tipos de vegetación con fondos muy reflectivos (nieve o desierto), de tal manera que la forma de la BRDF puede ser caracterizada en función de que sea cóncava ( $k > 1$ ), convexa ( $k < 1$ ) o lineal ( $k = 1$ ).

Una alternativa al uso de los coeficientes de los modelos de *kernels* de la BRDF es el uso de índices espectrales angulares de la vegetación (Sandmeier *et al.*, 1998 y 1999; Lacaze *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2002a y b), que en algunos casos son contruidos de los coeficientes de los kernels (Gao *et al.*, 2003). Este tipo de enfoque presenta los mismos problemas que el caso de los coeficientes directos de los modelos de *kernels*.

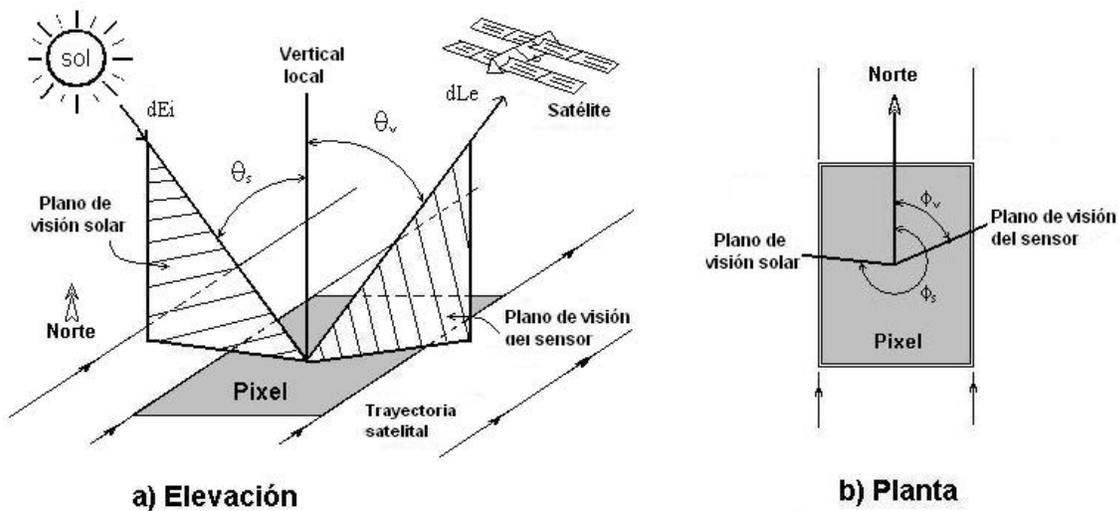
### **Modelación del ángulo cenital de iluminación y visión**

Recientemente se ha introducido una nueva familia de modelos de la BRDF que simplifican fuertemente el problema de modelación, ya que sólo requieren de un parámetro para su caracterización (Bolaños *et al.*, 2007). Este tipo de modelación es discutida en lo siguiente y es la base del análisis de los experimentos mostrados en este trabajo.

La BRDF de una pequeña superficie de área  $\delta A$  esta definida como la razón de la radianza incremental dejando la superficie a través de un ángulo sólido infinitesimal en la dirección definida por el vector de visión  $\Omega$  ( $\theta_v, \phi_v$ ), sobre la irradiancia incremental de la dirección definida por el vector de iluminación,  $\Omega'$  ( $\theta_s, \phi_s$ ), (Nicodemus *et al.*, 1977), tal como se define en la Ecuación 3-1 y se muestra en la Figura 3-1.

$$BRDF(\theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v) = \frac{dLe(\theta_v, \phi_v)}{dEi(\theta_s, \phi_s)}, \text{ en sr}^{-1} \quad (3-1)$$

donde  $dLe$  es la radianza incremental reflejada desde la superficie en la dirección del ángulo de visión  $\Omega$  ( $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ ),  $dEi$  es la irradiancia incremental que llega desde la dirección de iluminación  $\Omega'$  ( $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ ),  $\theta_s$  es el ángulo cenital solar,  $\phi_s$  es el ángulo acimutal solar,  $\theta_v$  es el ángulo cenital de visión y  $\phi_v$  el ángulo acimutal de visión.



**Figura 3-1. Geometría sol-sensor de iluminación y visión.**

El modelo de Bolaños *et al.* (2007) utiliza un plano de simetría para el IRC, de tal forma que los patrones angulares de la reflectancia se simplifican y pueden modelarse con un solo parámetro. Este modelo no fue aplicable a la banda del R.

Para desarrollar un modelo general de la BRDF aplicable a todas las bandas espectrales, se utilizó un plano de simetría genérico propuesto por Paz y Bolaños

(2006). El plano de simetría seleccionado fue  $\chi = 90 - \theta_v + \theta_s$ , donde  $\theta_v$  no tiene signo. Las reflectancias normalizadas están definidas como  $R_n = R \cos(\chi)$  (más adelante se utiliza  $R$  para referirse a sólo la banda del rojo). El modelo propuesto para todas las bandas del espectro electromagnético de onda corta es un modelo lineal simple:

$$\chi = a + bR_n \quad (3-2)$$

donde se utiliza un valor de  $a = 90$  para obtener un punto adicional y poder estimar  $b$  usando un esquema similar al del IRC del modelo de Bolaños *et al.* (2007). El uso de la función  $\cos(\chi)$  como factor multiplicativo de  $R$  permite definir un punto del patrón  $R_n - \chi$ , ya que  $\cos(90^\circ) = 0$ , por lo que  $R_n = 0$  en  $\chi = 90^\circ$  ( $\theta_v = \theta_s$ ; es decir, el plano del *Hot Spot*).

### EXPERIMENTOS BAJO CONDICIONES CONTROLADAS DE LABORATORIO

La discriminación de clases de vegetación usando información espectral multi-angular fue analizada usando un experimento bajo condiciones controladas de laboratorio, donde se simularon diferentes configuraciones geométricas de especies vegetales contrastantes. Para esto se utilizaron plantas pequeñas en las especies arbóreas y arbustivas; y plantas adultas para pastizales, después de podarse. En el Cuadro 3-1 se muestran las características principales de las plantas usadas en los experimentos, donde están consideradas especies con diferentes tipos de hoja.

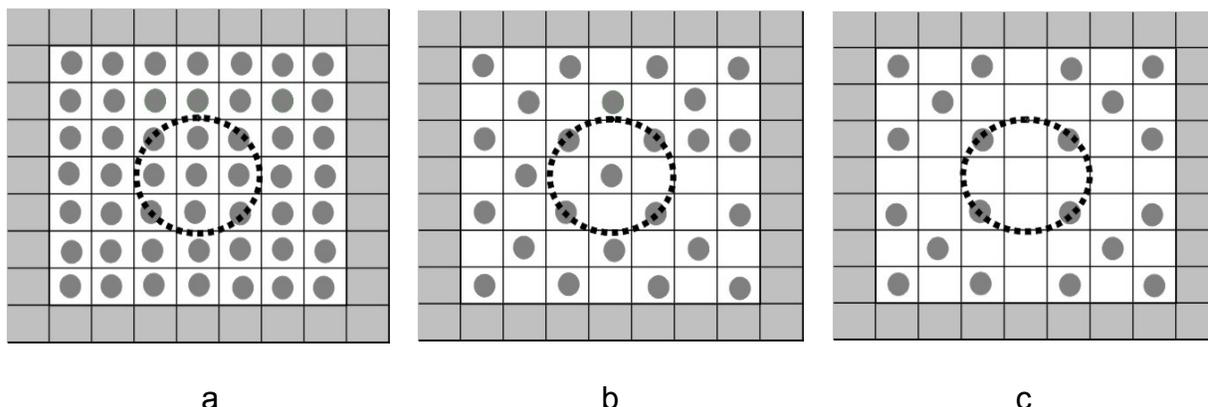
**CUADRO 3-1. CARACTERÍSTICAS DE LAS ESPECIES FORESTALES USADAS EN EL EXPERIMENTO**

Nombre científico	Nombre común	Tipo de hoja	Altura* (cm)	Diámetro del tallo* (cm)	Diámetro del dosel* (cm)
<i>Abies religiosa</i>	Oyamel	Aciculada	34.34 (5.33)	0.70 (0.14)	24.26 (6.44)
<i>Acacia retinodes</i>	Mimosa	Latifoliada	38.88 (7.80)	0.64 (0.15)	26.09 (6.17)
<i>Casuarina equisetifolia</i>	Casuarina	Aciculada	36.67 (3.85)	0.64 (0.17)	23.87 (5.97)
<i>Quercus rugosa</i>	Encino	Latifoliada	33.83 (6.45)	0.60 (0.27)	20.17 (5.05)
<i>Fraxinus uhdei</i>	Fresno	Latifoliada	31.08 (5.11)	0.60 (0.14)	20.74 (4.30)
<i>Eysenhardtia polystachya</i>	Palo dulce	Microlatifoliada	25.29 (10.7)	1.99 (1.42)	15.90 (5.17)
<i>Pinus greggii</i>	Pino	Aciculada	33.49 (4.35)	0.60 (0.09)	14.13 (2.29)
<i>Bouteloa gracilis</i>	Navajita	Lineal	18.31 (3.20)	2.55 (1.17)	14.02 (4.73)

\* Los datos entre paréntesis son las desviaciones estándar.

Las plantas individuales de cada especie, dentro de bolsas de plástico y sin estrés, fueron acomodadas en tres densidades de acuerdo a los arreglos mostrados en la Figura 3-2. Los arreglos de plantas fueron colocados en un cajón de madera de dimensiones de 1.5m x 1.5m, con un sistema de mallas de 15cm x15cm para la colocación de las plantas individuales en bolsas de plástico, de tal manera que no se inclinaran al apoyarse sobre el fondo del cajón.

Para analizar el efecto del fondo de los arreglos de plantas, arriba de la malla superior del cajón se colocaron tiras de madera a la altura del inicio de los tallos de las plantas y sobre estas tiras, selladas en los tallos, se colocó suelo previamente seleccionado y con una granulometría menor a 2mm.



**Figura 3-2. Densidades usadas: a) alta (49 plantas), b) media (25 plantas) y c) baja (12 plantas). Cada círculo relleno representa la posición de una planta y los cuadros perimetrales rellenos sólo contienen suelo. El círculo mostrado al centro de los cuadros es el área de visión del sensor hiperespectral con un ángulo de visión a nadir.**

El cajón de madera conteniendo a los arreglos de plantas forma parte del sistema goniométrico (SIGO-CP) de medición de reflectancias multi-angulares diseñado (Anexo B). A nadir, el radiómetro hiperespectral (350 a 2,500nm) usado (modelo FR Jr de ASD<sup>MR</sup>) mide una área circular de diámetro 0.41m. El radiómetro tiene un campo instantáneo de visión de 25° ( $\alpha = 12.5^\circ$ , ver Figura 3-3). Adicionalmente al radiómetro, se montó en el SIGO-CP una cámara fotográfica digital (Cybershot DSC-V1 de Sony<sup>MR</sup>) y un termómetro radiativo (modelo ITRS de Apogee<sup>MR</sup>). Estos instrumentos fueron usados para realizar mediciones cenitales a intervalos de 10°, desde 0° a 60° en las direcciones acimutales de 0° a 350°, con intervalos de 10°. La

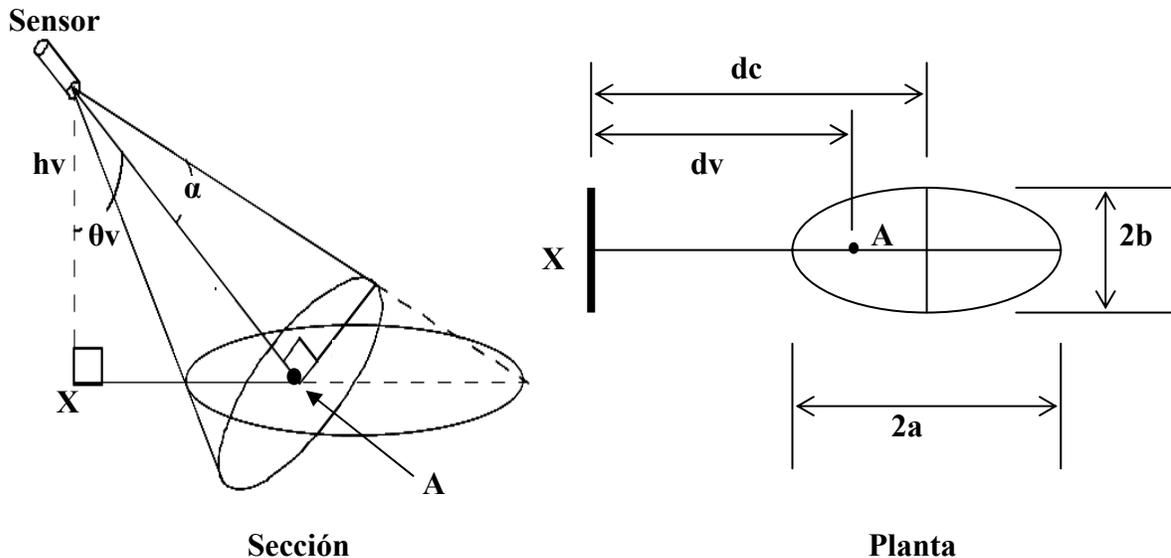
dirección acimutal de 0-360° de medición coincide con el acimut de la fuente de iluminación, por lo que las direcciones acimutales representan en realidad diferencias acimutales en la convención de 0-360°.

La fuente de iluminación utilizada es un reflector de aluminio de cuerpo negro de la marca Tecno Lite<sup>MR</sup> equipado con una lámpara de halógeno de cuarzo de 500 watts de la marca Osram<sup>MR</sup> (modelo 64706). Los filamentos de estas lámparas son de tungsteno y el vidrio que recubre el filamento esta hecho de cuarzo, siendo el halógeno el gas que rellena el tubo o bombilla. La lámpara se montó en una base telescópica elevada a 3m y su ángulo cenital ( $\theta_s$ ) fue de 38°. Estas condiciones de iluminación fueron mantenidas constantes para todas las mediciones de las especies vegetales analizadas.

Las propiedades ópticas de los fondos de los arreglos de plantas contribuyen a la BRDF del sistema suelo-vegetación. Por ejemplo, en los bosques el fondo varía estacionalmente (Miller *et al.*, 1997) y tiene su propia función BRDF (Peltonieri *et al.*, 2005). Así, en cada arreglo de plantas por especie vegetal se consideró el uso de dos fondos: suelo claro (franco arenoso) y oscuro (franco arcilloso).

Los suelos fueron colocados sobre las tiras de madera a la altura del inicio de los tallos de las plantas, con un espesor de 1cm. En cada suelo se consideraron dos condiciones de humedad: suelo secado a la intemperie y suelo húmedo, producto de un evento de precipitación. Para este último caso se utilizó un simulador de lluvias tipo Morín (Morín *et al.*, 1967), donde el cajón del SIGO-CP con el arreglo de plantas se transportó a la base del simulador, en la misma área experimental, y se le aplicó un evento de precipitación con un disco de 75mm durante 5 minutos con la llave del simulador abierta al máximo, lo cual aporta una lamina de precipitación de 8.3mm. El evento de precipitación fue utilizado para analizar el efecto de lluvias en el suelo del fondo de la vegetación, inmediatamente después del evento. La reflectancia del suelo después de aplicar un evento de precipitación se incrementa en proporción a la energía de las gotas de lluvia (Goldshleger *et al.*, 2002). Adicionalmente, tal como se discute más adelante, el agua residual en las hojas de las plantas introduce errores en las mediciones del sistema suelo-vegetación, por lo cual los patrones de su BRDF resultan más erráticos que los de suelo secos.

En la Figura 3-3 se muestra la geometría de medición para el radiómetro montado en el arco cenital del SIGO-CP (Anexo B), donde el área de visión para ángulos cenitales diferentes a nadir forma una elipse, cuyo centro esta desplazado del centro del cajón una distancia  $d_{pc} = d_c - d_v$ . En el Cuadro 3-2 se muestran las configuraciones geométricas asociadas a las mediciones cenitales de visión del arreglo de plantas.



**Figura 3-3. Geometría de medición del radiómetro montado en el arco cenital de SIGO-CP.**

**CUADRO 3-2. CONFIGURACIONES GEOMÉTRICAS ASOCIADAS A LOS ÁNGULOS CENITALES DE VISIÓN**

$\theta_v$ nominal (°)	$\theta_v$ real (°)	$h_v$ (cm)	$d_v$ (cm)	$d_c$ (cm)	$2a$ (cm)	$2b$ (cm)	$d_{pc}$ (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )
0.0	0.0	93.0	0.0	0.0	41.2	41.2	0.0	1335.5
10.0	10.0	87.7	15.4	16.2	40.1	39.5	0.8	1245.7
20.0	19.2	80.3	27.9	29.5	40.1	37.9	1.5	1195.5
30.0	28.1	69.2	37.0	39.4	40.0	35.3	2.4	1110.2
40.0	37.6	53.1	40.9	44.2	38.6	30.6	3.3	928.6
50.0	46.5	36.8	38.8	43.1	36.5	25.1	4.3	719.6
60.0	55.7	19.2	28.1	33.0	29.9	16.9	4.9	397.3

Considerando que el SIGO-CP tiene un grado de libertad adicional al acimutal y cenital, relacionado con el desplazamiento radial del sensor del radiómetro, se

---

---

diseño una estrategia de adquisición de datos muestrales dentro del área global de medición de 41.2cm x 41.2cm (2a x 2b del Cuadro 3-2). En el caso de  $\theta_v = 60^\circ$ , el sensor quedo muy cerca de la vegetación, produciendo errores de medición, por lo cual este ángulo no fue considerado en la modelación de la función BRDF asociada a cada arreglo de plantas y fondo usado.

En términos de la definición de la BRDF (Nicodemus *et al.*, 1977), esta implica ángulos sólidos infinitesimales por lo que no puede ser medida en la práctica. El arreglo de medición de reflectancias en condiciones de laboratorio discutido anteriormente implica la caracterización de los factores de reflectancia bi-cónicos o cónico-cónico (CCRF por su siglas en inglés) (Nicodemus *et al.*, 1977; Schaepman-Strub *et al.*, 2006), donde el término cónico es usado para el ángulo sólido (iluminación y visión), similar al mostrado en la Figura 3-3. Las mediciones de reflectancia del radiómetro hiperespectral se refieren en realidad a factores de reflectancia, los cuales son calculados en función de las propiedades ópticas de un panel de referencia (ASD, 1999).

El área del experimento fue aislada con paños de tela negra y el techo pintado de negro, para evitar contribuciones de radiación difusa y aproximar una fuente de iluminación con un ángulo cónico de sólo radiación directa.

Ahora bien, de la Figura 3-3 y Cuadro 3-2, la CCRF medida incorpora factores de escala (áreas de medición diferentes en función del ángulo cenital de visión), por lo que debe usarse una definición generalizada que considere la parte espacial del área de medición (Di Girolamo, 2003). Los cambios en las dimensiones de los píxeles con los ángulos de visión se presentan en los sensores AVHRR y MODIS, por lo que es importante considerar en forma explícita esta situación. En este caso, considerando una relación exponencial entre las reflectancias y los IAF (Ross, 1981) - como elementos de escala, se utilizó una nueva definición de reflectancias normalizadas:  $R_n = \log(R)\cos(\chi)$ , dejando igual el modelo de la BRDF (CCRF).

El procedimiento general de determinación de los factores de reflectancia para cada especie en particular consistió de los siguientes pasos:

- a. Colocación del arreglo de densidad alta de plantas en el cajón de madera del SIGO-CP.

- b. Colocación del suelo (oscuro o claro) del fondo de los arreglos de plantas.
- c. Optimización del radiómetro con el panel de referencia colocado a nadir (ASD, 1999).
- d. Realizar el conjunto de mediciones de reflectancia en relación a los ángulos acimutales y cenitales.
- e. Aplicar evento de precipitación al suelo usando el simulador de lluvia.
- f. Optimización del radiómetro con el panel de referencia colocado a nadir.
- g. Realizar el conjunto de mediciones de reflectancia en relación a los ángulos acimutales y cenitales.
- h. Retirar el suelo mojado y colocar el otro suelo.
- i. Repetir todo el proceso para el nuevo suelo (a - h)
- j. Retirar el nuevo suelo.
- k. Retirar plantas de acuerdo a la Figura 3-2 para establecer la densidad media
- l. Colocar el suelo inicial y repetir todo el proceso (a - k)
- m. Retirar plantas para establecer la densidad baja.
- n. Repetir todo el proceso (a - m).

Adicionalmente, se realizaron conjuntos completos de mediciones para el caso de suelo desnudo (suelos claro y oscuro, en condiciones secas y mojadas al aplicar un evento de precipitación con el simulador de lluvias). En cada conjunto de medición del arreglo de plantas de las especies se tomaron fotografías digitales para estimar la cobertura aérea (COB) usando un proceso de clasificación supervisada.

Finalmente, las mediciones de reflectancia generadas (archivo de 350 a 2,500 nm, remuestreado a intervalos de 2nm) fueron convertidas a las reflectancias de las bandas del sensor Landsat 5 usando las funciones de respuesta correspondientes. Por problemas relacionados a efectos de la atmósfera del área del experimento (vapor de agua) y de estabilidad del radiómetro, las bandas del azul y del infrarrojo medio no fueron analizadas y sólo los resultados de las bandas del verde (V), rojo (R) e infrarrojo cercano (IRC) son presentados en lo siguiente.

Los datos generados en el experimento fueron guardados en archivos etiquetados con 4 dígitos: especie vegetal, densidad del arreglo de plantas, color del suelo y

humedad del suelo. El Cuadro 3-3 muestra la codificación usada. Así, un código 2121 significa especie Acacia, densidad alta, color oscuro y seco.

**CUADRO 3-3. CODIFICACIÓN DE LOS ARCHIVOS DEL EXPERIMENTO.**

Nombre común especie	Código	Densidad plantas	Código	Color del suelo	Código	Humedad del suelo	Código
Suelo	0	Nula	0	Claro	1	Seco	1
Oyamel	1	Alta	1	Oscuro	2	Mojado	2
Mimosa	2	Media	2				
Casuarina	3	Baja	3				
Encino	4						
Fresno	5						
Palo dulce	6						
Pino	7						
Navajita	8						

En el caso de las coberturas aéreas, el Cuadro 3-4 muestra las estimaciones realizadas en las fotografías digitales, donde COB global se refiere a la cobertura de todo el cuadro de medición (sin los cuadros del borde) del cajón del SIGO-CP y COB local nadir es la cobertura del área del círculo de medición del radiómetro a nadir (41.2cm de diámetro).

### Patrones angulares de la CCRF de los experimentos

Con fines de visualización se construyeron diagramas de reflectancias en función de los ángulos cenitales y acimutales de observación. En el caso de los ángulos cenitales se usó la convención de que los ángulos son negativos en la dirección de iluminación y positivos en la contraria (ángulos acimutales de visión positivos en el sentido contrario a las manecillas del reloj):

$$\begin{aligned} \theta_v &= -\theta_v, \text{ si } \left\{ \begin{array}{l} 0 \leq \text{abs}(d\phi) \leq 90 \\ 270 \leq \text{abs}(d\phi) \leq 360 \end{array} \right\} \\ \theta_v &= +\theta_v, \text{ si } \{90 < \text{abs}(d\phi) < 270\} \\ d\phi &= (\phi_v - \phi_s) \end{aligned} \tag{3-3}$$

Para el caso del acimut relativo el signo positivo es para los cuadrantes a la derecha acimutal (diferencia de 0° a 180°) y el negativo para la dirección contraria, en una convención de diferencias de 0° a 90°

$$\begin{aligned}
 d\phi &= d\phi, \text{ si } d\phi < 90 \\
 d\phi &= 180 - d\phi, \text{ si } 90 \leq d\phi \leq 270 \\
 d\phi &= d\phi - 360, \text{ si } 270 < d\phi \leq 360
 \end{aligned}
 \tag{3-4}$$

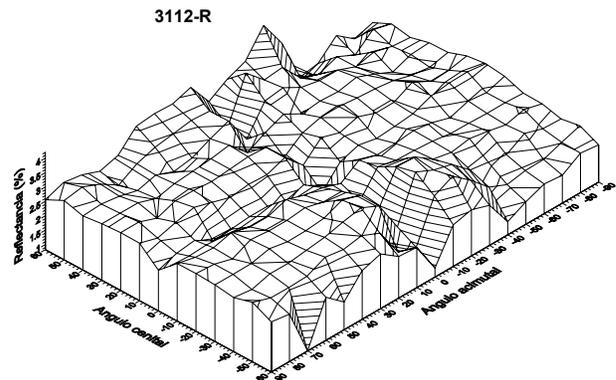
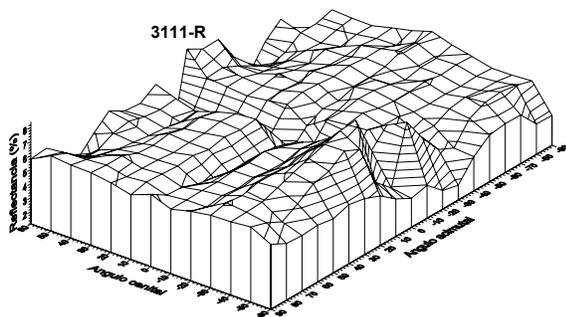
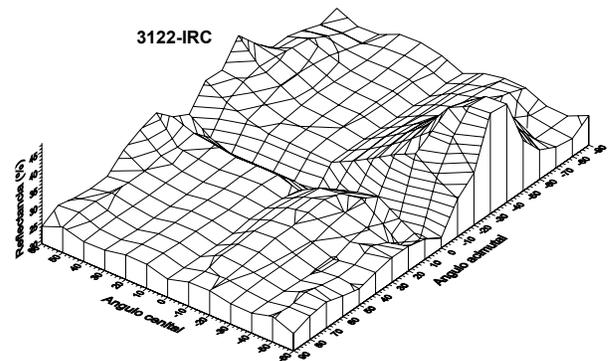
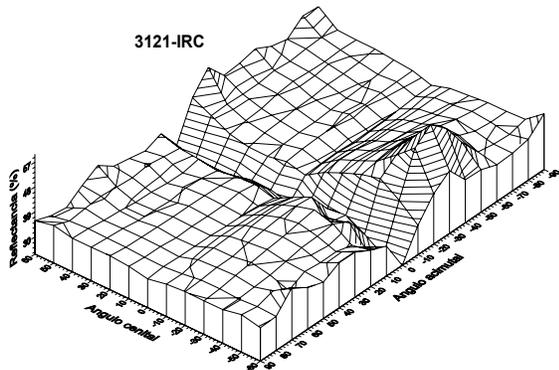
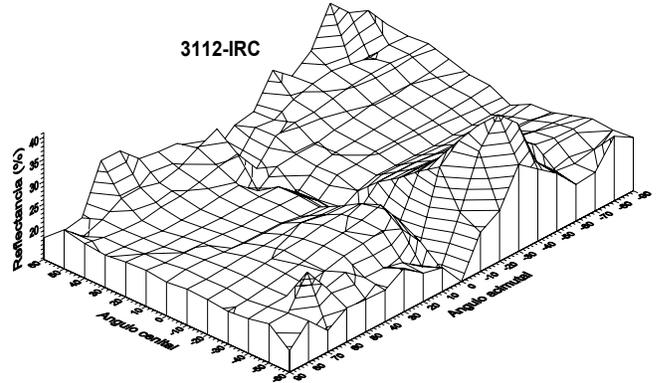
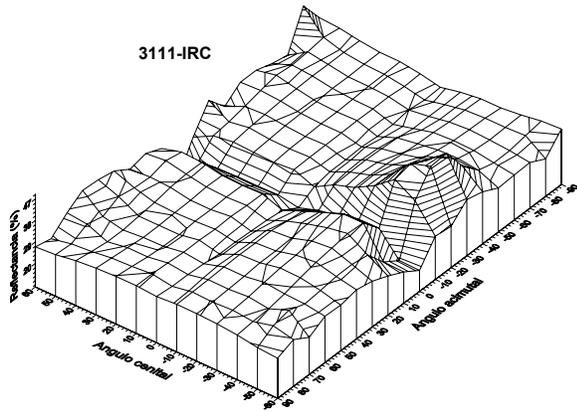
**CUADRO 3-4. COBERTURAS AÉREAS ASOCIADAS A LAS DENSIDADES DE PLANTAS**

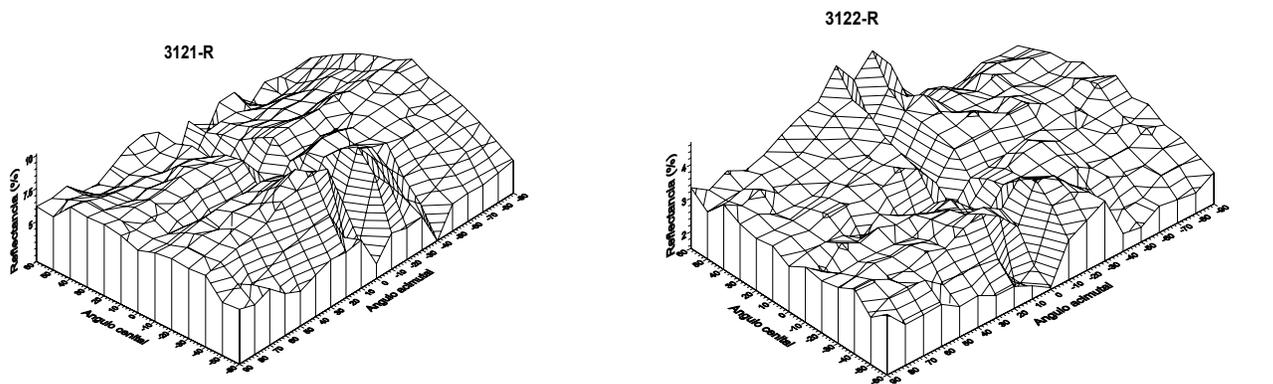
Código	Nombre Común Especie	Densidad	COB Global (%)	COB Local Nadir (%)
11	Oyamel	Alta	60.9	71.2
12	Oyamel	Media	37.1	56.3
13	Oyamel	Baja	25.0	28.2
21	Mimosa	Alta	56.2	65.5
22	Mimosa	Media	36.6	38.0
23	Mimosa	Baja	25.7	24.1
31	Casuarina	Alta	71.3	50.1
32	Casuarina	Media	30.6	33.5
33	Casuarina	Baja	25.5	18.0
41	Encino	Alta	74.0	68.8
42	Encino	Media	43.0	45.2
43	Encino	Baja	31.2	27.7
51	Fresno	Alta	60.8	61.3
52	Fresno	Media	37.3	40.4
53	Fresno	Baja	21.7	25.3
61	Palo Dulce	Alta	45.7	41.3
62	Palo Dulce	Media	28.6	21.0
63	Palo Dulce	Baja	20.7	11.0
71	Pino	Alta	53.1	55.6
72	Pino	Media	23.3	26.9
73	Pino	Baja	12.2	11.4
81	Navajita	Alta	26.6	44.3
82	Navajita	Media	30.5	30.2
83	Navajita	Baja	18.0	18.4
00	Suelo	Nula	0.0	0.0

La Figura 3-4 muestra el efecto del tipo de suelo (claro y oscuro) y su condición de humedad (seco y mojado) para las reflectancias de la banda del R e IRC para la especie Casuarina. Se observa de esta figura que las propiedades ópticas del suelo de fondo de la vegetación generan algunos cambios en los patrones multi-angulares de las reflectancias.

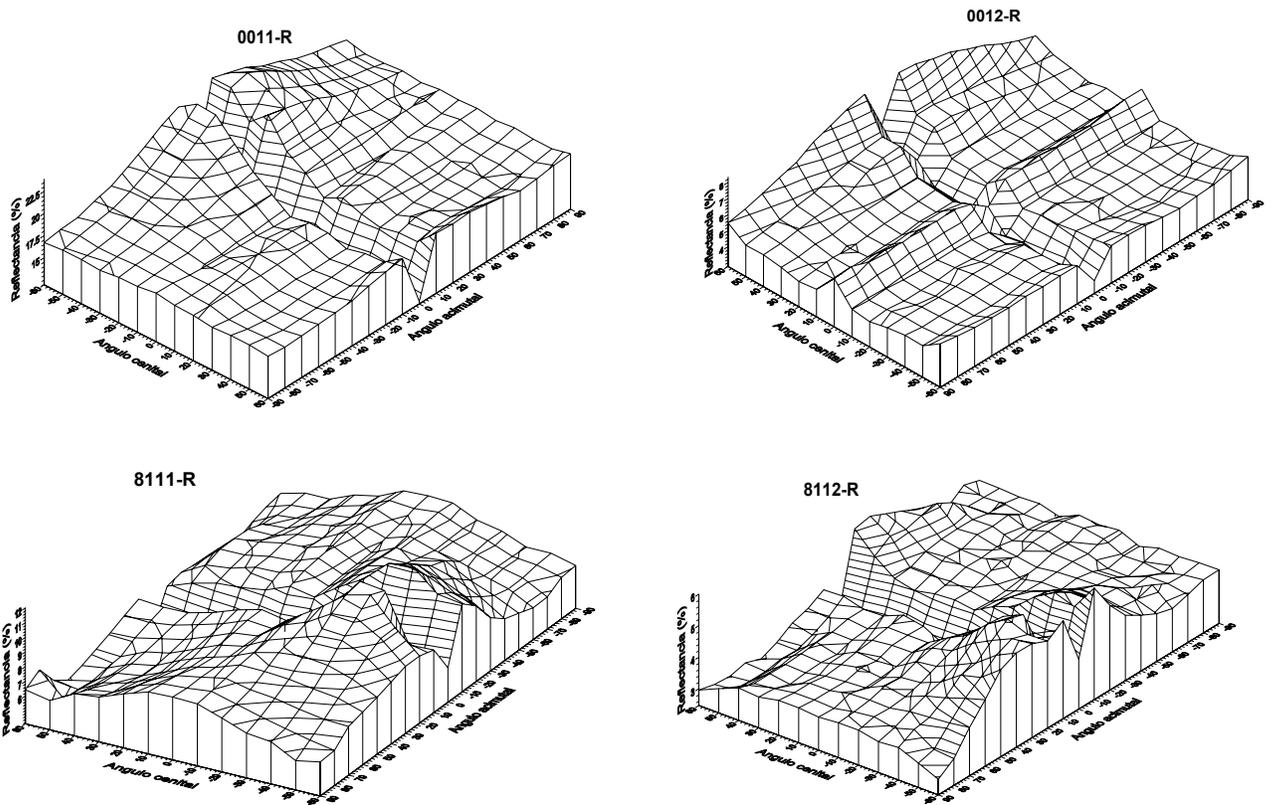
En la Figura 3-5 se muestra el efecto en la reflectancia del R al cambio en la humedad del suelo para el caso de un suelo claro y la cobertura aérea (densidad de plantas) para el pasto Navajita. Resulta claro que la CCRF es dependiente de estos factores. Finalmente, en la Figura 3-6 se muestra la CCRF en la banda del R para

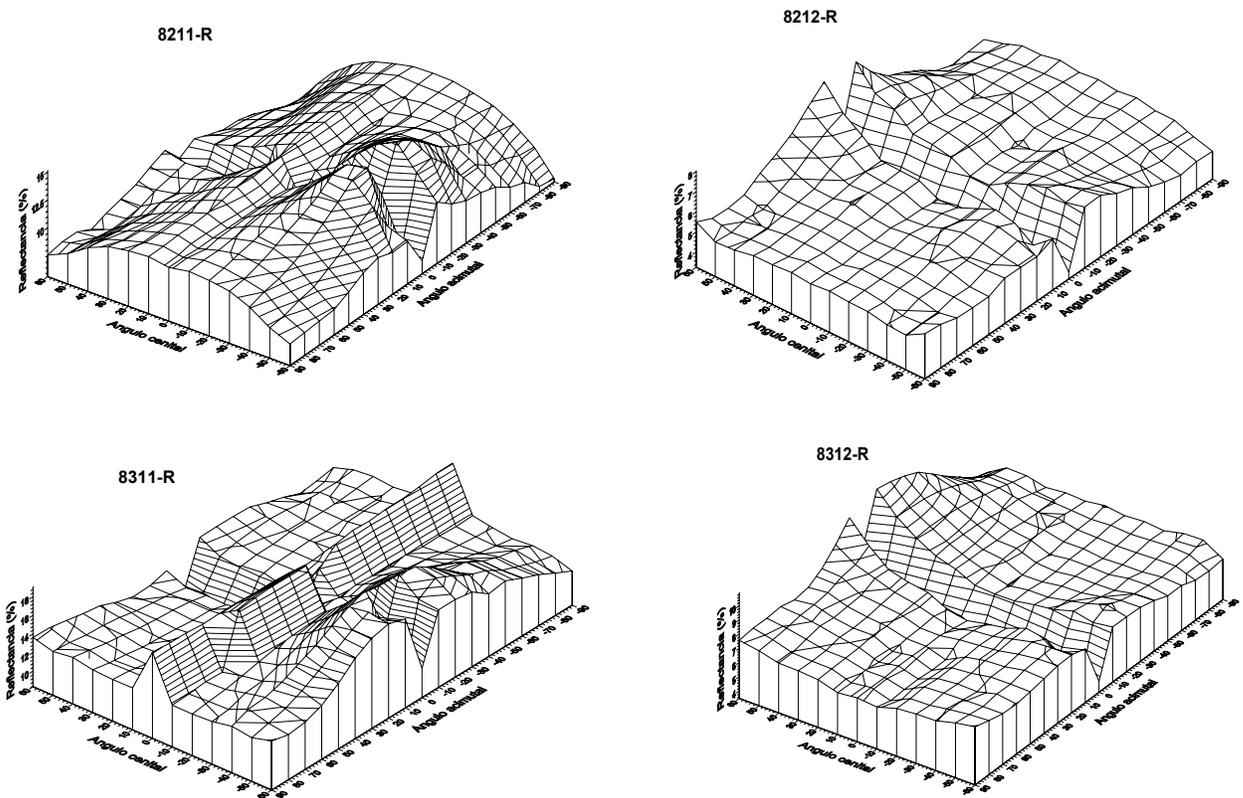
todas las especies analizadas, dentro de un rango de cobertura aérea local a nadir de 18 al 28 %. Los gráficos muestran diferencias entre las especies (mismo suelo: claro y seco), que permiten clasificarlas a priori.



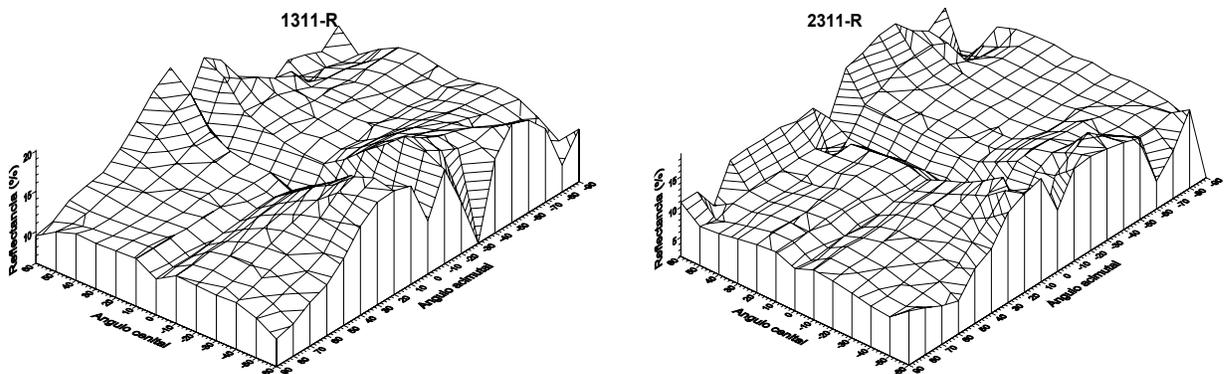


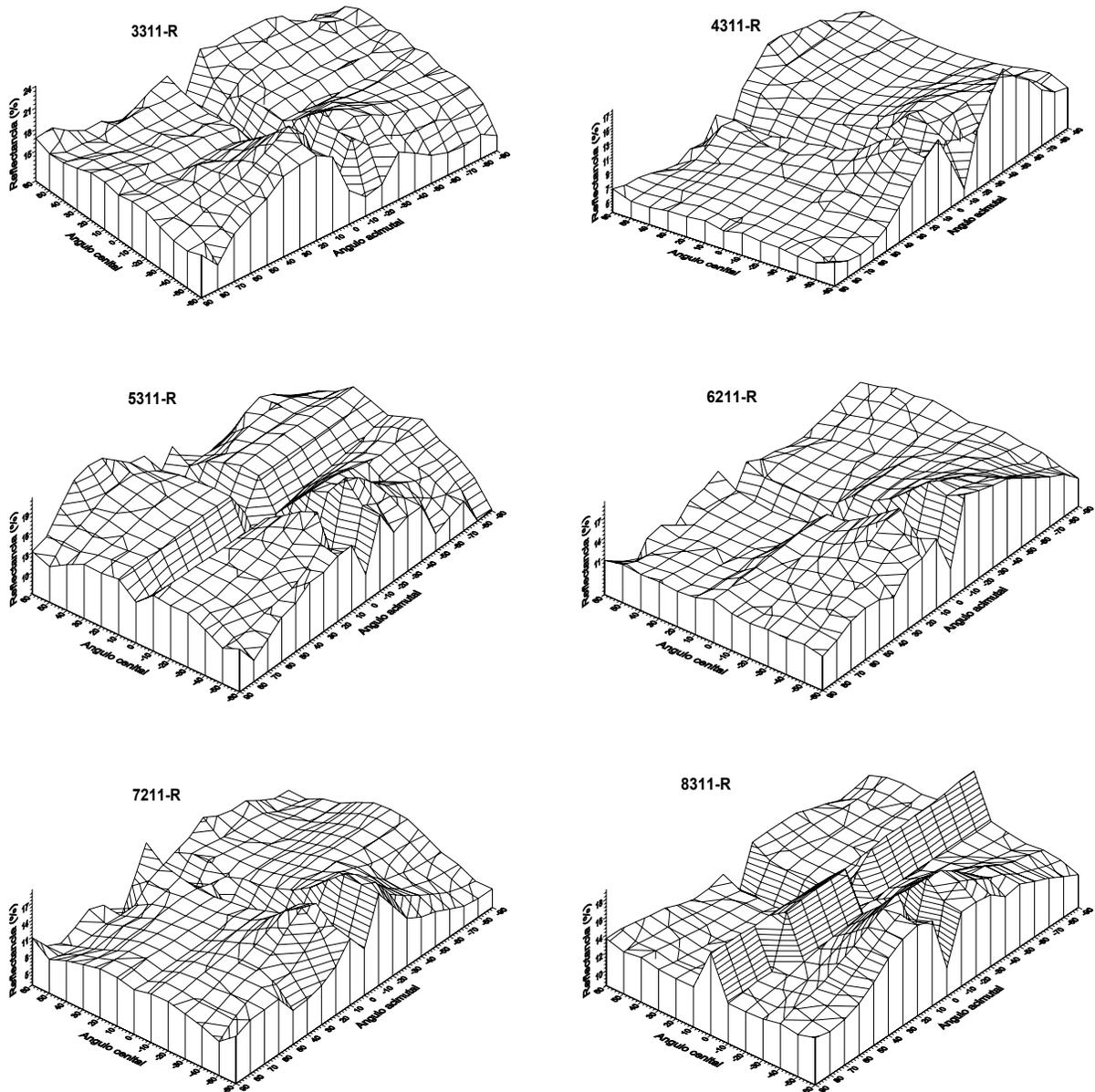
**Figura 3-4. CCRF para las reflectancias de las bandas del R e IRC para diferentes propiedades ópticas del suelo de la especie Casuarina.**





**Figura 3-5. CCRF para las reflectancias del R para un suelo claro seco y mojado, para diferentes cobertura aéreas (densidad de plantas) para el pasto Navajita.**





**Figura 3-6. CCRF para las reflectancias del R para un suelo claro seco para todas las especies analizadas, dentro de una cobertura aérea del 18 al 28 %.**

De las figuras anteriores resulta claro que para discriminar las especies es necesario definir una diferencia acimutal particular, así como un fondo específico y una cobertura aérea o índice de área foliar. Para poder compactar la información multi-angular de las reflectancias, se ajustó el modelo de la ecuación (3-2) con  $a = 90$  y la transformación logarítmica para el efecto de escala. La Figura 3-7 muestra los

resultados obtenidos para las bandas del V, R e IRC. El Error Relativo Medio (ERM), en %, esta definido por:

$$ERM = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{R_{med} - Rest}{R_{med}} \right] \right\} \times 100 \quad (3-5)$$

donde med se refiere a medida, est a estimada y R a reflectancia de la banda del V, R e IRC.

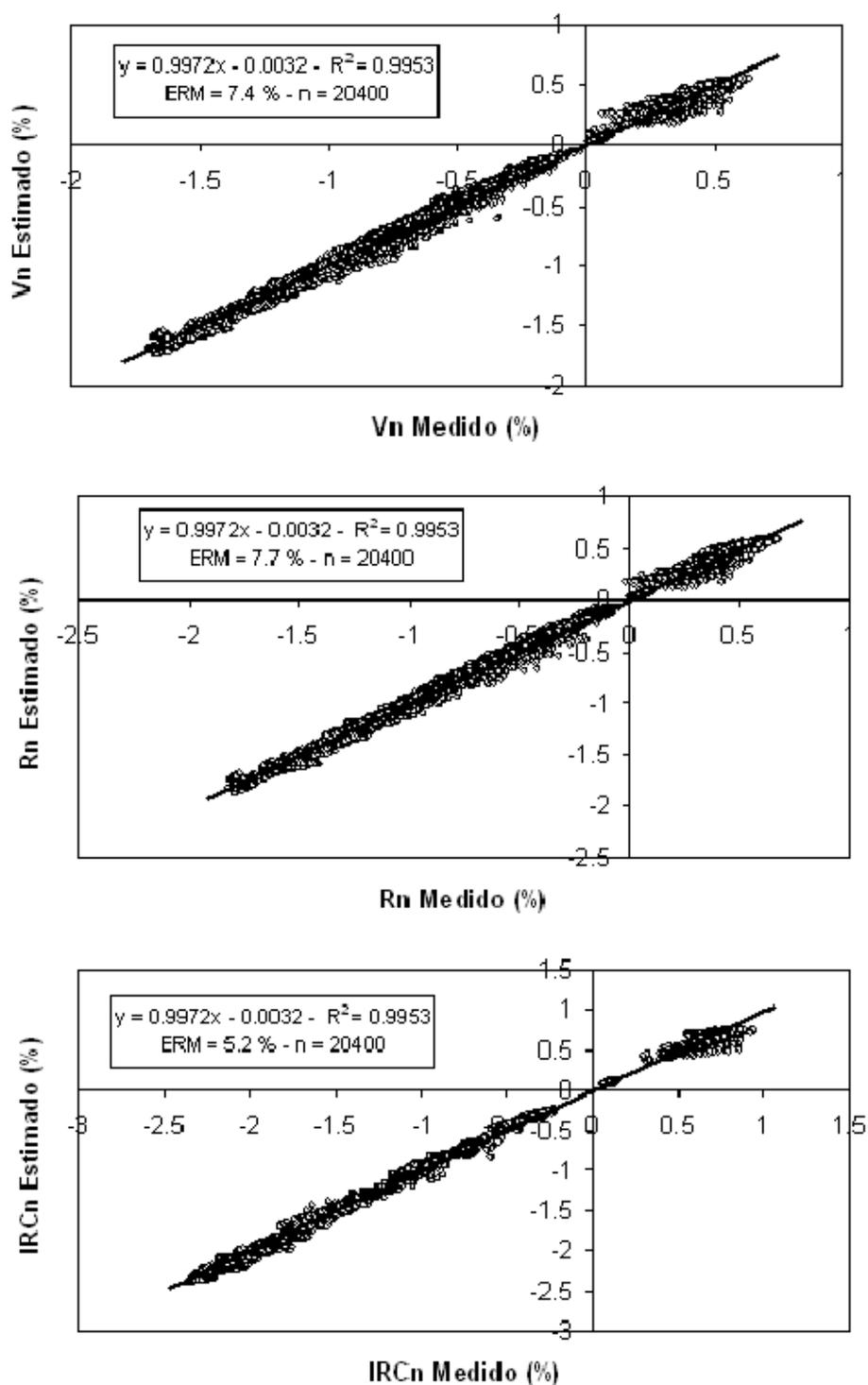
Los resultados mostrados en la Figura 3-7 indican que el modelo multi-angular de la reflectancia por efectos de los ángulos cenitales de iluminación y visión resulta en ajustes bastante buenos para todas las 8 especies y suelos analizados, con errores relativos menores al 8%.

Los ajustes del modelo multi-angular fueron realizados sin considerar el ángulo de visión a 60°, por problemas de representatividad y de cercanía a los arreglos de plantas.

La Figura 3-8 muestra un gráfico polar para el parámetro b de la reflectancia del R, para las especies contrastantes encino y pino, con fondos de suelos claro y oscuro, cada uno en condición seca y húmeda, para tres densidades de arreglos de plantas.

Una forma de visualizar el efecto del fondo de la vegetación para especies contrastantes es el uso de un gráfico acimutal de b. La Figura 3-9 muestra esta situación para un suelo claro en condición seca y mojada, para las especies encino-pino y palo dulce-navajita. En esta figura se omitieron el acimut de 0° y 180°, dado que el radiómetro sombrea el área de visión.

Del análisis de la Figura 3-9, es claro que los cambios en las propiedades ópticas (humedad, en este caso) del fondo de la vegetación pueden resultar en confusión en la discriminación de especies tan contrastantes como las mostradas, dejando en claro que la información multi-angular, sin una referencia común, no es suficiente para clasificar la vegetación natural.



**Figura 3-7. Ajuste del modelo multi-angular para los efectos de los ángulos cenitales de visión e iluminación para todas las especies analizadas, incluyendo los suelos.**

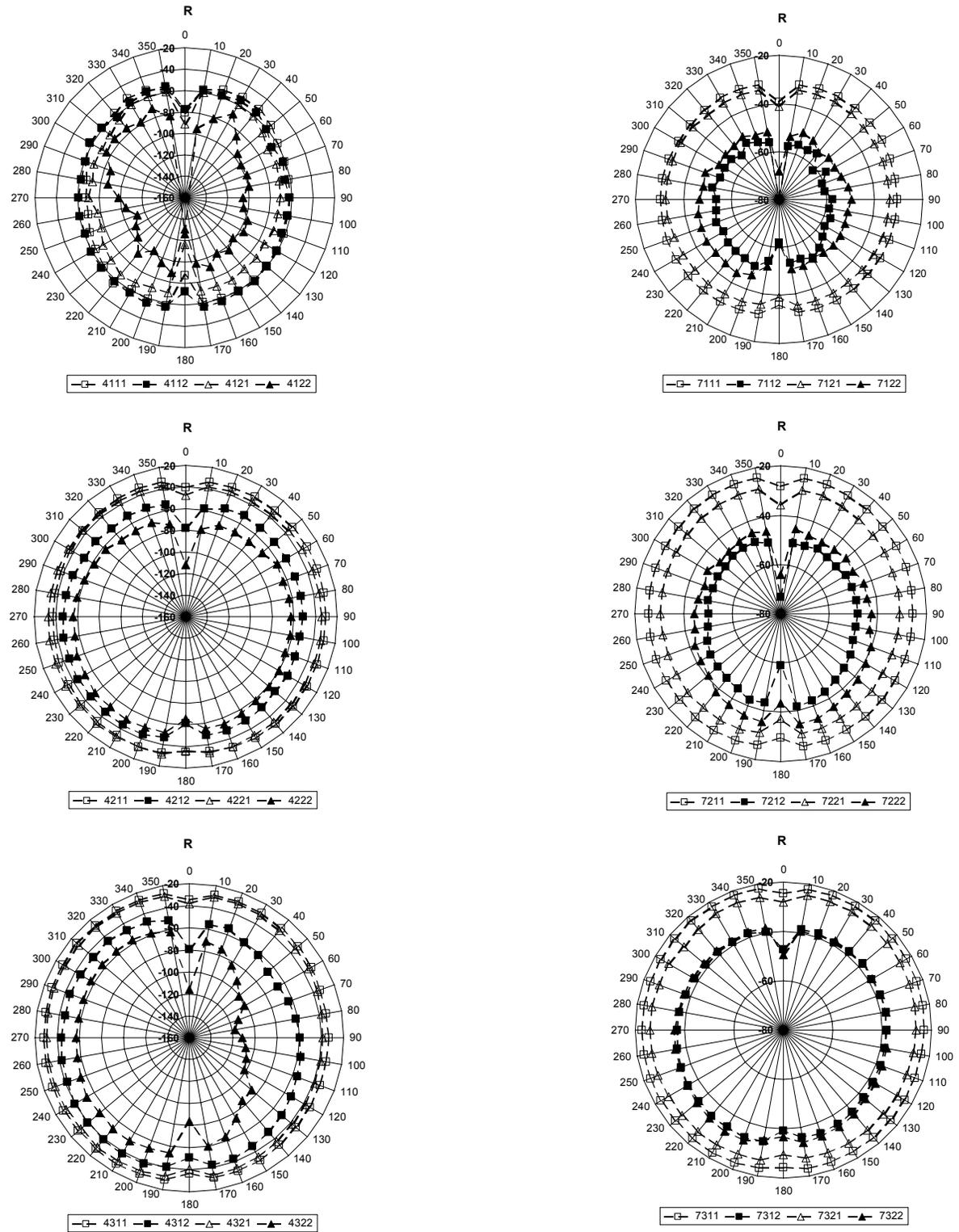
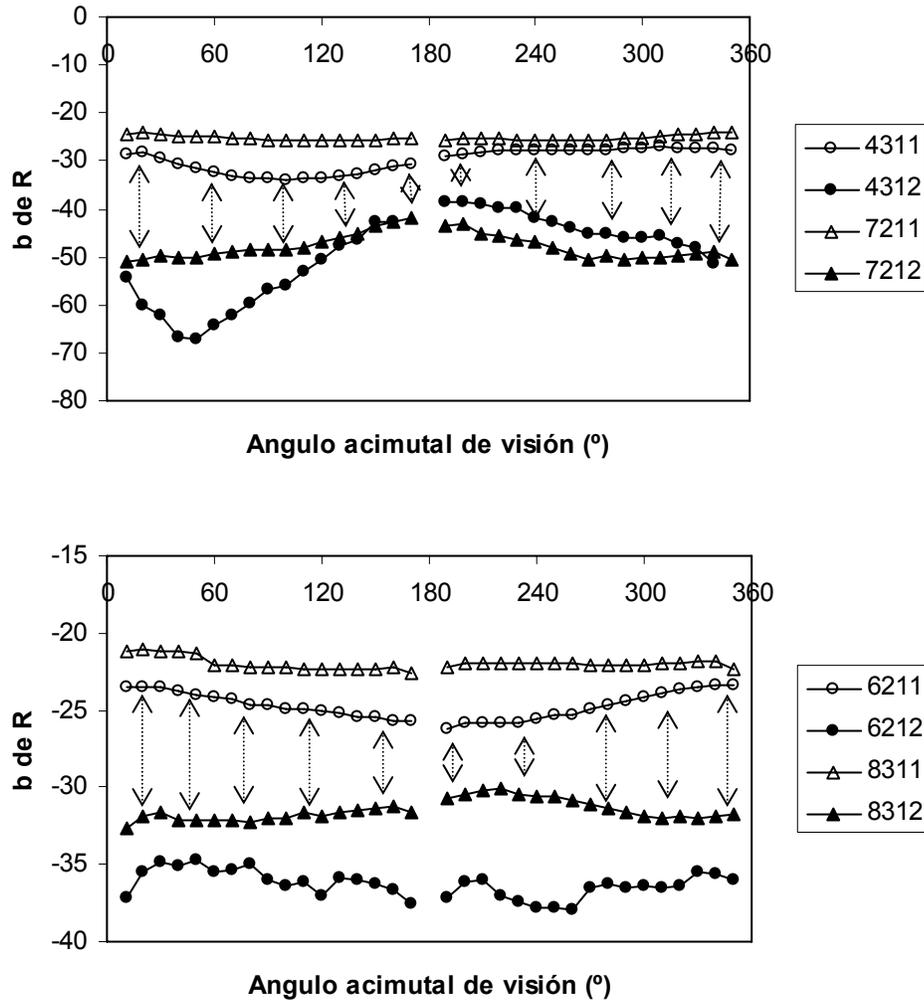


Figura 3-8. Gráficos polares para el parámetro b del rojo para el caso Encino-Pino.



**Figura 3-9. Gráfico acimutal de b para la reflectancia de la banda del R, para las especies contrastantes encino-pino y palo dulce-navajita. Las flechas punteadas verticales corresponden al área de traslape entre especies.**

### CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo muestran que los cambios en las propiedades ópticas de los suelos de fondo pueden producir confusiones en las clasificaciones de vegetación basadas en información espectral multi-angular. Si se mantiene fijo el fondo y la cantidad de follaje de la vegetación, la discriminación de especies es factible. No obstante esto, en condiciones operacionales la variación de los fondos de la vegetación, así como del follaje de la vegetación esta garantizada, por lo que la

---

---

utilización de hipótesis de invarianza (propiedades típicas) puede conducir a grandes errores.

Aunque la modelación presentada permite compactar en forma paramétrica los efectos del ángulo cenital de visión e iluminación, los efectos del ángulo acimutal relativo, además de los fondos y densidades de plantas, no es factibilidad la clasificación de la vegetación natural usando información espectral multi-angular.

### LITERATURA CITADA

- Alvarez, R., R. Bonifaz, R.S. Lunetta, C. Garcia, G. Gomez, R. Castro, A. Bernal, and A.L. Cabrera. 2003. Multitemporal landcover classification of Mexico using Landsat MSS imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24: 2501-2514.
- ASD. 1999. Technical guide. Third Edition. Analytical Spectral Devices, Inc. 136 p.
- Asner, G.P. 2000. Contributions of multi-view angle remote sensing to land-surface and biogeochemical research, *Remote Sensing reviews*, 1-26.
- Barnsley, M.J., D. Allison, and P. Lewis. 1997. On the information content of multiple view angle (MVA) images, *International Journal of Remote Sensing*, 18: 1937-1960.
- Bicheron P., M. Leroy, and F.M. Breon. 1997. Enhanced discrimination of boreal forest covers with direccional reflectances from the airborne polarization and directionality of earth reflectances (POLDER) instrument, *Journal of Geophysics Research*, 102: 29517-29531.
- Bolaños, M., F. Paz, E. Palacios, E. Mejía, y A. Huete. 2007. Modelación de los efectos de la geometría sol-sensor en la reflectancia de la vegetación. *Agrociencia*, 41: 527-537.
- Carpenter, G.A., S. Gomal, S. Macomber, S. Martens, C.E. Woodlock, and J. Franklin. 1979. A neural network method for efficient vegetation mapping. *Remote Sensing of Environment*, 70: 326-338.
- Daniels, A.E. 2006. Incorporating domain knowledge and spatial relationships into land cover classifications: a rule-based approach. *International Journal of Remote Sensing*, 27: 2949-2975.

- 
- DeFries, R.S., and J.R.G. Townshend. 1994. NDVI-derived land cover classification at global scales. *International Journal of Remote Sensing*, 15:3567-3586.
- Di Girolamo, L. 2003. Generalizing the definition of the bi-directional reflectance distribution function. *Remote Sensing of Environment*, 88: 479-482.
- Diner, D.J., G.P. Asner., R. Davies., Y. Knyazhikin., J.P. Muller., A.W. Nolin., B. Pinty., C.B. Schaaf., and J. Stroeve. 1999. New directions in earth observing: scientific applications of multiangle remote sensing. *Bulletin of the Meteorological Society*, 80: 2209-228.
- Diner, D.J., B.H. Braswell, R. Davies, N. Gobron, J. Hu, Y. Jin, R.A. Khan, Y. Knyazikhin, N. Loeb, J.P. Muller, A.W. Nolin, B. Pinty, C.B. Schaaf, G. Seiz, and J. Stroeve. 2005. The value of multiangle measurements for retrieving structurally and radiatively consistent properties of clouds, aerosols, and surfaces. *Remote Sensing of Environment*, 97: 495-518.
- Engelson, O., B. Pinty, M.M. Verstraete, and J.V. Martonchik. 1996. Parametric bidirectional reflectance factor models: evaluation, improvements and applications. EUR 16426 EN, EC Joint Research Centre, Ispra, Italy. 120 p.
- Friedl, M., and C. Brodley. 1997. Decision tree classification of land cover from remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 61: 399-409.
- Gao, F., C.B. Schaaf, A.H. Strhler, Y. Jin, and X. Li. 2003. Detecting vegetation structure using kernel-based BRDF model. *Remote Sensing of Environment*, 86: 198-205.
- Gerard, F. 2003. Single angle, dual angle and multi-temporal viewing: assessing through modeling the implications for forest structure variable extraction. *International Journal of Remote Sensing*, 24:1317-1334.
- Gerard, F.F., and P.R.J. North. 1997. Analyzing the effect of structural variability and canopy gaps on forest BRDF using a geometric-optical model. *Remote Sensing of Environment*, 62: 46-63.
- Gobron N., B. Pinty., M.M. Verstraete., J.L. Widlowski., and D.J. Diner. 2002. Uniqueness of multiangular measurements – Part II: joint retrieval of vegetation structure and photosynthetic activity from MISR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40: 1574-1592.
-

- Goldshleger, N., E. Ben-Dor, Y. Benyamini, D. Blumberg, and M. Agassi. 2002. Spectral properties and hydraulic conductance of soil crusts formed by raindrop impact. *International Journal of Remote Sensing*, 23: 3909-3920.
- Hyman, A.H., and M.J. Barnsley. 1997. On the potential for land cover mapping from multiple-view Sensing, 18: 2471-2475.
- Kimes, D.S. 1983. View-angle (MVA) remotely-sensed images. *International Journal of Remot. Dynamics of directional reflectance factor distributions for vegetation canopies. Applied Optics*, 22:1364-1372.
- Knyazikhin Y., J.V. Martonchik., D.J. Diner., R.B. Myneni., M. Verstraete., B. Pinty., and N. Gobron. 1998b. Estimation of vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from atmosphere-corrected MISR data. *Theory Journal of Geophysics Research*, 103 (D24), 32239-32256.
- Knyazikhin Y., J.V. Martonchik., R.B. Myneni., D.J. Diner., and S.W. Running. 1998a. Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data. *Theory Journal of Geophysics Research*, 103: 32257-32275.
- Lacaze, R., J.M. Chen, J.L. Roujean, and S.G. Leblanc. 2002. Retrieval of vegetation clumping index using hot spot signatures measured by POLDER instrument, *Remote Sensing of Environment*, 79: 84-95.
- Lotsch A., Y. Tian., M.A. Friedl., and R.B. Myneni. 2003. Land cover mapping in support of LAI/FAPAR retrievals from EOS-MODIS and MISR: classification methods and sensitivities to errors. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 10, 1997-2016.
- Lovell, J.L., and R.D. Graetz. 2002. Analysis of POLDER-ADEOS data for the Australian continent: the relationship between BRDF and vegetation structure. *International Journal of Remote Sensing*, 23: 2767-2796.
- Loveland, T. R., J. W. Merchant., J. F. Brown., D. O. Ohlen., B. C. Reed., P. Olsen., and J. Hutchinson. 1995. Seasonal Land Cover of the United States. *Annals of the Association of American Geographers* 85, 2, 339-355.

- Lucht W. and J.L. Roujean. 2000. Considerations in the parametric modeling of BRDF and albedo from multiangle satellite sensor observations. *Remote Sensing Reviews*, 18:343-380.
- Miller, J.R., H.P. White., J.M. Chen., D.R. Peddle., G. McDermid., R.A. Fournier., P. Shepherd., I. Rubinstein., J. Freemantle., R. Soffer., and E. LeDrew. 1997. Seasonal change in understory reflectance of boreal forests and influence on canopy vegetation indices. *Journal of Geophysics Research*, 102: 29475-29482.
- Morin J., D. Goldberg, and I. Seginer. 1967. A Rainfall simulator with a rotating disk. *Transactions of ASAE*, 10: 74-79.
- Myneni, R.B., Nemani, R.R., and S.W. Running. 1997. Estimation of global leaf area index and absorbed PAR using radiative transfer models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35: 1380-1393.
- Nemani R., and S. W. Running. 1997. Land cover characterization using multitemporal red, near-ir and thermal-ir data from NOAA/AVHRR. *Ecological Applications*, 7:79-90.
- Nicodemus, F.E., J.C. Richmond., J.J. Hsia., I.W. Ginsberg., and T. Limperis. 1977. Geometrical considerations and nomenclature for reflectance. NBS Monogr. No. 160, National Bureau of Standards, U.S. Department of Commerce, 52 p.
- Paz, F., y M. Bolaños. 2006. Modelación de la BRDF en la vegetación: reporte final, Reporte Noviembre para AGROASEMEX, 66 p.
- Peltonieri, J.I., S. Kaasalainen., J. Näränen., M. Rautiainen., P. Stenberg., H. Smolander., S. Smolander., and P. Voipio. 2005. BRDF measurement of understory vegetation in pine forests. Dwarf shrubs, lichen, and moss. *Remote Sensing of Environment*, 94: 343-354.
- Pinty B., J.L. Widlowski., N. Gobron., M.M. Verstraete., and D.J. Diner. 2002. Uniqueness of multiangular measurements – Part I: an indicator of subpixel surface heterogeneity from MISR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40: 1560-1573.
- Rahman H., B. Pinty., and M.M. Verstraete. 1993. Coupled surface-atmosphere reflectance (CSAR) model 2. Semiempirical surfaces model usable with NOAA

- advanced very high resolution radiometer data. *Journal of Geophysics Research*, 98:20791-20801.
- Ranson, K.J., C.S.T. Daughtry., L.L. Biehl., and M.E. Bauer. 1985. Sun-view effects on reflectance factors of corn canopies. *Remote Sensing of Environment*, 18:147-161.
- Ross, J. K. 1981. The radiation regime and architecture of plant stands. Dr. W. Junk , Norwell, Mass. 392 p.
- Roujeau, J.L., M. Leroy., and P.Y. Deschamps. 1992. A bidirectional reflectance model of the earth's surface for the correction of remote sensing data. *Journal of Geophysics Research*, 97:20455-20468.
- Running, S.W., T.R. Loveland, L.L. Pierce, R.R. Nemani, and E.R. Hunt. 1995. A remote sensing based vegetation classification logic for global land cover analysis. *Remote Sensing Environment*, 51: 39-48.
- Sandmeier, S.C., C. Müller, B. Hosgood, and G. Andreoli. 1998. Physical mechanisms in hyperspectral BRDF data of grass and watercress. *Remote Sensing of Environment*, 66: 222-233.
- Sandmeier, S.C., and D.W. Deering. 1999. Structure analysis and classification of Boreal forests using airborne hyperspectral BRDF data from ASAS. *Remote Sensing of Environment*, 69: 281-295.
- Schaepman-Strub, G., M.E. Schaepman, T.H. Painter, S. Dangel, and J.V. Martonchik. 2006. Reflectance quantities in optical remote sensing – definitions and case studies. *Remote Sensing of Environment*, 103: 27-42.
- Staylor, W.F. and J.T Suttles. 1986. Reflection and emission models for deserts derived from NIMBUS 7 ERB scanner measurements. *Journal of Climate Application Meteorology*, 25:196-202.
- Wanner W., X. Li., and A.H. Strahler. 1995. On the derivation of kernels for kernel-driven models of bidirectional reflectance. *Journal of Geophysics Research*, 100:21077-21089.
- Zhang Y., Y. Tian., R.B. Myneni., and Y. Knyazikhin. 2002a. Required consistency between biome definitions and signatures with the physics of remote sensing. I: empirical arguments. *Remote Sensing of Environment*, 80: 418-434.

Zhang Y., N. Shabanov., Y. Knyazikhin., and R.B. Myneni. 2002b. Required consistency between biome definitions and signatures with the physics of remote sensing. II: theoretical arguments. *Remote Sensing of Environment*, 80:435-446.

## **CAPÍTULO IV. FACTOR DE LA REFLECTANCIA BI-CÓNICA EN ESPECIES VEGETALES CONTRASTANTES: MODELACIÓN GLOBAL**

### **RESUMEN**

La clasificación de la vegetación usando información espectral multi-angular ha sido aproximada usando esquemas de modelación restringidos o con hipótesis de homogeneidad o estacionalidad. En este trabajo se presenta un esquema de modelación global de los ángulos cenitales y acimutales en la reflectancia de la vegetación, extendiendo los desarrollos al caso de los efectos de cambios en las propiedades ópticas del fondo de la vegetación (suelo) y de la densidad de plantas (follaje). Esta síntesis extrema es realizada en un espacio supra-paramétrico que depende esencialmente de dos parámetros y engloba todas las variaciones mencionadas. El esquema de modelación global desarrollado fue aplicado al caso de arreglos de plantas, diferentes densidades, de ocho especies contrastantes y suelos desnudos. La modelación fue realizada a las mediciones de factores de reflectancia bi-cónicos (conical-conical reflectance factor, CCRF), donde los ajustes resultaron excelentes (generalmente con  $R^2 \geq 0.99$  y errores relativos medios menores al 7 %). El análisis de los resultados mostró que la información espectral multi-angular, bajo condiciones generalizadas, mantiene problemas de confusión en la discriminación de especies.

Palabras clave: Clasificación, CCRF, modelación global, especies únicas, sensores remotos

### **INTRODUCCIÓN**

La clasificación de la vegetación natural usando sensores remotos ha sido explorada desde los inicios de la operación comercial de la tecnología satelital con sensores remotos en el espectro electromagnético de onda corta. Los resultados obtenidos hasta la fecha no han sido lo suficientemente estables y confiables para ser usados en forma operacional sólida.

Últimamente se ha planteado que la información espectral multi-angular mejora las clasificaciones de la vegetación (Bicheron *et al.*, 1997; Asner, 2000; Diner *et al.*, 1999 y 2005); aunque los resultados obtenidos en la práctica muestran solo algunas mejorías en las clasificaciones (Barnsley *et al.*, 1997; Hyman y Barnsley, 1997; Gerard, 2003), donde la separabilidad de clases de vegetación esta fuertemente influenciada por las diferencias a nivel espectral y, en menor medida, a nivel angular.

La información multi-angular asociada a la vegetación, geometría sol-sensor, ha sido la base para el desarrollo de sensores operacionales, tales como el POLDER, que tiene hasta 14 ángulos de observación y una resolución espacial de 7km; el sensor ATSR-2 con 2 ángulos de visión y una resolución de 1km; y, el sensor MISR, con 9 ángulos de visión y resolución espacial de 275m a 1.1km. Por el sistema de barrido de la superficie terrestre, los sensores AVHRR y MODIS introducen un efecto simultaneo de geometría sol-sensor y escala (el tamaño de los píxeles se incrementa con el ángulo de visión; esto es, los píxeles que se alejan de la línea orbital ortogonal a la superficie incrementan sus dimensiones, producto de vistas oblicuas del sensor). En el otro extremo, el sensor MISR mantiene fija las dimensiones de los píxeles a través de un muestreo de barrido temporal a lo largo de su línea orbital.

Un enfoque teórico de clasificación de la vegetación, actualmente operacional usando los sensores MODIS y MISR, es el desarrollado por el grupo de la Universidad de Boston (Lotsch *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2002a y b), donde su base parte de una clasificación de tipos de vegetación usando propiedades radiativas y geométricas típicas de la mezcla suelo-vegetación para seis biomas distintivos en esos términos (Myneni *et al.*, 1997). Los biomas radiativamente definidos son usados para condicionar las extracciones de parámetros biofísicos usando información espectral (Knyazikhin *et al.*, 1998a y b). En una perspectiva teórica y estadística, Zhang *et al.* (2002a y b), han argumentado que la clasificación de la vegetación con información espectral multi-angular debe basarse en principios de consistencia entre las propiedades radiativas de las clases y sus firmas espectrales distintivas, manteniendo fija la resolución espacial (problema de mezclas). Así, los argumentos de estos autores favorecen la hipótesis de firmas espectrales multi-angulares únicas para las clases de vegetación (los seis biomas definidos por Myneni *et al.*, 1997).

En este trabajo, último de dos, se utiliza un esquema de modelación global para analizar los patrones angulares de diferentes tipos de vegetación, contrastantes entre si, y revisar si la información espectral angular puede diferenciar las clases estudiadas. La modelación sigue una jerarquía de caracterización: ángulos cenitales, ángulos acimutales, efecto del suelo y densidad de plantas. En el capítulo anterior, se utilizó un modelo de los ángulos cenitales de visión e iluminación y revisó la factibilidad de discriminar la vegetación, concluyéndose que existía una confusión de clasificación en términos de los efectos del suelo y densidad de plantas. Para poder ratificar las conclusiones planteadas, en este trabajo se desarrolla un modelo global que reduce toda la variabilidad discutida a un espacio de dos parámetros.

### **MODELACIÓN GLOBAL DEL SISTEMA SUELO-VEGETACIÓN**

Las reflectancias asociadas a un objeto terrestre varían en función de los ángulos cenitales de iluminación y visión (Bolaños *et al.*, 2007) y de la diferencia acimutal (capítulo anterior), por lo que requieren modelarse en forma compacta para poder analizar la discriminación entre clases de vegetación.

En los últimos tiempos, los modelos de la función de distribución de la reflectancia bidireccional (BRDF, por sus siglas en inglés) más usados son los basados en *kernels* (funciones matemáticas) que combinan modelos de medios turbios y de óptica geométrica (Wanner *et al.*, 1995). Los modelos semi-empíricos principales de kernels son lineales (Wanner *et al.*, 1995; Lucht) y no lineales (Rahman *et al.*, 1993). Un modelo de la BRDF requiere de al menos tres parámetros (Engelson *et al.*, 1996): uno relacionado con la amplitud de la señal, otro que defina la dependencia con respecto a los ángulos cenitales solares y de visión y un último que tome en cuenta las variaciones acimutales. Esto plantea, al menos, el uso de un espacio tridimensional para clasificar a la vegetación. En un caso de píxel por píxel de una imagen satelital, los requerimientos de datos de los modelos actuales de la BRDF deben utilizar hipótesis restrictivas (homogeneidad temporal o espacial) para contar con información para caracterizar las BRDF.

La clasificación de la vegetación natural usando modelos de la BRDF ha sido realizada a través de los parámetros ajustados en dichos modelos. En el caso de los

*kernels* lineales (isotrópicos, volumétricos y geométricos), los coeficientes ajustados han sido utilizados para buscar relaciones con la cobertura aérea y estructura de la vegetación (altura, composición, etc.) para diferentes tipos de vegetación (Gerard y North, 1997; Lovell y Graetz, 2002; Gao *et al.*, 2003). Aunque los resultados de estos estudios muestran relaciones congruentes, tendencias generales, entre los parámetros de los modelos de kernels lineales de la BRDF y la estructura de la vegetación, estos muestran confusión en las clasificaciones y errores de estimación altos en las variables asociadas a las clases de vegetación. Usando el modelo no lineal de la BRDF de Rahman *et al.* (1993); Pinty *et al.* (2002) y Gobron *et al.* (2002) proponen que el parámetro  $k$  de este modelo puede ser usado para discriminar tipos de vegetación con fondos muy reflectivos (nieve o desierto), de tal manera que la forma de la BRDF puede ser caracterizada en función de que sea cóncava ( $k > 1$ ), convexa ( $k < 1$ ) o lineal ( $k = 1$ ).

### **Modelación del ángulo cenital de iluminación y visión**

En el capítulo anterior, se planteó el uso de un modelo de los ángulos cenitales de visión e iluminación de un sólo parámetro, reduciendo así la complejidad de los esquemas de clasificación de la vegetación.

Si definimos el vector de visión  $\Omega$  ( $\theta_v, \phi_v$ ) y el de iluminación  $\Omega'$  ( $\theta_s, \phi_s$ ), donde  $\theta$  es un ángulo cenital y  $\phi$  el acimutal, con  $v$  significando visión y  $s$  iluminación solar, el modelo definido en el capítulo anterior está dado por:

$$\begin{aligned} \chi &= 90 - \theta_v + \theta_s \\ Rn &= \ln(R) \cos(\chi) \\ \chi &= a + bRn \end{aligned} \tag{4-1}$$

donde se utiliza un valor de  $a = 90$  para obtener un punto adicional y poder estimar  $b$  usando un esquema similar al del IRC del modelo de Bolaños *et al.* (2007). El uso de la función  $\cos(\chi)$  como factor multiplicativo de  $R$  permite definir un punto del patrón  $Rn-\chi$ , ya que  $\cos(90^\circ) = 0$ , por lo que  $Rn = 0$  en  $\chi = 90^\circ$  ( $\theta_v = \theta_s$ ; es decir, el plano del *Hot Spot*). El ángulo  $\theta_v$  no tiene signo.

### Modelación de la diferencia angular acimutal

Usando la notación de ángulos acimutales positivos en la dirección contraria a las manecillas del reloj, Paz y Bolaños desarrollaron un modelo general de la BRDF que considera al parámetro  $b$  de los efectos de los ángulos cenitales de visión e iluminación:

$$\begin{aligned}
 d\phi' &= \phi_v - \phi_s \\
 \text{Si } d\phi &\leq 180, d\phi_p = d\phi \\
 \text{Si } d\phi &> 180, d\phi_p = 360 - d\phi \\
 \\ 
 \text{Si } d\phi_p &\leq 90, \zeta = d\phi_p + \theta_s \\
 \text{Si } d\phi_p &> 90, \zeta = d\phi_p - \theta_s
 \end{aligned} \tag{4-2}$$

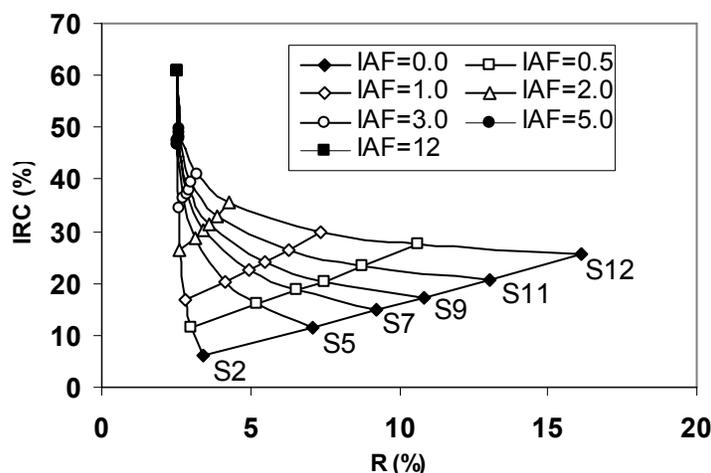
$$\begin{aligned}
 bn &= b \cos(\zeta) \\
 \zeta &= 90 + B(bn)
 \end{aligned}$$

El modelo de las relaciones (4-1) sigue el mismo esquema que el de las (4-2), donde  $\zeta$  es una variable de posición que hace simétricos los patrones de  $b$ . Los ángulos cenitales  $\theta_s$  (*Hot Spot*) son considerados en términos de sus posiciones: plano (semi-hemisferio) de iluminación y sombreado.

De los modelos de las relaciones (4-1) y (4-2), es claro que para conocer la BRDF en forma total solo se requiere conocer el parámetro  $B$ , simplificando todo el modelo en la forma mas compacta posible: un solo parámetro. Esto permite el análisis de las firmas espectrales multi-angulares en forma muy simple.

### Modelación del efecto del suelo y la densidad del follaje

En la Figura 4-1 se muestra el espacio espectral R-IRC del patrón temporal de crecimiento de un cultivo maíz, representado por curvas de igual índice de área foliar o IAF (iso-IAF). La Figura 4-1 se generó usando seis tipos de suelos (S2, S5, S7, S9, S11 y S12; del más oscuro al más claro). Paz *et al.* (2005) detallan las simulaciones radiativas mostradas en la Figura 4-1.



**Figura 4-1. Espacio espectral IRC-R para las simulaciones del cultivo maíz.**

El análisis de la Figura 4-1 define varios patrones muy importantes para entender el comportamiento de la reflectividad durante el desarrollo de los cultivos:

- Si se unen los valores de igual IAF (iso-IAF) de cada curva de igual suelo (iso-Suelo), se obtiene un patrón cuasi-lineal
- La pendiente e intersección de las líneas rectas de iso-IAF varían con el valor del IAF, como se observa en la Figura 4-1. La inclinación (pendiente) de las rectas de iso-IAF parte desde una pendiente igual a la de la línea del suelo (IAF = 0) y aumenta hasta alcanzar un ángulo de  $90^\circ$  en el sentido contrario a las manecillas del reloj. Esta última condición corresponde al caso de saturación de la reflectividad de la banda del R, representada en la Figura 4-1 como los valores de reflectividad arriba del ápice del sombrero de tres picos (IAF > 5 en la Figura 4-1). Los patrones de los espacios espectrales IRC-Visible (azul, verde y rojo) son similares para todas las bandas del espectro visible, dado que hay una relación lineal entre estas bandas.
- Todas las curvas de iso-Suelos convergen al mismo punto de saturación de las bandas visibles. En realidad el sombrero de tres picos tiene una línea recta como ápice, ya que cuando una banda visible se satura el IRC no lo hace y sigue creciendo hasta su propio punto de saturación. Esta propiedad es muy importante para el diseño de algoritmos de índices de la señal del suelo y de la vegetación y refleja la condición física de que el suelo no se ve (relativo a cada banda espectral) y solo se observa la vegetación. El punto de saturación, llamado también de

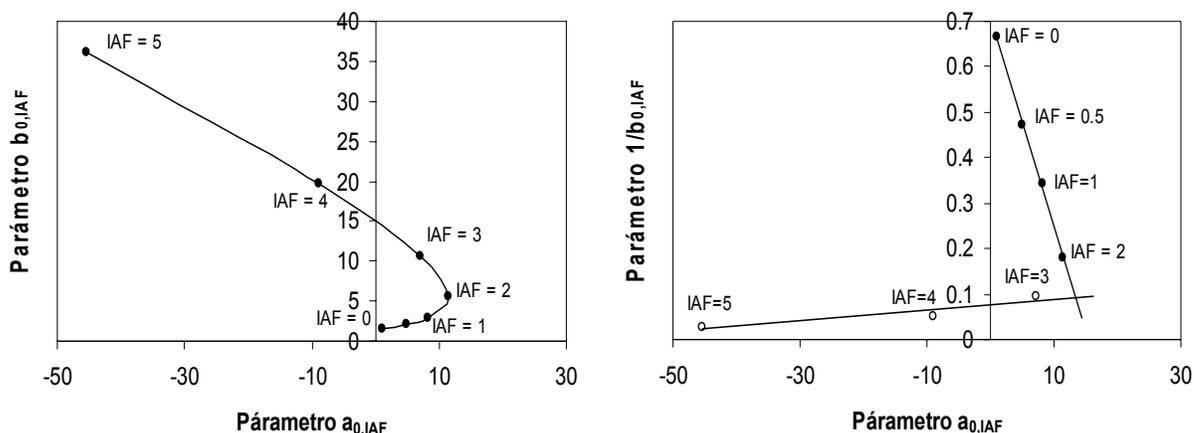
reflectividad infinita o de medio ópticamente denso, es función del espectro de las hojas y de su distribución angular.

Las curvas iso-IAF mostradas en la Figura 4-1 se pueden describir como:

$$IRC_{IAF} = a_{0,IAF} + b_{0,IAF} R_{IAF} \quad (4-3)$$

donde el subíndice IAF se refiere a un valor específico del IAF de la mezcla suelo-vegetación. Los parámetros de la recta definida por la ecuación (4-3),  $a_{0,IAF}$  (en % para nuestro caso) y  $b_{0,IAF}$  (adimensional), dependen del valor de IAF. En lo que sigue se omitirá el subíndice IAF en R e IRC.

En la Figura 4-2 se muestra la relación entre los parámetros  $a_{0,IAF}$  y  $b_{0,IAF}$  de la Figura 4-1 (Paz *et al.*, 2007), para el ciclo de crecimiento del cultivo que va desde el suelo desnudo hasta la condición de cubrimiento completo del suelo por la vegetación. En la Figura 4-2 se observa que en la etapa inicial hay un patrón de comportamiento tipo exponencial, hasta un punto donde la banda R se satura (no cambia de valor). Después del punto de saturación de la banda R, el patrón es lineal. El punto inicial de la curva  $a_{0,IAF}$ - $b_{0,IAF}$  (Figura 4-1) representa el caso de suelo desnudo ( $a_{0,IAF=0} = a_S$  y  $b_{0,IAF=0} = b_S$ ). El punto donde  $a_{0,IAF}$  alcanza su valor máximo (punto de transición del patrón exponencial al lineal), representa el término de la fase de crecimiento exponencial e inicio de la fase lineal. El punto final del patrón lineal de la curva  $a_{0,IAF}$ - $b_{0,IAF}$  representa la situación donde la banda del IRC se satura, lo cual ocurre cuando el IAF alcanza su valor máximo. En la misma Figura 4-2 se muestra una transformación ( $b_{0,IAF} \rightarrow 1/b_{0,IAF}$ ) que hace aproximadamente lineal la función expo-lineal observada. Esta transformación fue elegida para modelar en forma adecuada la transición entre la fase exponencial y lineal.



**Figura 4-2. Patrón entre los patrones  $a_{0,IAF}$  y  $b_{0,IAF}$  de las curvas iso-IAF**

En el caso de la información espectral multi-angular, el esquema de modelación propuesto consisten en generar curvas iso-IAF multi-angulares (densidad de plantas o cobertura aérea) del espacio de los parámetros [B de R] versus [B de IRC] (similar al espacio del R-IRC de la Figura 4-1):

$$B IRC_{IAF} = \alpha + \beta(B R_{IAF}) \quad (4-4)$$

En el espacio meta-paramétrico  $\alpha$ - $\beta$ , lineal, podemos modelar el patrón del crecimiento de la vegetación (incremento del IAF o cobertura aérea) usando un modelo (similar al esquema de la Figura 4-2):

$$\alpha = AA + BB\beta \quad (4-5)$$

de tal forma que toda la información multi-angular asociada al sistema suelo-vegetación (efecto del suelo y del follaje) quede compactada en un espacio supra-paramétrico AA-BB. De esta forma podemos analizar la viabilidad de discriminar clases de vegetación en forma sumamente compacta.

### EXPERIMENTOS BAJO CONDICIONES CONTROLADAS DE LABORATORIO

La discriminación de clases de vegetación usando información espectral multi-angular fue analizada mediante la implementación de un experimento bajo condiciones controladas de laboratorio, donde se simularon diferentes configuraciones geométricas de especies vegetales contrastantes. Para esto se utilizaron plantas pequeñas en las especies arbóreas y arbustivas; y plantas adultas

para pastizales, después de podarse. En el Cuadro 4-1 se muestran las características principales de las plantas usadas en los experimentos, donde están consideradas especies con diferentes tipos de hoja.

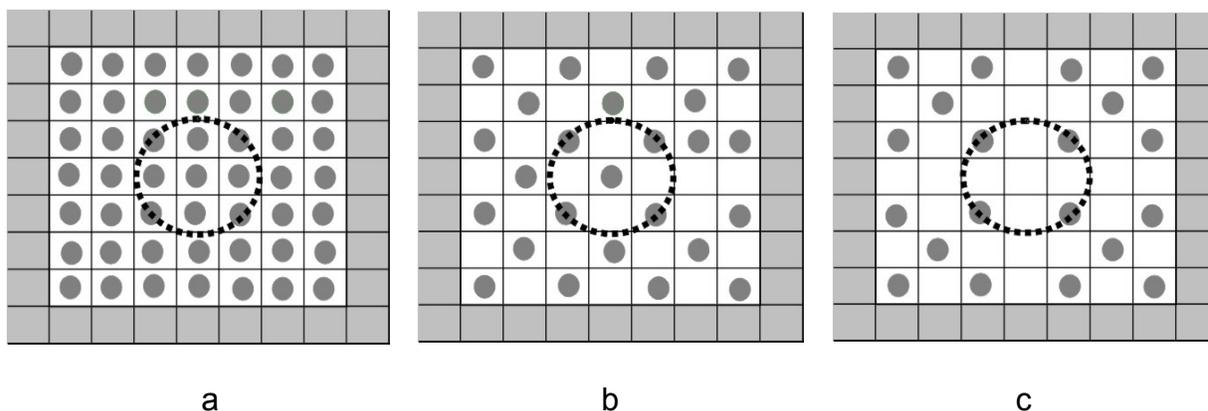
**CUADRO 4-1. CARACTERÍSTICAS DE LAS ESPECIES VEGETALES USADAS EN EL EXPERIMENTO**

Nombre científico	Nombre común	Tipo de hoja	Altura* (cm)	Diámetro del tallo* (cm)	Diámetro del dosel* (cm)
<i>Abies religiosa</i>	Oyamel	Aciculada	34.34 (5.33)	0.70 (0.14)	24.26 (6.44)
<i>Acacia retinodes</i>	Mimosa	Latifoliada	38.88 (7.80)	0.64 (0.15)	26.09 (6.17)
<i>Casuarina equisetifolia</i>	Casuarina	Aciculada	36.67 (3.85)	0.64 (0.17)	23.87 (5.97)
<i>Quercus rugosa</i>	Encino	Latifoliada	33.83 (6.45)	0.60 (0.27)	20.17 (5.05)
<i>Fraxinus uhdei</i>	Fresno	Latifoliada	31.08 (5.11)	0.60 (0.14)	20.74 (4.30)
<i>Eysenhardtia polystachya</i>	Palo dulce	Microlatifoliada	25.29 (10.7)	1.99 (1.42)	15.90 (5.17)
<i>Pinus greggii</i>	Pino	Aciculada	33.49 (4.35)	0.60 (0.09)	14.13 (2.29)
<i>Bouteloa gracilis</i>	Navajita	Lineal	18.31 (3.20)	2.55 (1.17)	14.02 (4.73)

\* Los datos entre paréntesis son las desviaciones estándar.

Las plantas individuales de cada especie, dentro de bolsas de plástico y sin estrés, fueron acomodadas en tres densidades de acuerdo a los arreglos mostrados en la Figura 4-3. Los arreglos de plantas fueron colocados en un cajón de madera de dimensiones de 1.5m x 1.5m, con un sistema de mallas de 15cm x15cm para la colocación de las plantas individuales en bolsas de plástico, de tal manera que no se inclinaran al apoyarse sobre el fondo del cajón.

Para analizar el efecto del fondo de los arreglos de plantas, arriba de la malla superior del cajón se colocaron tiras de madera a la altura del inicio de los tallos de las plantas y sobre estas tiras, selladas en los tallos, se colocó suelo previamente seleccionado y con una granulometría menor a 2mm.



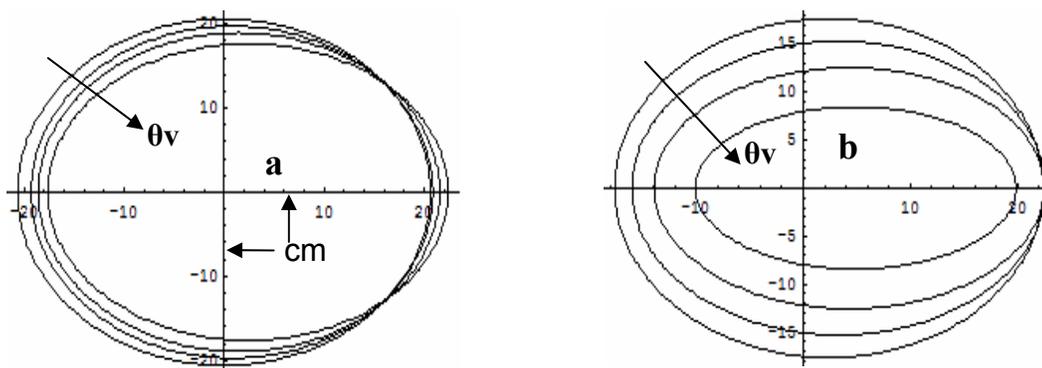
**Figura 4-3. Densidades usadas: a) alta (49 plantas), b) media (25 plantas) y c) baja (12 plantas). Cada círculo relleno representa la posición de una planta y los cuadros perimetrales rellenos sólo contienen suelo. El círculo mostrado al centro de los cuadros es el área de visión del sensor hiperespectral con un ángulo de visión a nadir.**

El cajón de madera conteniendo a los arreglos de plantas forma parte del sistema goniométrico (SIGO-CP) de medición de reflectancias multi-angulares diseñado (Anexo B). A nadir, el radiómetro hiperespectral (350 a 2,500 nm) usado (modelo FR Jr de ASD<sup>MR</sup>) mide una área circular de diámetro 0.41m. El radiómetro tiene un campo instantáneo de visión de  $25^\circ$  ( $\alpha = 12.5^\circ$ , ver Figura 3). Adicionalmente al radiómetro, se montó en el SIGO-CP una cámara fotográfica digital (Cybershot DSC-V1 de Sony<sup>MR</sup>) y un termómetro radiativo (modelo ITRS de Apogee<sup>MR</sup>). Estos instrumentos fueron usados para realizar mediciones cenitales a intervalos de  $10^\circ$ , desde  $0^\circ$  a  $60^\circ$  en las direcciones acimutales de  $0^\circ$  a  $350^\circ$ , con intervalos de  $10^\circ$ . La dirección acimutal de  $0$ - $360^\circ$  de medición coincide con el acimut de la fuente de iluminación, por lo que las direcciones acimutales representan en realidad diferencias acimutales en la convención de  $0$ - $360^\circ$ . La fuente de iluminación utilizada es un reflector de aluminio de cuerpo negro de la marca Tecno Lite<sup>MR</sup> equipado con una lámpara de halógeno de cuarzo de 500 watts de la marca Osram<sup>MR</sup> (modelo 64706). Los filamentos de estas lámparas son de tungsteno y el vidrio que recubre el filamento está hecho de cuarzo, siendo el halógeno el gas que rellena el tubo o bombilla. La lámpara se montó en una base telescópica elevada a 3m y su ángulo

cenital ( $\theta_s$ ) fue de  $38^\circ$ . Estas condiciones de iluminación se mantuvieron constantes para todas las mediciones de las especies vegetales analizadas.

Los suelos fueron colocados sobre las tiras de madera a la altura del inicio de los tallos de las plantas, con un espesor de 1cm. En cada suelo se consideraron dos condiciones de humedad: suelo secado a la intemperie y suelo húmedo producto de un evento de precipitación. Para este último caso se utilizó un simulador de lluvias tipo Morín (Morín *et al.*, 1967), donde el cajón del SIGO-CP con el arreglo de plantas se transportó a la base del simulador, en la misma área experimental, y se le aplicó un evento de precipitación con un disco de 75mm durante 5 minutos con la llave del simulador abierta al máximo, lo cual aporta una lamina de precipitación de 8.3mm. El evento de precipitación fue utilizado para analizar el efecto de lluvias en el suelo del fondo de la vegetación, inmediatamente después del evento. La reflectancia del suelo después de aplicar un evento de precipitación se incrementa en proporción a la energía de las gotas de lluvia (Goldshleger *et al.*, 2002). Adicionalmente, tal como se discute más adelante, el agua residual en las hojas de las plantas introduce errores en las mediciones del sistema suelo-vegetación, por lo cual los patrones de su BRDF resultan más erráticos que los de suelos secos.

En la Figura 4-4 se muestra la geometría de medición para el radiómetro montado en el arco cenital del SIGO-CP (Anexo B), donde el área de visión para ángulos cenitales diferentes a nadir forma una elipse, cuyo centro esta desplazado del centro del cajón.



**Figura 4-4. Áreas de visión del SIGO-CP a nadir: a)  $\theta_v$  de  $0^\circ$  a  $30^\circ$  y b)  $\theta_v$  de  $30^\circ$  a  $60^\circ$  (escala en cm)**

En términos de la definición de la BRDF (Nicodemus *et al.*, 1977), ésta implica ángulos sólidos infinitesimales por lo que no puede ser medida en la práctica. El arreglo de medición de reflectancias en condiciones de laboratorio discutido anteriormente implica la caracterización de los factores de reflectancia bi-cónicos o cónico-cónico (CCRF por su siglas en inglés) (Nicodemus *et al.*, 1977; Schaepman-Strub *et al.*, 2006), donde el término cónico es usado para el ángulo sólido (iluminación y visión). Las mediciones de reflectancia del radiómetro hiperespectral se refieren en realidad a factores de reflectancia, los cuales son calculados en función de las propiedades ópticas de un panel de referencia (ASD, 1999).

El área del experimento fue aislada con paños de tela negra y el techo pintado de negro, para evitar contribuciones de radiación difusa y aproximar una fuente de iluminación con un ángulo cónico de solo radiación directa.

Ahora bien, de la Figura 4-3, la CCRF medida incorpora factores de escala (áreas de medición diferentes en función del ángulo cenital de visión), por lo que debe usarse una definición generalizada que considere la parte espacial del área de medición (Di Girolamo, 2003). Los cambios en las dimensiones de los píxeles con los ángulos de visión se presentan en los sensores AVHRR y MODIS, por lo que es importante considerar en forma explícita esta situación. En este caso, considerando una relación exponencial entre las reflectancias y los IAF (Ross, 1981) - como elementos de escala, se utilizó una nueva definición de reflectancias normalizadas:  $R_n = \ln(R)\cos(\chi)$ , ecuaciones (4-1), dejando igual el modelo de la BRDF (CCRF).

El procedimiento general de determinación de los factores de reflectancia para cada especie en particular es discutido en el capítulo anterior.

Adicionalmente, se realizaron conjuntos completos de mediciones para el caso de suelo desnudo (suelos claro y oscuro, en condiciones secas y mojadas al aplicar un evento de precipitación con el simulador de lluvias). En cada conjunto de medición del arreglo de plantas de las especies se tomaron fotografías digitales para estimar la cobertura aérea (COB) usando un proceso de clasificación supervisada.

Finalmente, las mediciones de reflectancia generadas (archivo de 350 a 2,500nm, remuestreado a intervalos de 2nm) fueron convertidas a las reflectancias de las bandas del sensor Landsat 5 usando las funciones de respuesta correspondientes.

Por problemas relacionados a efectos de la atmósfera del área del experimento (vapor de agua) y de estabilidad del radiómetro, las bandas del azul y del infrarrojo medio no fueron analizadas y solo los resultados de las bandas del verde (V), rojo (R) e infrarrojo cercano (IRC) son presentados en lo siguiente.

Los datos generados en el experimento fueron guardados en archivos etiquetados con 4 dígitos: especie vegetal, densidad del arreglo de plantas, color del suelo y humedad del suelo. El Cuadro 4-2 muestra la codificación usada. Así, un código 2121 significa especie Acacia, densidad alta, color oscuro y seco.

**CUADRO 4-2. CODIFICACIÓN DE LOS ARCHIVOS DEL EXPERIMENTO**

<b>Nombre común especie</b>	<b>Código</b>	<b>Densidad plantas</b>	<b>Código</b>	<b>Color del suelo</b>	<b>Código</b>	<b>Humedad del suelo</b>	<b>Código</b>
Suelo	0	Nula	0	Claro	1	Seco	1
Oyamel	1	Alta	1	Oscuro	2	Mojado	2
Mimosa	2	Media	2				
Casuarina	3	Baja	3				
Encino	4						
Fresno	5						
Palo dulce	6						
Pino	7						
Navajita	8						

En el caso de las coberturas aéreas, el Cuadro 4-3 muestra las estimaciones realizadas en las fotografías digitales, donde COB global se refiere a la cobertura de todo el cuadro de medición (sin los cuadros del borde) del cajón del SIGO-CP y COB local nadir es la cobertura del área del círculo de medición del radiómetro a nadir (41.2cm de diámetro).

**CUADRO 4-3. COBERTURAS AÉREAS ASOCIADAS A LAS DENSIDADES DE PLANTAS**

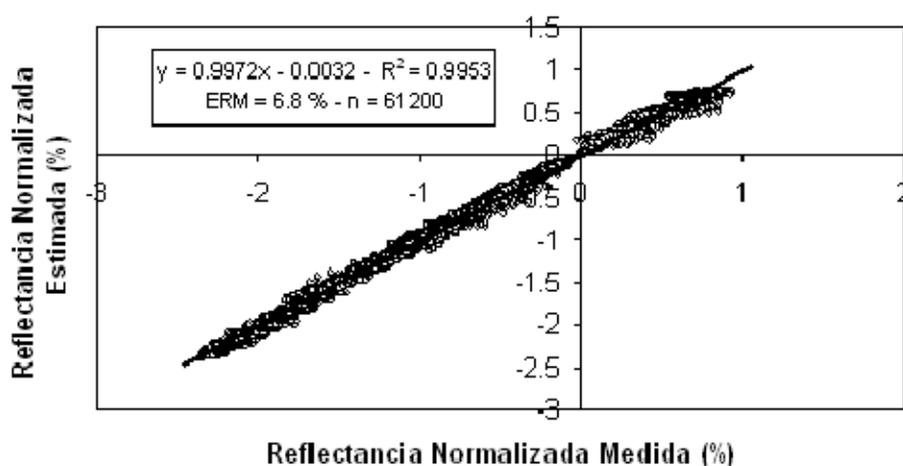
Código	Nombre Común Especie	Densidad	COB Global (%)	COB Local Nadir (%)
11	Oyamel	Alta	60.9	71.2
12	Oyamel	Media	37.1	56.3
13	Oyamel	Baja	25.0	28.2
21	Mimosa	Alta	56.2	65.5
22	Mimosa	Media	36.6	38.0
23	Mimosa	Baja	25.7	24.1
31	Casuarina	Alta	71.3	50.1
32	Casuarina	Media	30.6	33.5
33	Casuarina	Baja	25.5	18.0
41	Encino	Alta	74.0	68.8
42	Encino	Media	43.0	45.2
43	Encino	Baja	31.2	27.7
51	Fresno	Alta	60.8	61.3
52	Fresno	Media	37.3	40.4
53	Fresno	Baja	21.7	25.3
61	Palo Dulce	Alta	45.7	41.3
62	Palo Dulce	Media	28.6	21.0
63	Palo Dulce	Baja	20.7	11.0
71	Pino	Alta	53.1	55.6
72	Pino	Media	23.3	26.9
73	Pino	Baja	12.2	11.4
81	Navajita	Alta	26.6	44.3
82	Navajita	Media	30.5	30.2
83	Navajita	Baja	18.0	18.4
00	Suelo	Nula	0.0	0.0

### Ajuste de los modelos de ángulos cenitales y acimutales

En la Figura 4-5 se muestran los ajustes del modelo de los ángulos cenitales de visión e iluminación para las reflectancias de las bandas del verde (V), del rojo (R) e infrarrojo cercano (IRC) para las ocho especies analizadas, mas el suelo desnudo. El error relativo medio general fue de 6.8 %, bastante bueno si consideramos la diversidad de especies analizadas. El error relativo medio (ERM), en %, esta definido por:

$$ERM = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{R_{med} - R_{est}}{R_{med}} \right] \right\} \times 100 \quad (4-6)$$

donde med se refiere a medida, est a estimada y R a reflectancia de la banda del V, R e IRC.



**Figura 4-5. Ajuste del modelo de los ángulos cenitales para las bandas del V, R e IRC.**

La Figura 4-6 muestra un diagrama acimutal de los parámetros b para las bandas del R e IRC, sin considerar las diferencias acimutales de  $0^\circ$  y  $180^\circ$ , por problemas de sombreado del área de visión por el goniómetro, para el caso de un suelo claro seco y mojado; para el caso de coberturas aéreas a nadir mayores a 61%. La Figura 4-6 muestra esta misma información para coberturas entre 45 y 55 %; y la Figura 4-7 para el caso de coberturas entre el 18 y 28 %.

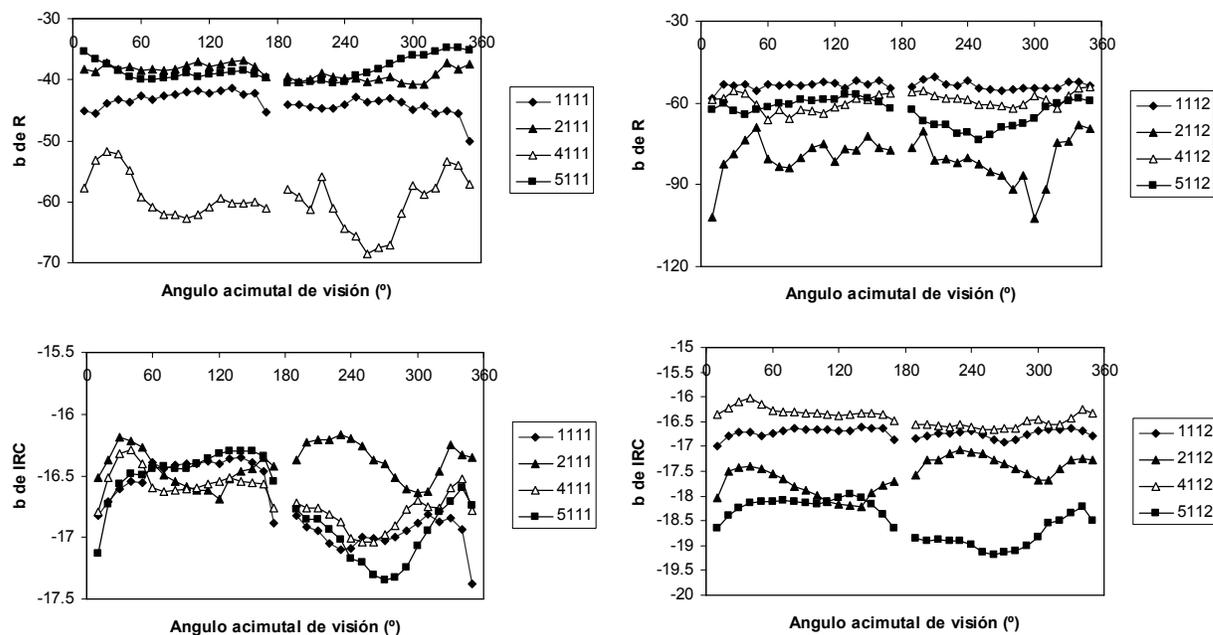


Figura 4-6. Diagramas acimutales de las bandas del R e IRC para un suelo claro seco y húmedo, con cobertura aérea a nadir mayor del 61 %.

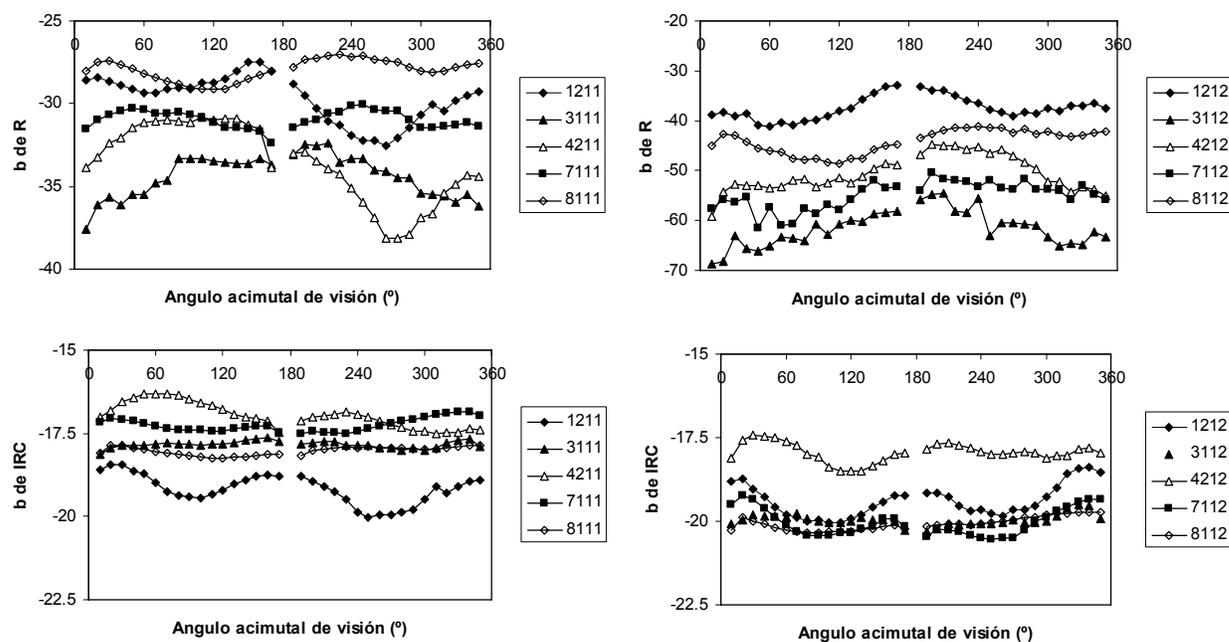
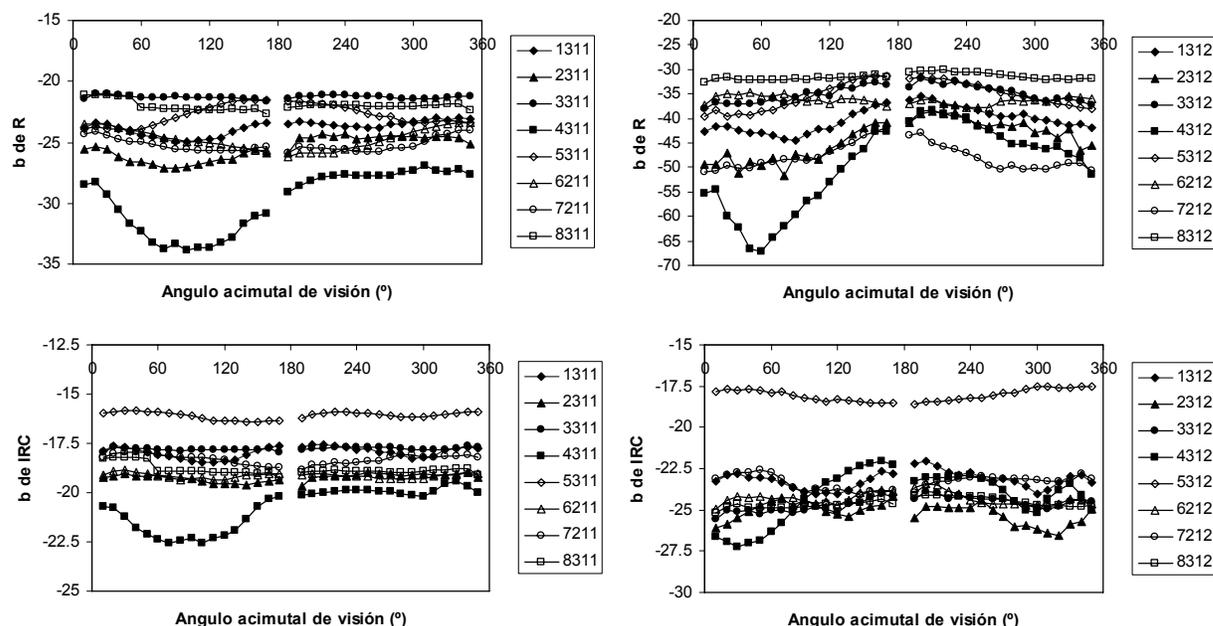


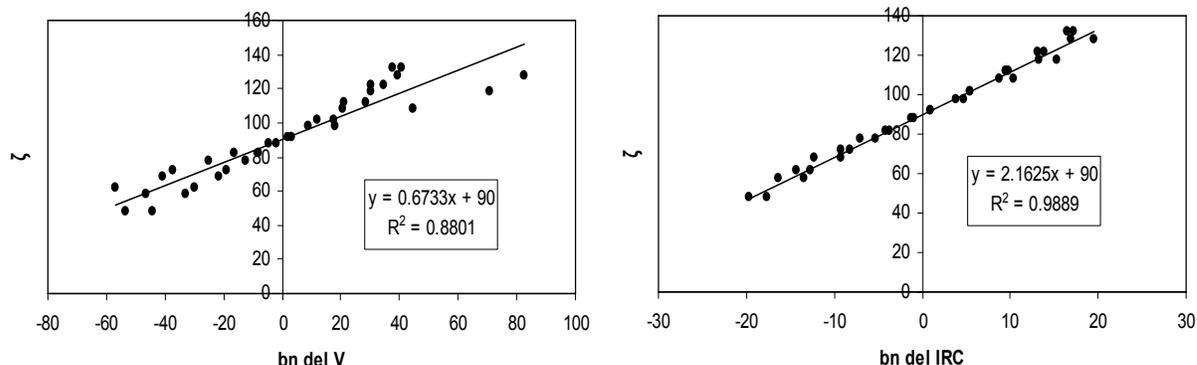
Figura 4-7. Diagramas acimutales de las bandas del R e IRC para un suelo claro seco y húmedo, con cobertura aérea a nadir entre el 45 y 55 %.



**Figura 4-8 Diagramas acimutales de las bandas del R e IRC para un suelo claro seco y húmedo, con cobertura aérea a nadir entre el 18 y 28 %.**

Si analizamos los valores del parámetro  $b$ , podemos concluir que, en general, hay zonas de confusión (traslape) entre especies, dependiendo de las propiedades ópticas de los suelos. Esto es particularmente crítico en las  $b$  de la banda del IRC, donde existe menor contraste entre los parámetros  $b$ . En el caso de la banda del R, el contraste es mayor; aunque mantiene los problemas de confusión en la discriminación de clases.

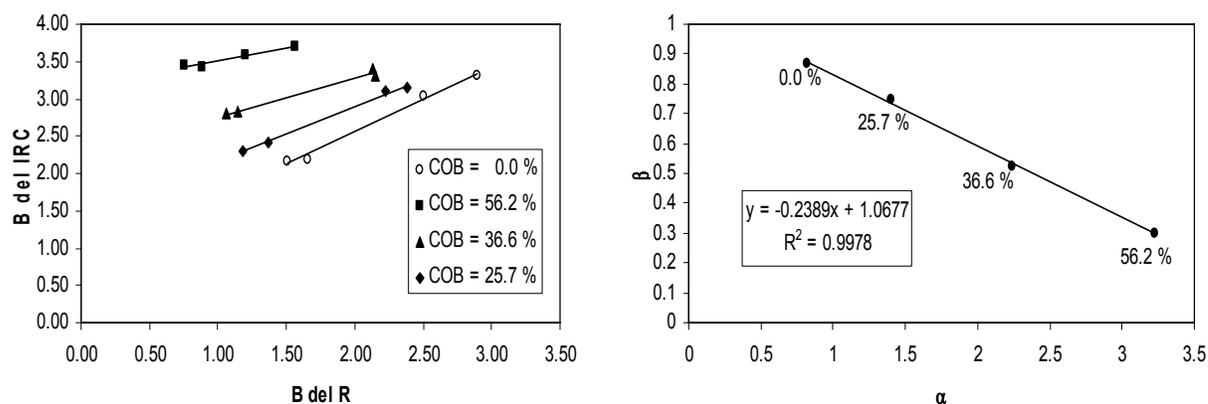
La Figura 4-9 muestra el peor ajuste del modelo de las diferencias acimutales, relaciones (4-2), que se refiere al caso de especie encino con fondo de suelo oscuro y mojado, para la banda del V. En esa misma figura se muestra el ajuste del modelo para la banda del IRC (menos anisotrópico por efecto de interacciones múltiples de la radianza). En general, los ajustes del modelo de las diferencias acimutales resultó en  $R^2 \geq 0.99$ .



**Figura 4-9. Peor ajuste del modelo de las diferencias acimutales para todas las especies y suelos.**

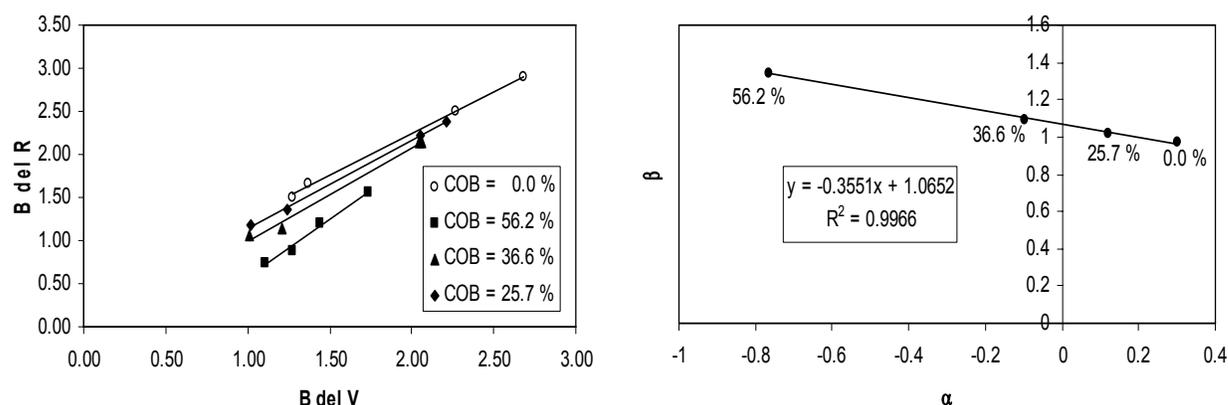
### Ajuste de los modelos del efecto del suelo y del follaje

En la Figura 4-10 se muestra las curvas iso-IAF multi-angulares (cuatro tipos de propiedades ópticas de los suelos del fondo de la vegetación), espacio multi-angular del R-IRC, para el caso de la especie acacia (especie 2), donde en cada curva fue ajustado el modelo lineal de la relación (4-4) para su análisis en el espacio  $\alpha$ - $\beta$ . En el caso del espacio multi-angular del R-IRC, los problemas de vegetación y suelo mojados se agudizan por tener patrones angulares sujetos a diferentes tipos de interacción (predominio de las interacciones simples y múltiples). Para reducir esa clase de efectos, se desecharon los datos de coberturas mayores al 60 % para los casos de vegetación y suelo mojado.



**Figura 4-10. Patrones multi-angulares de los espacios B del R-B del IRC y  $\alpha$ - $\beta$  para la especie 2.**

En el caso de las bandas del visible, los efectos del mojado de la vegetación y suelo (interacciones simples) se presentan en todas las bandas, por lo que no es necesario eliminar datos con patrones diferentes. La Figura 4-11 muestra la situación de modelación para las bandas del V y del R.



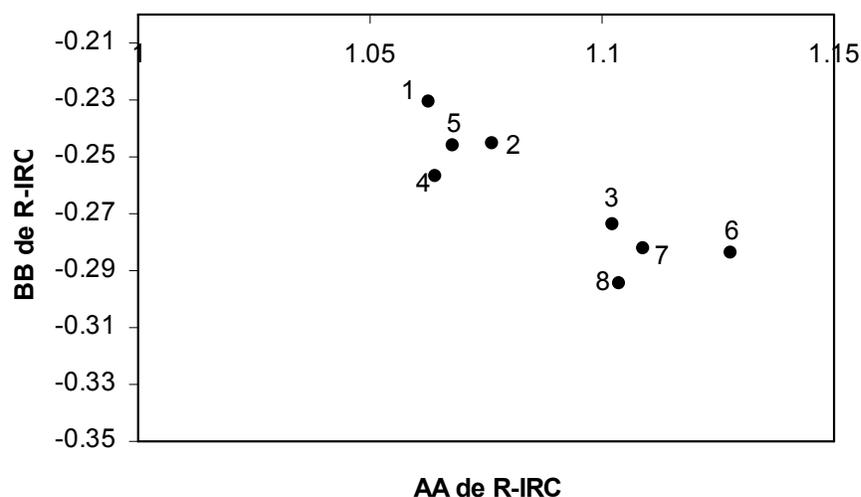
**Figura 4-11. Patrones multi-angulares de los espacios B del V-B del R y  $\alpha$ - $\beta$  para la especie 2.**

En general, los patrones ajustados del modelo de la relación (4-4) y (4-5) fueron ajustados con valores de  $R^2 \geq 0.99$ . Así, la modelación de las mediciones multi-angulares de las reflectancias puede compactarse al caso de dos parámetro (AA y BB de la relación 4-5).

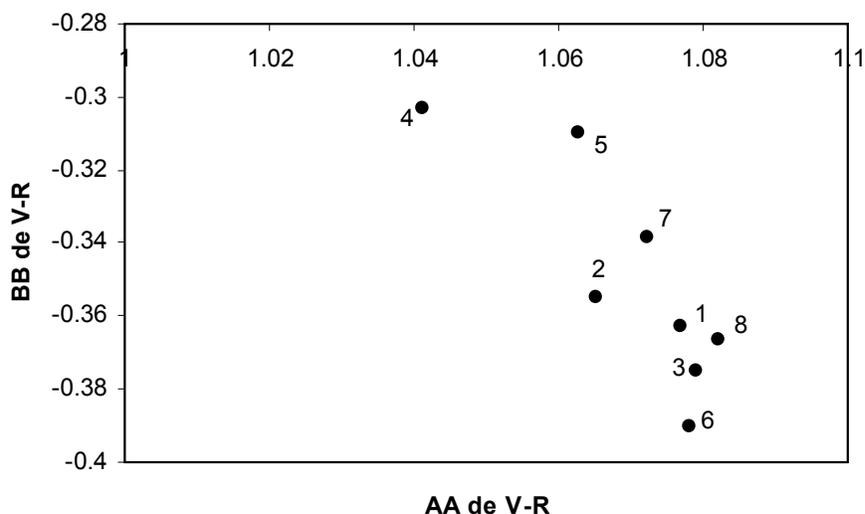
### Modelo global ajustado y discriminación de especies

De acuerdo a la relación (4-5), en el espacio supra-paramétrico AA-BB se pueden sintetizar los efectos multi-angulares, los del suelo y los del follaje.

En la Figura 4-12 se muestra el espacio AA-BB para el caso de los patrones asociados a las bandas del R e IRC; y en la Figura 4-12 la de las bandas del V y R.



**Figura 4-12. Espacio supra-paramétrico AA-BB para las bandas del R e IRC.**



**Figura 4-13. Espacio supra-paramétrico AA-BB para las bandas del V y R.**

Aunque las Figuras 4-12 y 4-13 muestran patrones separables de la información multi-angular para las distintas especies analizadas, los valores de los supra-parámetros AA y BB están muy cercanos entre si, por lo que resulta difícil discriminar las clases de vegetación en términos operacionales.

Por otro lado, las posiciones de los patrones AA-BB para las distintas especies no muestran una coherencia (en apariencia) en relación a las propiedades ópticas y angulares del follaje de las especies analizadas (Cuadro 4-1).

### CONCLUSIONES

Usando un modelo multi-angular para los efectos de los ángulos cenitales y acimutales de las reflectancias, generalizado para el caso de los efectos del suelo de fondo de la vegetación y de la densidad de plantas (follaje), se analizaron los datos de un experimento bajo condiciones de laboratorio (mediciones bi-cónicas de los factores de reflectancia) para ocho especies contrastantes y el caso del suelo desnudo.

Los resultados muestran que las clases de vegetación analizadas resultan en confusión (traslapes), por lo que la información multi-angular tiene una contribución relativamente baja para discriminar entre especies.

Para poder concluir en términos contundentes sobre el uso de la información multi-angular, es necesario realizar otros tipos de modelaciones: relación entre los parámetros B y las reflectancias a nadir y efecto multi-angular en las curvas iso-IAF de acuerdo al esquema planteado en Paz *et al.* (2007). No obstante esto, el hecho de modelar en forma completa los efectos multi-angulares de las reflectancias con un sólo parámetro (B), requiriendo un sólo dato (aplicable a nivel píxel por píxel, sin ninguna hipótesis de homogeneidad o estacionariedad), plantea un camino para fusionar información multi-angular con la determinada a nadir por satélites no-angulares.

### LITERATURA CITADA

- ASD. 1999. Technical guide. Third Edition. Analytical Spectral Devices, Inc. 136 p.
- Asner, G.P. 2000. Contributions of multi-view angle remote sensing to land-surface and biogeochemical research, *Remote Sensing reviews*, 1-26.
- Barnsley, M.J., D. Allison, and P. Lewis. 1997. On the information content of multiple view angle (MVA) images, *International Journal of Remote Sensing*, 18: 1937-1960.

- Bicheron P., M. Leroy, and F.M. Breon. 1997. Enhanced discrimination of boreal forest covers with directional reflectances from the airborne polarization and directionality of earth reflectances (POLDER) instrument, *Journal of Geophysics Research*, 102: 29517-29531.
- Bolaños, M., F. Paz, E. Palacios, E. Mejía, y A. Huete. 2007. Modelación de los efectos de la geometría sol-sensor en la reflectancia de la vegetación. *Agrociencia*, 41: 527-537.
- Di Girolamo, L. 2003. Generalizing the definition of the bi-directional reflectance distribution function. *Remote Sensing of Environment*, 88: 479-482.
- Diner, D.J., G.P. Asner., R. Davies., Y. Knyazhikin., J.P. Muller., A.W. Nolin., B. Pinty., C.B. Schaaf., and J. Stroeve. 1999. New directions in earth observing: scientific applications of multiangle remote sensing. *Bulletin of the Meteorological Society*, 80: 2209-228.
- Diner, D.J., B.H. Braswell, R. Davies, N. Gobron, J. Hu, Y. Jin, R.A. Khan, Y. Knyazikhin, N. Loeb, J.P. Muller, A.W. Nolin, B. Pinty, C.B. Schaaf, G. Seiz, and J. Stroeve. 2005. The value of multiangle measurements for retrieving structurally and radiatively consistent properties of clouds, aerosols, and surfaces. *Remote Sensing of Environment*, 97: 495-518.
- Engelson, O., B. Pinty, M.M. Verstraete, and J.V. Martonchik. 1996. Parametric bidirectional reflectance factor models: evaluation, improvements and applications. EUR 16426 EN, EC Joint Research Centre, Ispra, Italy. 120 p.
- Friedl, M., and C. Brodley. 1997. Decision tree classification of land cover from remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 61: 399-409.
- Gao, F., C.B. Schaaf, A.H. Strhler, Y. Jin, and X. Li. 2003. Detecting vegetation structure using kernel-based BRDF model. *Remote Sensing of Environment*, 86: 198-205.
- Gerard, F. 2003. Single angle, dual angle and multi-temporal viewing: assessing through modeling the implications for forest structure variable extraction. *International Journal of Remote Sensing*, 24:1317-1334.

- Gerard, F.F., and P.R.J. North. 1997. Analyzing the effect of structural variability and canopy gaps on forest BRDF using a geometric-optical model. *Remote Sensing of Environment*, 62: 46-63.
- Gobron N., B. Pinty., M.M. Verstraete., J.L. Widlowski., and D.J. Diner. 2002. Uniqueness of multiangular measurements – Part II: joint retrieval of vegetation structure and photosynthetic activity from MISR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40: 1574-1592.
- Goldshleger, N., E. Ben-Dor, Y. Benyamini, D. Blumberg, and M. Agassi. 2002. Spectral properties and hydraulic conductance of soil crusts formed by raindrop impact. *International Journal of Remote Sensing*, 23: 3909-3920.
- Hyman, A.H., and M.J. Barnsley. 1997. On the potential for land cover mapping from multiple-view-angle (MVA) remotely-sensed images. *International Journal of Remote Sensing*, 18: 2471-2475.
- Knyazikhin Y., J.V. Martonchik., D.J. Diner., R.B. Myneni., M. Verstraete., B. Pinty., and N. Gobron. 1998b. Estimation of vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from atmosphere-corrected MISR data. *Theory Journal of Geophysics Research*, 103 (D24), 32239-32256.
- Knyazikhin Y., J.V. Martonchik., R.B. Myneni., D.J. Diner., and S.W. Running. 1998a. Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data. *Theory Journal of Geophysics Research*, 103: 32257-32275.
- Lotsch A., Y. Tian., M.A. Friedl., and R.B. Myneni. 2003. Land cover mapping in support of LAI/FAPAR retrievals from EOS-MODIS and MISR: classification methods and sensitivities to errors. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 10, 1997-2016.
- Lovell, J.L., and R.D. Graetz. 2002. Analysis of POLDER-ADEOS data for the Australian continent: the relationship between BRDF and vegetation structure. *International Journal of Remote Sensing*, 23: 2767-2796.
- Morin J., D. Goldberg, and I. Seginer. 1967. A Rainfall simulator with a rotating disk. *Transactions of ASAE*, 10: 74-79.

- Myneni, R.B., Nemani, R.R., and S.W. Running. 1997. Estimation of global leaf area index and absorbed PAR using radiative transfer models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35: 1380-1393.
- Nicodemus, F.E., J.C. Richmond., J.J. Hsia., I.W. Ginsberg., and T. Limperis. 1977. Geometrical considerations and nomenclature for reflectance. NBS Monogr. No. 160, National Bureau of Standards, U.S. Department of Commerce, 52 p.
- Paz, F., E. Palacios, E. Mejía, M. Martínez, y L.A. Palacios. 2005. Análisis de los espacios espectrales de la reflectividad del follaje de los cultivos. *Agrociencia*, 39: 293-301.
- Paz, F., E. Palacios, M. Bolaños, L.A. Palacios, M. Martínez, E. Mejía, y A. Huete. 2007. Diseño de un índice espectral de la vegetación: NDVIcp. *Agrociencia*, 41: 539-554.
- Paz, F., y M. Bolaños. 2006. Modelación de la BRDF en la vegetación: reporte final, Reporte Noviembre para AGROASEMEX, 66 p.
- Pinty B., J.L. Widlowski., N. Gobron., M.M. Verstraete., and D.J. Diner. 2002. Uniqueness of multiangular measurements – Part I: an indicator of subpixel surface heterogeneity from MISR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40: 1560-1573.
- Rahman H., B. Pinty., and M.M. Verstraete. 1993. Coupled surface-atmosphere reflectance (CSAR) model 2. Semiempirical surfaces model usable with NOAA advanced very high resolution radiometer data. *Journal of Geophysics Research*, 98: 20791-20801.
- Ross, J. K. 1981. The radiation regime and architecture of plant stands. Dr. W. Junk , Norwell, Mass, 392 p.
- Schaepman-Strub, G., M.E. Schaepman, T.H. Painter, S. Dangel, and J.V. Martonchik. 2006. Reflectance quantities in optical remote sensing – definitions and case studies. *Remote Sensing of Environment*, 103: 27-42.
- Wanner W., X. Li., and A.H. Strahler. 1995. On the derivation of kernels for kernel-driven models of bidirectional reflectance. *Journal of Geophysics Research* 100: 21077-21089.

Zhang Y., Y. Tian., R.B. Myneni, and Y. Knyazikhin. 2002a. Required consistency between biome definitions and signatures with the physics of remote sensing. I: empirical arguments. *Remote Sensing of Environment*, 80: 418-434.

Zhang Y., N. Shabanov., Y. Knyazikhin., and R.B. Myneni. 2002b. Required consistency between biome definitions and signatures with the physics of remote sensing. II: theoretical arguments. *Remote Sensing of Environment*, 80:435-446.

## CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

### CONCLUSIONES

En este trabajo se han analizado las diferentes aproximaciones de los sistemas de clasificación de la vegetación, al igual que los sistemas basadas en el uso de los sensores remotos, como un medio para lograr clasificaciones operacionales de los sistemas de vegetación y se ha discutido sus resultados y limitaciones.

Partiendo de una discusión del uso de la información espectral multi-angular para clasificar y caracterizar a la vegetación, se han analizado las diferentes propuestas teóricas que soportan esta estrategia, así como los modelos de la función de distribución bidireccional de las reflectancias (BRDF).

Usando un modelo simplificado de la BRDF, dependiente de un sólo parámetro, se han analizado los resultados de un experimento de sistemas arbolados en maquetas, donde se realizaron mediciones de las reflectancias variando los ángulos cenitales de visión y de iluminación. El modelo ajustado de la BRDF resulto bueno, para todas las bandas del sensor TM (Landsat 5) y para la gran mayoría de los casos analizados las BRDF fueron excelentes ( $R^2 > 0.98$ ), mostrando así que la BRDF puede ser aproximada en forma simple al usar simetrías angulares.

La información del modelo de la BRDF fue compactada analizando las pendientes para las bandas del R e IRC, con el ángulo cenital solar implícito, de tal forma que se pudiera analizar los patrones de esta aproximación en función de la cobertura aérea de las cinco especies forestales analizadas. Los resultados ( $R^2 > 0.9$ ) indican que, dejando el suelo del fondo de la vegetación fijo, las señales espectrales multi-angulares son separables, pero si el suelo varía (sus propiedades ópticas), entonces se presenta confusión en la información espectral multi-angular, para el caso de coberturas aéreas bajas, reduciéndose este problema a medida que la cobertura aérea se incrementa, por lo que el uso de la información multi-angular no es lo suficientemente discriminatoria para clasificar la vegetación natural.

Los resultados de este trabajo muestran que los cambios en las propiedades ópticas de los suelos de fondo producen confusiones en las clasificaciones basadas en la información espectral multi-angular.

Aunque la modelación presentada, en el segundo experimento, permite compactar en forma paramétrica los efectos del ángulo cenital de visión e iluminación, los efectos del ángulo acimutal relativo, además de los fondos y densidades de plantas, para las 8 especies y suelos analizados, con errores relativos menores al 8 % y  $R^2 \geq 0.99$ , hacen difícil una discusión de la factibilidad de clasificar la vegetación natural usando información espectral multi-angular.

Si se deja fijo el fondo y la cantidad de follaje de la vegetación, la discriminación de especies es factible. No obstante esto, en condiciones operacionales la variación de los fondos de la vegetación, así como del follaje de la vegetación esta garantizada, por lo que la utilización de hipótesis de invarianza (propiedades típicas) puede conducir a grandes errores.

El uso de un modelo multi-angular para los efectos de los ángulos cenitales y acimutales de las reflectancias, generalizado para el caso de los efectos del suelo de fondo de la vegetación y de la densidad de plantas (follaje), en un experimento bajo condiciones de laboratorio (mediciones bi-cónicas de los factores de reflectancia), con un error relativo medio de 6.8 % para una muestra de 61,200 datos y  $R^2 \geq .99$  para la mayoría de los casos, muestra que las clases de vegetación analizadas resultan en confusión (traslapes), por lo que la información multi-angular tiene una contribución relativamente baja para discriminar entre especies.

Aun que en el espacio supra-paramétrico AA-BB se muestran patrones separables de la información multi-angular para las distintas especies analizadas, los valores de los supra-parámetros AA y BB están muy cercanos entre si, por lo que resultan difíciles de discriminar las clases de vegetación en términos operacionales.

Por otro lado, las posiciones de los patrones AA-BB para las distintas especies no muestran una coherencia (en apariencia) en relación a las propiedades ópticas y angulares del follaje de las especies analizadas.

Sin embargo, el hecho de modelar en forma completa los efectos multi-angulares de las reflectancias con un solo parámetro (B), requiriendo un solo dato (aplicable a nivel píxel por píxel, sin ninguna hipótesis de homogeneidad o estacionalidad), plantea un camino para fusionar información multi-angular con la determinada a nadir por satélites no-angulares.

## RECOMENDACIONES

Evitar el uso de hipótesis de invarianza de las propiedades típicas de la vegetación (características del fondo y la cantidad de follaje de la vegetación), dado que en condiciones operacionales de un sistema de clasificación con sensores remotos la variabilidad de estos factores esta garantizada.

Para poder concluir en términos definitivos sobre el uso de la información multi-angular, se recomienda realizar otros tipos de modelaciones, relacionando los parámetros B y las reflectancias a nadir y el efecto multi-angular en las curvas iso-IAF de acuerdo al esquema planteado en Paz *et al.* (2007).

Continuar con los desarrollos planteados en esta investigación referentes a la información multi-angular así como del análisis de la cobertura vegetal durante y después de eventos de precipitación.

Continuar con el estudio de los factores espectrales, espaciales y temporales para que se puedan integrar en un sistema de clasificación de la vegetación con sensores remotos.

Realizar una segunda campaña de mediciones multi-angulares de las especies vegetales medidas en el laboratorio pero ahora estableciéndolas en el campo.

Incrementar las dimensiones del goniómetro al doble para poder analizar la información referente al ángulo cenital de 60°.

Realizar una tercera campaña de medición en ecosistemas reales con sensores terrestres y satelitales.

## **ANEXO A EXPERIMENTO: SISTEMAS ARBOLADOS**

### **A-1. INTRODUCCIÓN**

Con la finalidad de analizar si la información espectral multi-angular puede discriminar los diferentes tipos de vegetación, particularmente los arbolados, se diseñó un experimento tipo maqueta en las instalaciones del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Estado de México, en septiembre de 2006. El experimento consistió en la utilización de 5 especies forestales. (Oyamel, Encino, Fresno, Pino greggii y P. Montezumae), tres densidades, dos tipos de suelo (claro y oscuro). Para realizar las mediciones multi-angulares fue necesario el diseño y construcción de una plataforma de medición, equipada con un radiómetro hiperespectral ASD, un termómetro Apogee y una cámara digital Sony.

### **A-2. EXPERIMENTOS CONTROLADOS**

Para poder lograr los objetivos de la investigación se diseñó una campaña de medición utilizando cinco especies forestales de importancia económica en nuestro país, con la finalidad de medir la reflectancia bajo diferentes condiciones de iluminación, visión, densidad y fondo del suelo. Esta campaña se realizó bajo condiciones controladas, con el objetivo fundamental de obtener las funciones generales de comportamiento de la reflectancia.

En este sentido, es necesario mencionar que para poder controlar todos los factores que influyen en el comportamiento de la reflectancia de la mezcla suelo-vegetación, fue necesario diseñar y construir una plataforma de medición en donde se colocaron las plantas que fueron medidas, con diferentes densidades, al igual que los fondos de la vegetación (se utilizaron dos tipos de suelo: claro y oscuro). El objetivo de la plataforma de medición fue el de crear un bosque a escala (tipo maqueta), para poder medir diferentes mezclas de suelo-vegetación.

Los sensores de medición (radiómetro hiperespectral, termómetro de infrarrojo y cámara digital) se montaron en una estructura de medición, con la que fue posible controlar el ángulo de visión. El ángulo solar se calculó de acuerdo a la fecha, hora de medición y localización (latitud, longitud).

En relación a lo mencionado anteriormente, a continuación se describen los aspectos más relevantes de la campaña de medición. Adicionalmente, en la parte final del presente documento, se presenta una descripción general de los instrumentos utilizados.

#### **Especies forestales medidas**

Como se mencionó anteriormente, se utilizaron cinco especies forestales, de las cuales dos fueron de hoja ancha (encino y fresno) y tres de hoja acicular

(*montezumae*, *greggii* y *oyamel*). La selección de especies forestales se realizó con el objetivo de medir las variaciones espectrales de especies con diferentes características: tipo de hoja, altura, porcentaje de cobertura, etc.

Las especies forestales utilizadas tuvieron porte pequeño al momento de ser medidas (edad inferior a dos años, en todos los casos). Las principales características de estas especies se aprecian en el Cuadro A-1.

**CUADRO A-1. CARACTERÍSTICAS DE LAS ESPECIES FORESTALES MEDIDAS**

Nombre común	Nombre científico	Tipo de hoja	Altura (cm)	Diámetro de tallo (mm)	Diámetro basal (cm)
Oyamel	<i>Abies religiosa</i>	Acicular	38.1	24.4	0.57
Fresno	<i>Fraxinus uhdei</i>	Ancha	75.6	37.8	0.97
Encino	<i>Quercus rugosa</i>	Ancha	73.9	21.6	0.69
Pino greggii	<i>Pinus greggii</i>	Acicular	34.2	14.5	0.48
Pino montezumae	<i>Pinus montezumae</i>	Acicular	8.9	41.8	1.13

Las Figuras A-1 a A-5 muestran las especies forestales utilizadas para el experimento controlado. Es importante hacer notar que la selección de las especies forestales fue realizada en función de la disponibilidad en viveros cercanos y representan especies de interés comercial en la zona centro el país.



**Figura A-1. Oyamel (*Abies religiosa*)**



**Figura A-2. Fresno (*Fraxinus uhdei*)**



**Figura A-3. Encino (*Quercus rugosa*).**



**Figura A-4. Pino Greggii (*Pinus greggii*).**



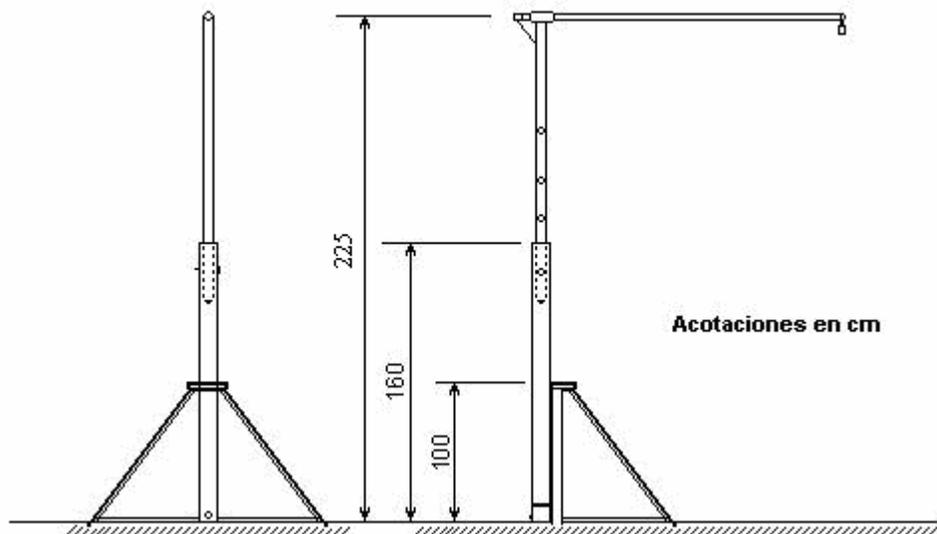
**Figura A-5. Pino montezumae (*Pinus montezumae*).**

### Estructura de medición

Para llevar a cabo las mediciones espectrales, variando la geometría de visión (medición de la Función de Distribución Bidireccional de la Reflectancia, BRDF, por sus siglas en inglés), se utilizó una estructura metálica de medición construida ex profeso, la cual permitió la medición de la reflectancia con diferentes ángulos de visión (de  $-50^\circ$  a  $50^\circ$  con incrementos de  $10^\circ$ ). La estructura de medición consistió básicamente de una base metálica para darle estabilidad a la estructura (tripié) y un brazo giratorio de longitud variable para posibilitar la medición con diferentes ángulos de visión. La estructura de medición se muestra en la Figura A-6.

### Instrumentos de medición

El equipo de medición consistió de una cámara digital (cálculo de cobertura vegetal), un radiómetro hiperespectral ASD (*Analytical Spectral Device*) y un termómetro de infrarrojo. Este equipo de medición se montó en la estructura metálica y se mantuvo a una distancia de 2.25m del área de muestreo independientemente del ángulo de visión; es decir la longitud del brazo giratorio se ajustó conforme se varió el ángulo de visión de tal forma que el equipo de medición siempre midiera la misma área. Adicionalmente, se utilizó un ceptómetro, para medir la Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR, por sus siglas en inglés); y radiómetro multiespectral *Cropscan* de cinco bandas (reflectancia) para medir la cantidad de luz directa y luz difusa recibida en el área de medición, al momento de realizar cada una de las mediciones.



**Figura A-6. Estructura de medición BRDF.**

Las características detalladas de los instrumentos de medición utilizados se muestran en el Cuadro A-2, y la forma en que éstos fueron colocados en la estructura de medición en la Figura A-7.

CUADRO A-2. CARACTERÍSTICAS DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN UTILIZADOS

Propiedad medida	Instrumento	Marca	Modelo	Angulo de visión	Características del instrumento
Reflectancia	Radiómetro hiperespectral	ASD	FR Jr	2.25:1	Rango de medición 350-2500nm Cinco bandas espectrales: azul (450-520nm), verde (520-600nm), roja (630-690), infrarroja cercana (760-900nm) e infrarroja media (1550-1750nm)
Reflectancia	Radiómetro multiespectral	Cropscan	MSR16R	2:1	Rango de medición térmica de 6500 a 14000nm (6.5 a 14 $\mu$ m)
Temperatura Radiativa	Termómetro de infrarrojo	Apogee	IRTS-P	3:1	5.0 megapíxeles de resolución
Porcentaje de cobertura PAR	Cámara digital	Sony	Cyber-shot DSC-V1	1:1	400 a 700nm
	Cetómetro	Decagon	Accupar	---	

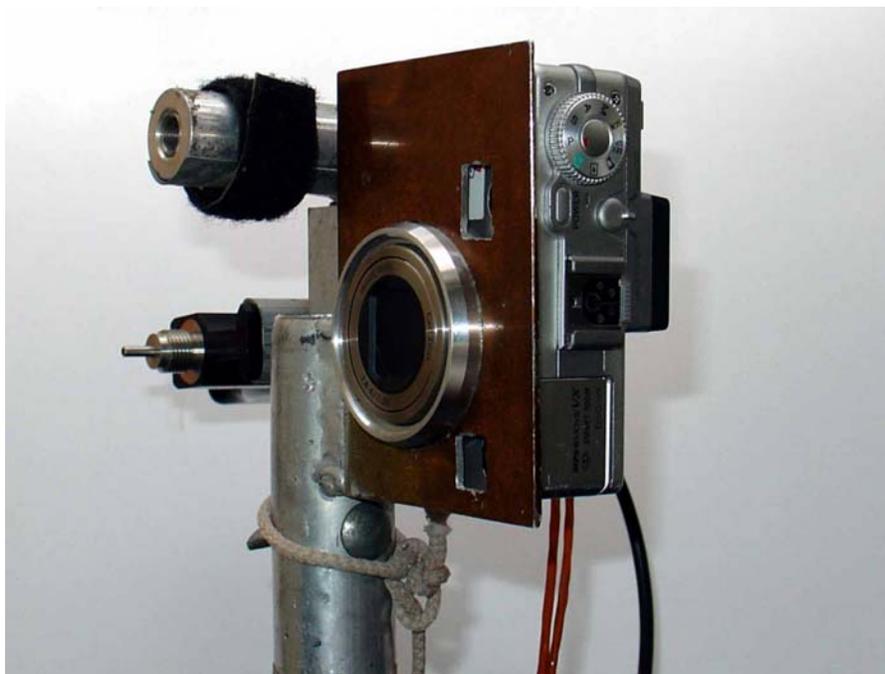


Figura A-7. Instrumentos de medición sobre la estructura metálica.

### Área de medición

El área de medición se montó sobre una estructura metálica sobre la cual se apoyaron tablas de madera de 10cm de ancho. Las tablas de madera se perforaron cada 10cm, y posteriormente se cubrieron estas perforaciones con pedazos de

esponja, de tal forma que los tallos de los árboles pasaran por los huecos sin sufrir daño y que el suelo que se colocara sobre las tablas pudiera ser soportado por las mismas, sin perderse por los huecos.

Cada una de las tablas de soporte fue colocada en forma intercalada con hileras de plantas de acuerdo a la densidad en cuestión, tal como se aprecia en la Figura A-8.

La estructura metálica y las tablas se diseñaron con la finalidad de servir como plataforma para sostener una capa de suelo de 3cm de espesor, así como para facilitar el cambio del mismo, ya que como se mencionó anteriormente, se utilizaron dos tipos de suelo, uno claro y otro oscuro, como fondo de la vegetación. En las Figuras A-9 y A-10 se aprecia el resultado final, visión a nadir, de la plataforma de medición.



**Figura A-8. Procedimiento de armado de la plataforma de medición.**

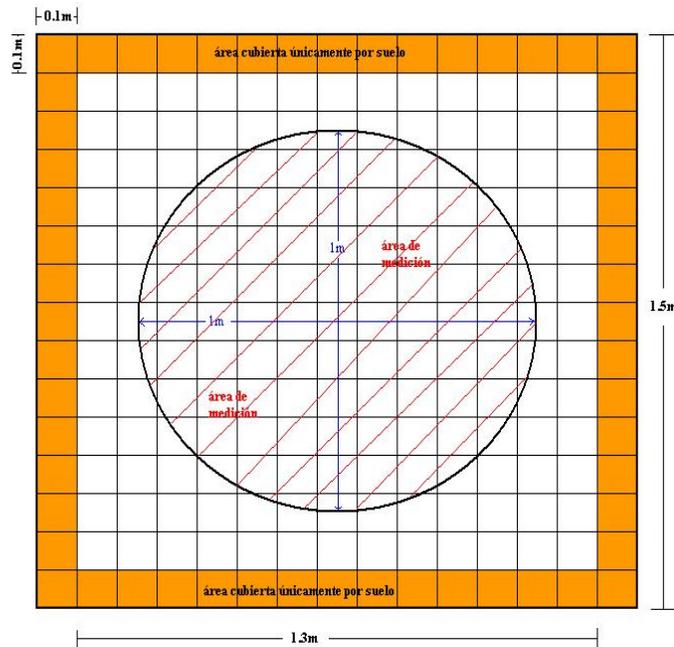


**Figura A-9. Plataforma de medición, visión nadir (suelo claro).**



**Figura A-10. Plataforma de medición, visión nadir (suelo oscuro).**

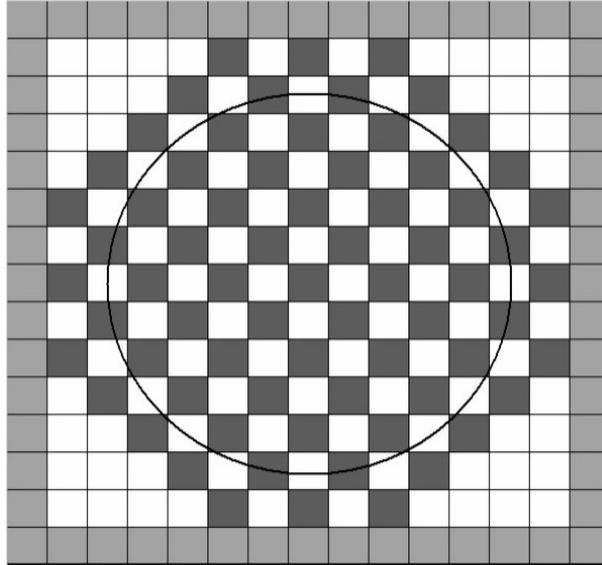
El área de medición fue, en todos los casos, un círculo de 1m de diámetro, tal como se observa en la Figura A-11. El área máxima con posibilidades de ser cubierta por plantas fue de 1.30x1.30m, sin embargo se agregó un área exterior de 10cm que fue cubierta, en todos los casos, por suelo. El tamaño total de la plataforma de medición fue de 1.5m x 1.5m.



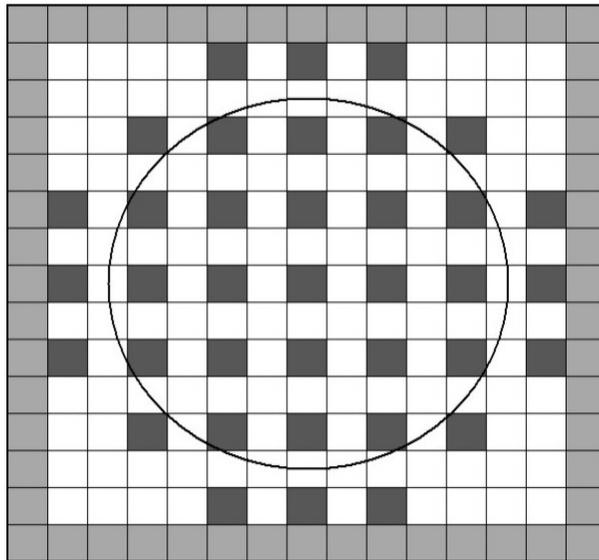
**Figura A-11. Plataforma y área de medición**

### Densidades utilizadas

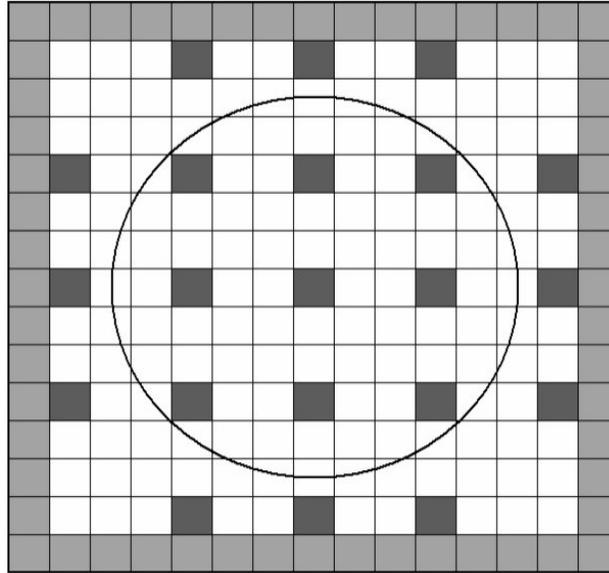
Para llevar a cabo las mediciones se utilizaron tres densidades de planta: tres bolillo 10cm x 10cm, marco real 20cm x 20cm y 30cm x 30cm. Las densidades utilizadas se aprecian en las Figuras A-12 a la A-14, en las que los cuadros verdes representan espacios cubiertos con plantas y los cuadros blancos espacios sin planta (cubiertos por suelo).



**Figura A-12. Densidad 1: tres bolillo 10x10cm**



**Figura A-13. Densidad 2: Marco real 20x20cm**



**Figura A-14. Densidad 3: Marco real 30x30cm**

### **Procedimiento de medición**

Como ya se mencionó anteriormente, el equipo que se montó en la estructura de medición fue una cámara digital, un radiómetro hiperespectral (ASD) y un termómetro de infrarrojo. La estructura de medición se orientó siempre hacia el norte y las mediciones se realizaron, en todos los casos, en el siguiente orden:

- a) De nadir a  $50^\circ$  en la dirección este (ángulo azimutal de  $90^\circ$ )
- b) De  $50^\circ$  a nadir en la dirección oeste (ángulo azimutal de  $270^\circ$ )

Una medición completa, para una especie, densidad, ángulo solar y tipo de suelo en particular correspondió a la generación de doce espectros para la combinación en cuestión, correspondiente a cada uno de los ángulos de visión con que fue medida.

Al terminar una medición completa se cambió el tipo de suelo lo mas rápido posible (5-7 minutos), con la finalidad de medir la combinación especie-densidad con la menor variación posible del ángulo solar, con respecto al otro tipo de suelo.

En un mismo día se midió una sola combinación especie-densidad, con cuatro ángulos solares diferentes (horas del día variable) para cada tipo de suelo; por lo que se realizaron un total de ocho mediciones completas por día.

Adicionalmente, se utilizó un radiómetro multiespectral (Cropscan) para medir la cantidad de luz directa y luz difusa recibida en el área de medición, al mismo tiempo de realizar cada una de las mediciones con el radiómetro hiperespectral (ASD), lo cual se logró realizando una medición libre (radiación total) y otra cubriendo el sensor con un cartón colocado horizontalmente sobre el radiómetro, a una distancia de

30cm, para medir bajo condiciones de luz difusa únicamente. La radiación directa se puede calcular por diferencia de las dos anteriores.

Por otra parte, también se utilizó un ceptómetro para medir la cantidad de energía interceptada por las plantas, en el rango de luz visible (400-700nm). Estas mediciones se realizaron en forma previa a las mediciones con la estructura de medición. Las mediciones realizadas con este equipo fueron hechas con orientación a cada uno de los puntos cardinales (norte, sur, este y oeste). Cada una de estas mediciones consistió de lecturas de la cantidad de energía que llega a la superficie, la que llega abajo del dosel de las plantas, la reflejada por la vegetación y la reflejada por el suelo.

### **A-3. DESCRIPCIÓN DE INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN**

#### **Radiómetro hiperspectral ASD**

Mide la cantidad de energía reflejada por una superficie en un rango de 350 a 2500nm con una resolución de 3nm a 700nm (Visible/Infrarrojo Cercano o VNIR) 30nm en el Infrarrojo medio (1050 a 2500nm). Consta de un cable de fibra óptica (muestreo de luz), una unidad de separación y conversión de la señal y una unidad de almacenamiento y manejo (*laptop*). Este equipo de medición se aprecia en la Figura A.15.

Dentro del instrumento la luz es proyectada desde la fibra óptica a una red de difracción holográfica donde los componentes de la longitud de onda son separados y reflejados para mediciones independientes de los detectores. Cada detector convierte los fotones incidentes en electrones que son almacenados, o integrados, hasta que el detector es leído. En este momento, la corriente fotoeléctrica para cada detector es convertida a un voltaje y es digitalizada por un convertidor análogo a digital (A/D) de 16 bits. El dato digital se transfiere entonces a la memoria principal de la computadora usando el Puerto Paralelo Mejorado (EPP, por sus siglas en inglés). En este momento el dato espectral es disponible para procesamiento por el *software* controlador.



**Figura A-15. Radiómetro hiperespectral ASD**

#### *Colección de luz*

El cable de fibra óptica tiene una visión cónica subtendiente para un ángulo de visión de alrededor de 25 grados (2.25:1). La luz puede ser colectada por el cable de fibra óptica desnudo (caso del presente experimento), o con el uso de artefactos ópticos (tubos de reducción del campo de visión (FOV) de 8 o 1 grado, Receptores Coseno Remotos (RCR), etc.).

#### *Optimización*

Para los instrumentos ASD, la optimización es lo mismo que el proceso de dilatación de las pupilas en nuestros propios ojos. Esto es el ajuste de la sensibilidad a las condiciones variables de iluminación. El espectroradiómetro puede hacer esto en dos formas: la región VNIR tiene un tiempo de integración ajustable por el software, el cual determina que tan largo es el periodo en el que el arreglo coleccionará energía en la región 350-1050nm. Los escaners SWIR (1000 - 2500nm) usan ganancias ajustadas automáticamente para amplificar la señal.

La optimización es casi completamente automatizada, por lo que el usuario necesita decirle al instrumento cuando optimizar. Cuando se usa el instrumento en condiciones de luz ligeramente variables, es imperativo ejecutar una optimización frecuentemente.

### *Corriente oscura (DC)*

Una cierta cantidad de corriente eléctrica es generada por electrones termales (llamada corriente oscura) y es adicionada a la generada por fotones entrantes. Si se desea obtener datos precisos, la corriente oscura (DC) de cada canal debe sustraerse de la señal total en cada uno de ellos. Estas mediciones de DC deben ser actualizadas cada cierto tiempo, principalmente al inicio de cada sesión cuando el instrumento se comienza a calentar. DC es una compensación que puede ser asumida como relativamente constante (a diferencia del ruido que es impredecible, el cual puede ser calculado por desviación estándar).

La reflectancia es la fracción actual de luz incidente que es reflejada desde una superficie, mientras la transmitancia es la fracción de luz incidente que pasa a través de un material dado. Ambas son propiedades inherentes del material en cuestión y son independientes de la fuente de luz usada en la muestra. Debido a que el instrumento únicamente mide la intensidad de un campo de luz a través de un punto dado en el espacio, la reflectancia y transmitancia son calculados a partir de un material desconocido y un material de referencia con propiedades de reflectancia o transmitancia conocidos. Este material de referencia es referido como “panel de referencia” o “estándar de referencia”. Un material con aproximadamente 100% de reflectancia a través del espectro entero es llamado un panel de referencia blanco. Debido a las características de la fuente de iluminación a ser removidas en la división, la geometría de iluminación debe ser la misma tanto para el espectro desconocido como para el espectro de referencia blanco, y la fuente de luz debe ser estable mientras ambos espectros son medidos. Cualquier variación puede resultar en datos no útiles.

### *Promedio de espectros y ruido*

Afortunadamente la mayoría de ruidos son aleatorios. Esto significa que pueden ser reducidos en la señal espectral deseada con una técnica llamada promedio de espectros. Si el ruido es realmente aleatorio entonces este será reducido en una cantidad proporcional a la raíz cuadrada del número de espectros promediados. Así, dieciséis espectros promediados tendrán un cuarto del ruido de un solo espectro. Con los radiómetros ASD, es posible coleccionar espectros basados en un promedio de cualquier número desde 1 hasta alrededor de 32,000 muestras, aunque en teoría, esto tomaría casi una hora. Para ser efectivo en el ataque contra el ruido, debe también coleccionarse un promedio equivalente de espectros de corriente oscura, para un espectro de reflectancia, un promedio equivalente del espectro del panel de referencia blanco, ya que el ruido afecta a todos por igual.

La mayoría de los investigadores encuentran que un promedio de muestras de alrededor de 10 a 25 es suficiente.

### **Radiómetro multi –espectral (Cropscan)**

El sistema básico consiste de:

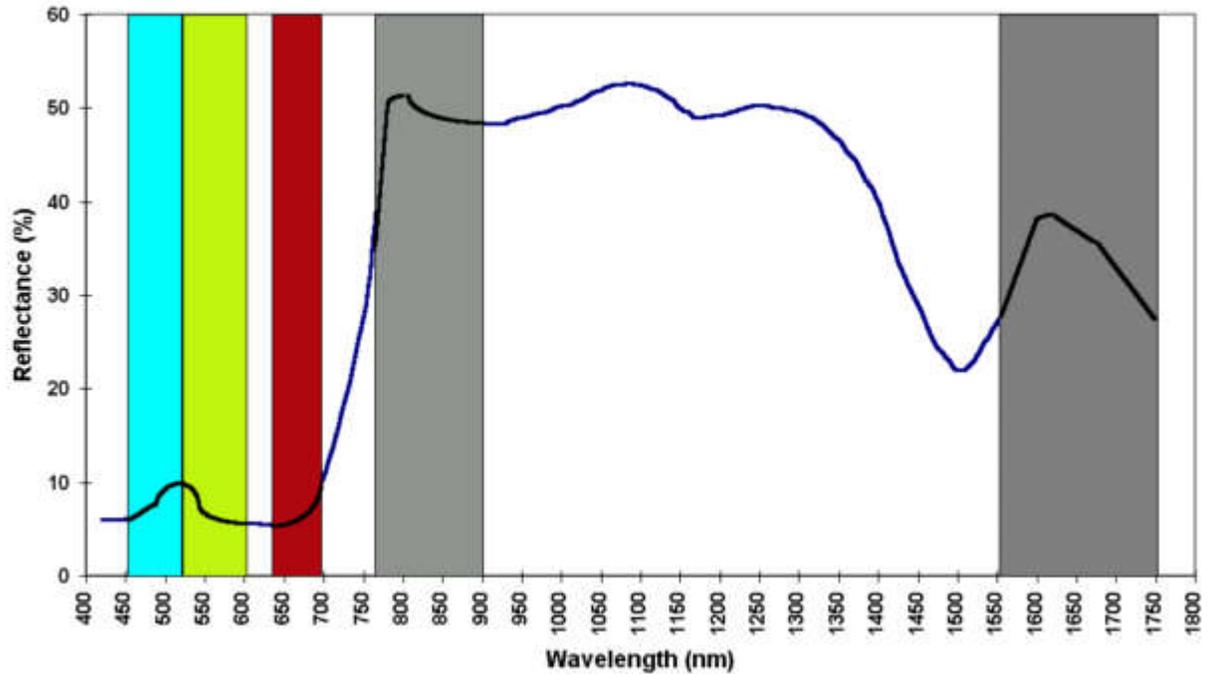
- Un radiómetro multi-espectral MSR16R
- Un controlador (*Data Logger controller*, DLC)
- Un teclado para operación en campo (CT100)
- Cables de conexión

#### *Radiómetro multiespectral*

Consiste básicamente en un bastidor de aluminio que contiene enchufes (*sockets*) para conectar hasta 16 pares de módulos (filtros), sin embargo en el caso del presente experimento se uso un radiómetro al que se le instalaron únicamente cinco bandas espectrales, las cuales se aprecian en la Figura A17. El radiómetro se aprecia en la Figura A16.



**Figura A-16. Radiómetro multiespectral Cropscan**



**Figura A-17. Bandas instaladas en el radiómetro multispectral Cropscan**

Teclado (ct 100)

Es un teclado alfa-numérico con una pantalla LCD de 16 caracteres por 2 líneas para operación en campo.



**Figura A-18 Teclado para operar el Radiómetro multispectral Cropscan**

*Datalogger*

Se utilizó un datalogger de 64kb (Figura A19) como medio de almacenamiento del software que maneja el radiómetro, así como medio de almacenamiento de la información tomada.



**Figura A-19. Datalogger para almacenar información adquirida con el radiómetro multispectral CropsScan**

### *Especificaciones*

Las principales características son:

- Angulo de visión
  - irradiación incidente: 180 grados (cristal ópalo)
  - Irradiación reflejada: 28 grados (2:1)
- Transductores de radiación
  - Fotoides de silicio (Visible a NIR)
  - Fotoides de germanio (IR medio)
- Rango de temperatura de operación: 0-50 °C
- Rango de humedad de operación: 0-100 %, sin condensación
- Rango de humedad de almacenamiento: < 20 %

El diseño de radiómetro permite la medición de voltajes que representan tanto la irradiación incidente como la irradiación reflejada simultáneamente. Esta característica permite mediciones precisas de la reflectancia cuando las condiciones de ángulo o de luz solar no son ideales, por lo que se pueden obtener lecturas aún en condiciones de nubosidad.

### **Termómetro de infrarrojo**

El termómetro de infrarrojo (Figura A20) mide la temperatura del objetivo, detectando la energía infrarroja térmica emitida por el material del que está constituido dicho objetivo. El diseño básico consiste de un lente que enfoca o concentra la energía infrarroja en un sensor, el cual convierte esta energía en una señal eléctrica que puede ser desplegada en unidades de temperatura. Esta configuración permite realizar mediciones de temperatura sin estar en contacto directo con el objeto medido.



**Figura A-20. Termómetro de Infrarrojo.**

*Especificaciones*

Marca: Apogee

Modelo: IRTS-P

Precisión:  $\pm 0.4$  °C desde 5 hasta 45 °C

$\pm 0.1$  °C cuando el sensor y el objetivo están a las misma temperatura

Masa: menos de 100g

Dimensiones: 6cm de longitud x 2.3cm de diámetro

Tiempo de respuesta: menos de 1seg a cambios de temperatura en el objetivo

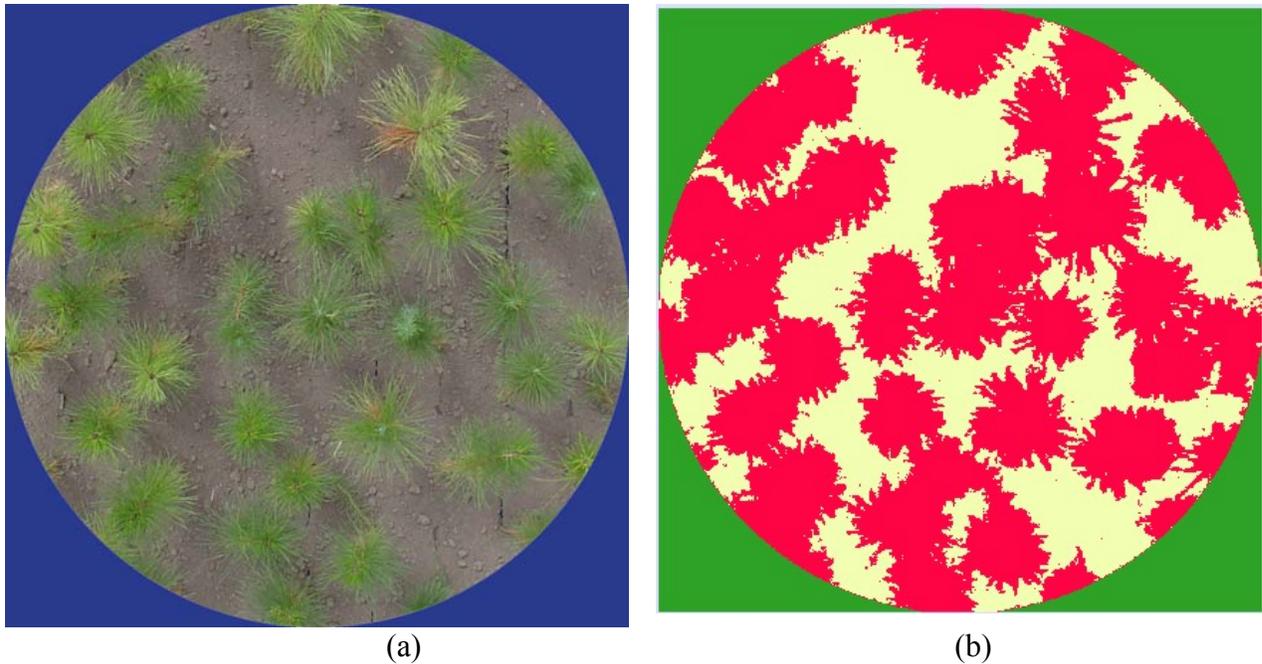
Rango de longitud de onda: 6.5 a 14  $\mu\text{m}$

Ambiente de operación óptimo: 5 a 50 °C (basado en la temperatura del sensor)

Ángulo de Visión (FOV): 3:1

**Camara digital**

Cámara digital Sony Cyber-shot DSC-V1 con resolución de 5.0 megapíxeles, la cual se utilizó para calcular los porcentajes de cobertura de suelo y vegetación, tal como se observa en la Figura A21.



**Figura A-21. Cálculo del porcentaje de cobertura de suelo y vegetación (Figura b) a partir de una imagen digital (Figura a).**

### **Ceptometro (ACCUPAR)**

El Acupar es un ceptómetro lineal (Figura A22) el cual se usa para medir la Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR por sus siglas en inglés) en el follaje de las plantas. Consiste básicamente de un microprocesador de manejo (*data logger*) y una sonda que contiene 80 fotoides independientes; espaciados a 1cm. Los fotoides miden el PAR en la longitud de onda de 400-700nm, desplegando los resultados del PAR en unidades de micromols por metro cuadrado por segundo ( $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ). Este instrumento es capaz de realizar mediciones manualmente o en forma automática (programada).



**Figura A-22. Ceptómetro**

### *Especificaciones*

- Ambiente de operación:
  - 0 a 50 °C
  - 100% de humedad relativa
- Longitud de la sonda: 80cm
- Número de fotoídeos: 80
- Longitud total: 108 cm
- Sección transversal de la sonda: 14mm x 15mm
- Dimensiones del microcontrolador: 158 x 95 x 45mm
- Rango de medición (PAR): 0 a 72,500 ( $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )
- Resolución: 1 ( $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )
- Capacidad de almacenamiento de datos: 48k RAM

### *Operación*

El Ceptómetro es capaz de medir el PAR en tres modos diferentes: Manual, automático (programado) y continuo, con la opción de usar un sensor externo (proveído por el usuario) si se desea; y se opera mediante un teclado alfanumérico de 16 teclas que permite seleccionar las diferentes opciones de medición, desplegado y almacenamiento de datos.

---

---

## ANEXO B. EXPERIMENTO: SISTEMA GONIOMÉTRICO (SIGO-CP) EN LABORATORIO

### B-1. INTRODUCCIÓN

Para poder lograr el objetivo planteado en la presente investigación se dividió la investigación en dos experimentos, principales. El primero consistió en evaluar la factibilidad de separar la vegetación de hoja ancha de la de hoja angosta en diferentes condiciones de densidad, fondos de suelo y ángulos de visión e iluminación (Cano *et al.*, 2007). El segundo trata de obtener información estructural, como la altura, de la vegetación. Para lo cual se seleccionaron ocho especies forestales (oyamel, mimosa, casuarina, encino, fresno, pino greggii, palo dulce y pasto navajita), tres densidades, dos tipos de suelo (claro y oscuro), dos condiciones hidrológicas (seco y mojado), siete ángulos cenitales y cada ángulo cenital con 36 ángulos acimutales. Con las mismas ocho especies se plantearon 12 mezclas de vegetación. Las cuales, a diferencia de las especies individuales, solo se midieron con una densidad. Así mismo, fue necesario el diseño y construcción del Sistema Goniométrico (SIGO-CP), el cual está formado por un goniómetro (mide ángulos cenitales y acimutales), una fuente de iluminación (elimina las controversias atmosféricas y climáticas) y una estructura para colocar las plantas y los diferentes fondos de la vegetación. El goniómetro está equipado con un radiómetro hiperespectral ASD, un termómetro Apogee y una cámara digital Sony.

A continuación se describirán las especies utilizadas, cada uno de los componentes de SIGO-CP y el procedimiento empleado en el segundo experimento de la investigación "Sistema para la clasificación de la vegetación natural con sensores remotos".

### B-2. ESPECIES FORESTALES MEDIDAS Y SUS MEZCLAS

Las especies utilizadas en el experimento son las que se presentan en el Cuadro B-1. Las especies fueron seleccionadas según su disponibilidad en los viveros de la zona así como procurando contar con una buena variación entre sus características (tipo de hoja, principalmente). Las Figuras B-1 a B-6 muestran las especies forestales utilizadas para el experimento. También fue necesario ubicar zonas posibles para la obtención de especies de hoja mesófila (matorral) y pastos. Por lo que se realizaron expediciones a las áreas boscosas de la región, detectando diferentes especies forestales entre las cuales se encontraron plantas pequeñas de palo dulce (*Eysenhardtia polystachya*) y cepas de pasto navaja (*Bouteloa gracilis*). En visitas posteriores se recolectaron ambas especies (Figura B-7 y B-8) y después se plantaron en bolsas de plástico de 20 x 15cm para su establecimiento.

CUADRO B-1. ESPECIES UTILIZADAS EN EL EXPERIMENTO

Nombre científico	Nombre común	Tipo de hoja	Altura (cm)*	Diámetro de tallo (cm)*	Diámetro del dosel (cm)*
<i>Abies religiosa</i>	Oyamel	Aciculada	34.34 (5.33)	0.70 (0.14)	24.26 (6.44)
<i>Acacia retinodes</i>	Mimosa	Latifoliada	38.88 (7.80)	0.64 (0.15)	26.09 (6.17)
<i>Casuarina equisetifolia</i>	Casuarina	Aciculada	36.67 (3.85)	0.64 (0.17)	23.87 (5.97)
<i>Quercus rugosa</i>	Encino	Latifoliada	33.83 (6.45)	0.60 (0.27)	20.17 (5.05)
<i>Fraxinus uhdei</i>	Fresno	Latifoliada	31.08 (5.11)	0.60 (0.14)	20.74 (4.30)
<i>Eysenhardtia polystachya</i>	Palo dulce	microlatifoliada	25.29 (10.70)	1.99 (1.42)	15.90 (5.17)
<i>Pinus Greggii</i>	Pino	Aciculada	33.49 (4.35)	2.00 (9.77)	14.13 (2.29)
<i>Bouteloa gracilis</i>	Navajita	Linear	18.31 (3.20)	2.55 (1.17)	14.02 (4.73)

\*Los datos entre paréntesis corresponden a la desviación estándar.



Figura B-1. Oyamel (*Abies religiosa*)



**Figura B-2. Mimosa (*Acacia retinodes*).**



**Figura B-3. Casuarina (*Casuarina equisetifolia*).**



**Figura B-4. Fresno (*Fraxinus uhdei*)**



**Figura B-5. Encino (*Quercus rugosa*).**



**Figura B-6. Pino Greggii (*Pinus greggii*).**



**Figura B-7. Colecta y transporte de palo dulce (*Eysenhardtia polystachya*)**



**Figura B-8. Colecta de pasto navajita (*Bouteloua gracilis*)**

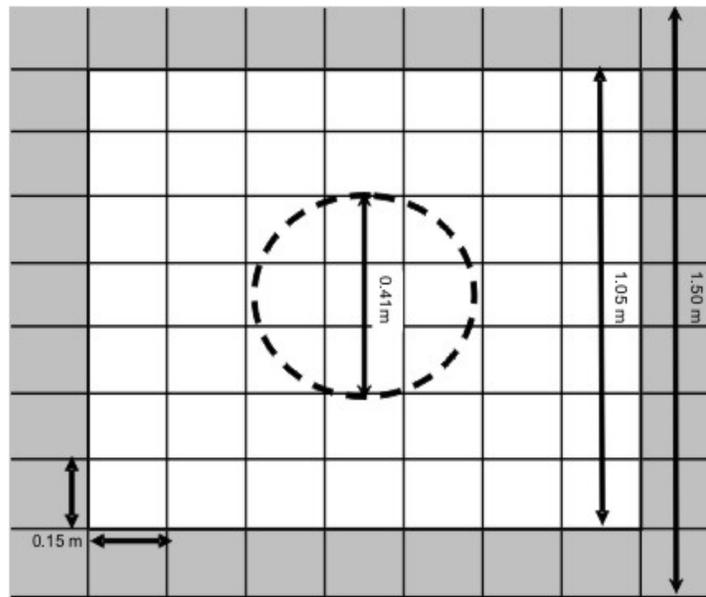
Considerando los tamaños en etapa adulta de las especies utilizadas, éstas se agruparon en tres clases: a) vegetación de hoja ancha (Mimosa, Encino y Fresno) y de hoja acicular (Oyamel, Casuarina y Pino), b) vegetación xerófila (Palo dulce) y c) vegetación de gramíneas (Pasto navajita) para diseñar las combinaciones. Las 12 mezclas resultantes se muestran en el Cuadro B-2.

**CUADRO B-2. MEZCLAS ANALIZADAS EN EL EXPERIMENTO**

Mezcla	Combinación
1	Encino/Abies
2	Encino/Greggii
3	Encino/Pasto
4	Abies/Encino
5	Greggii/Encino
6	Pasto/Encino
7	Fresno/Casuarina
8	Casuarina/Fresno
9	Abies/Greggii
10	Greggii/Abies
11	Pasto/Matorral
12	Matorral/Pasto

### Densidades utilizadas

Para realizar las mediciones se diseñó una estructura en la cual fue posible colocar las plantas en bolsas, sin que éstas se cayeran o inclinaran, gracias a un sistema de mallas (se describirá más adelante). La estructura tiene una capacidad máxima de 81 plantas; sin embargo únicamente se utilizaron 49 debido a la dificultad para conseguir las especies y a que el ángulo de visión de los sensores no cubre más que un círculo de 41cm de diámetro a nadir. En la Figura B-9 se describen las dimensiones del área de medición y se muestra el orden de las posiciones.



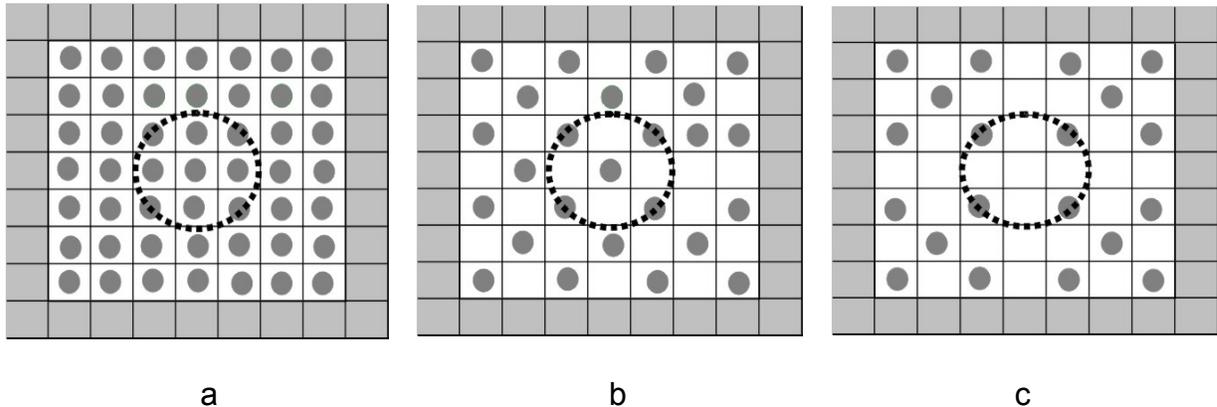
**Figura B-9. Dimensiones de la estructura de medición. El círculo corresponde al ángulo de visión (nadir), la zona clara esta ocupada por plantas y suelo, y la zona oscura únicamente va cubierta por suelo.**

La posición que ocupó cada una de las plantas de cada una de las especies fue importante ya que una vez situada la planta se tomaron medidas de altura, diámetro de tallo y diámetro del dosel, éste último se midió en cruz (Figura B-10). Las plantas se numeraron, ya que siempre se utilizó la misma planta en la posición que le correspondió desde el inicio, al reutilizarla en las mezclas (ver archivo denominado “Biofísicos”).



**Figura B-10. Mediciones biofísicas de las plantas.**

Las densidades propuestas para las especies individuales fueron tres: a) alta (49 plantas), b) media (25 plantas) y c) baja (12 plantas) (Figura B-11).



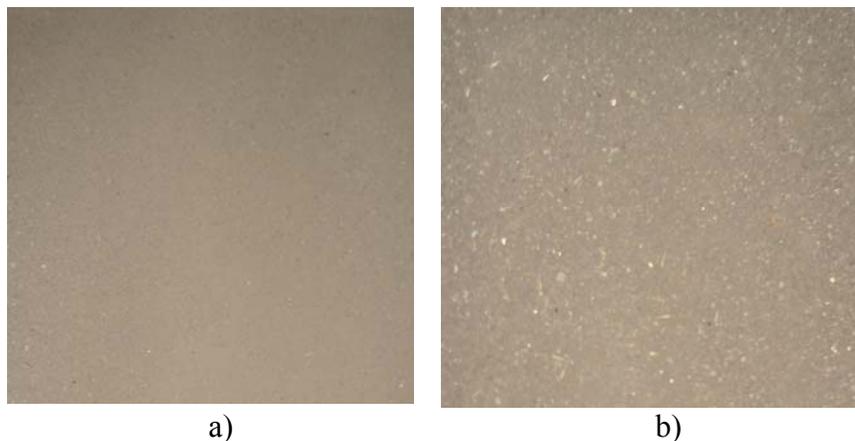
**Figura B-11. Densidades: a) Alta, b) Media, y c) Baja**

### Suelos usados como fondo

Se utilizaron dos suelos, uno claro y otro oscuro y en condición seco y mojado (SCS, SCH, SOS y SOH). En el Cuadro B-3 se presentan sus texturas y en la Figura B-12 se muestran ambos suelos secos.

**CUADRO B-3. TEXTURA DE LOS SUELOS UTILIZADOS COMO FONDO**

Suelo	Tipo de suelo
Claro	Franco arenoso
Oscuro	Franco arcilloso



**Figura B-12. Contraste de los suelos utilizados: a) claro y b) oscuro**

### B-3. SISTEMA GONIOMÉTRICO (SIGO)

Como se mencionó anteriormente SIGO está conformado por un goniómetro (mide ángulos cenitales y acimutales), una fuente de iluminación (elimina las

perturbaciones atmosféricas y climáticas) y una estructura para colocar las plantas y los diferentes fondos de la vegetación (Figura B-13).



**Figura B-13. Componentes de SIGO**

### **Simulador de lluvia**

SIGO se instaló en el Laboratorio Simulador de Lluvias del Colegio de Postgraduados (Figura B-14) utilizando un simulador de lluvias con disco rotatorio, tipo MORIN de la Universidad de Israel (Morín *et al.*, 1967), para que siempre se aplique la misma cantidad de precipitación a cada uno de los dos suelos utilizados como fondos de la vegetación en su condición de mojado.



**Figura B-14. Laboratorio Simulador de Lluvias**

El simulador de lluvia fue utilizado para mojar cada uno de los suelos. El simulador tiene un gasto de 100mm/hora utilizando el disco de 75mm pero con la válvula totalmente abierta. Para poder mojar completamente el suelo es necesario aplicar el evento de lluvia durante 5 minutos lo que equivale a una lamina de agua de 8.3mm (Figura B-15).



**Figura B-15. Aplicación de 8.3mm de lluvia al cajón**

### **Cuarto oscuro**

Para evitar las interferencias de fuentes ajenas de iluminación se habilitó un área 16 m<sup>2</sup> dentro del Laboratorio Simulador de Lluvias. En la que se pintó el techo de negro mate al igual que todo el equipo y se colocaron cortinas negras alrededor, bloqueando totalmente el paso de luz (Figura B-16). Al momento de realizar las mediciones se apagaban todas las luces quedando únicamente la fuente de iluminación de SIGO-CP.

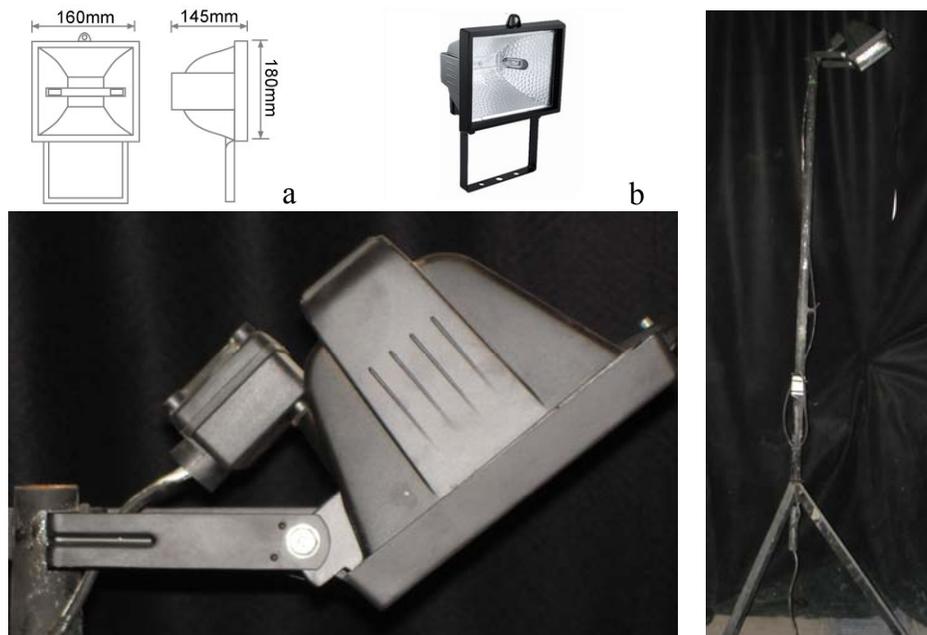


**Figura B-16. Cortinas del área de medición: a) vista interna y b) vista externa**

### Iluminación

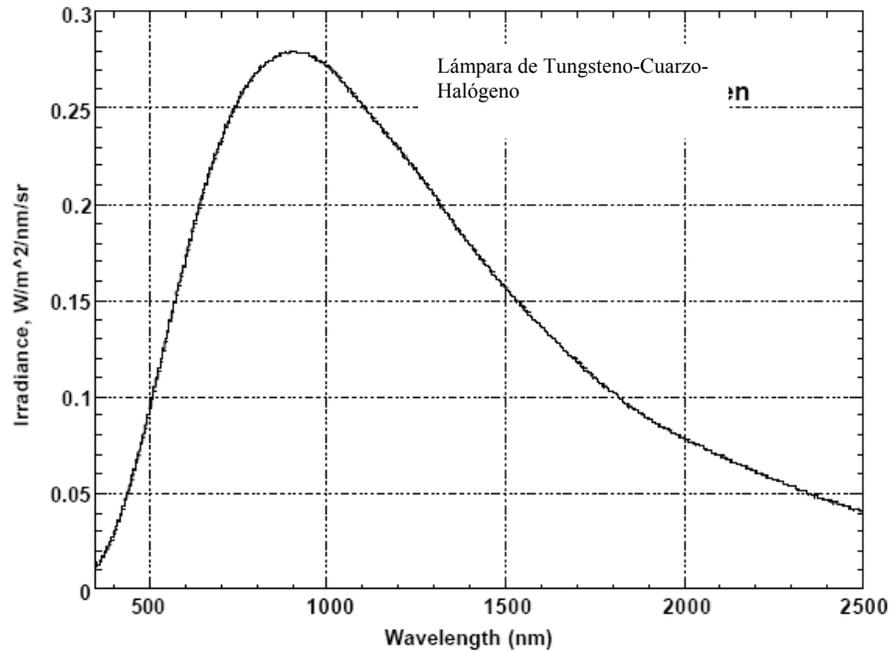
La implementación de iluminación artificial permite un mayor control en la geometría de iluminación y en la de visión, incrementa el control en la geometría de la muestra y operar en condiciones no óptimas, por ejemplo lluvia y nublados.

La fuente de iluminación utilizada es un reflector de aluminio de cuerpo negro de la marca *Tecno Lite* equipado con una lámpara de halógeno de cuarzo de 500 watts de la marca Osram (modelo 64706). Los filamentos de estas lámparas son de tungsteno y el vidrio que recubre el filamento está hecho de cuarzo, siendo el halógeno el gas que rellena el tubo o bombilla. La lámpara se montó en una base telescópica elevada a 3m (Figura B-17).



**Figura B-17. a) Dimensiones del reflector, b) reflector con lámpara de halógeno, c) inclinación de la lámpara ( $38^\circ$ ) y d) base telescópica para la lámpara.**

En la Figura B-18 se muestra la caracterización de la curva típica de lámparas de halógeno de cuarzo.

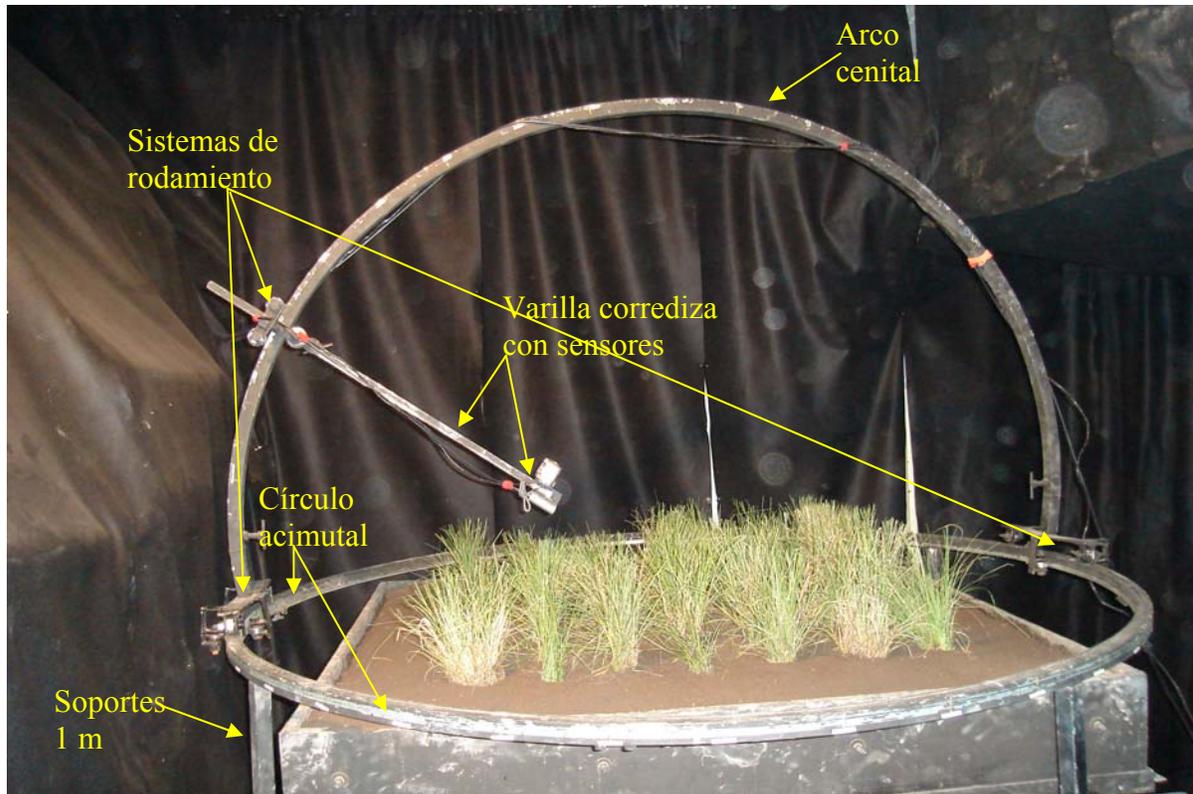


**Figura B-18. Lámpara de halógeno de cuarzo. Fuente: *Analytical Spectral Devices, Inc, 1999.***

### Goniómetro

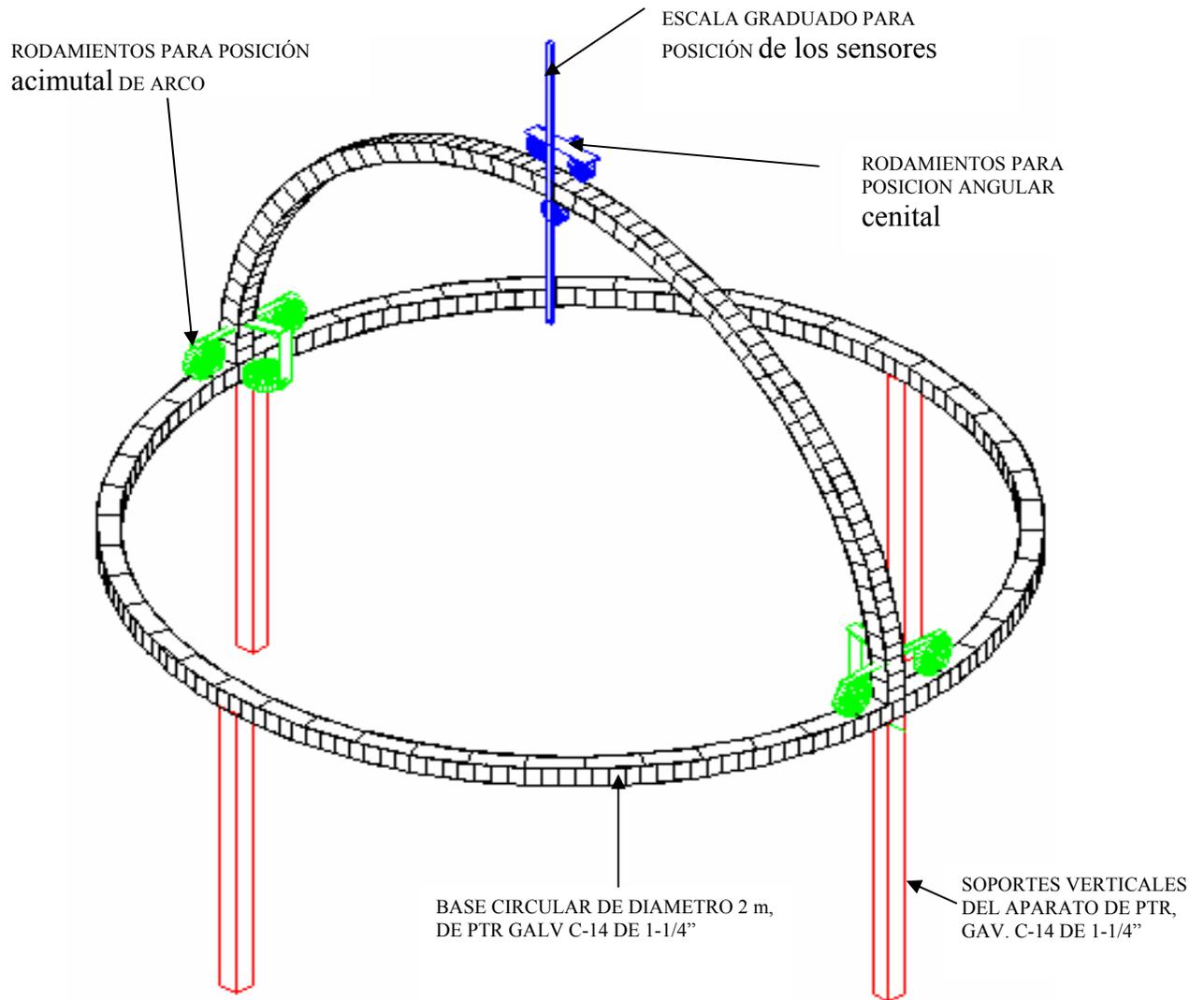
Con la finalidad de obtener mediciones bidireccionales de reflectancia en diferentes tipos y condiciones de vegetación natural con iluminación natural (campo) o artificial (laboratorio) se diseñó y construyó un goniómetro, el cual opera en conjunto con un espectroradiómetro ASD FieldSpecFR Jr, un termómetro Apogee y una cámara digital Sony. El goniómetro consta de un círculo acimutal y de un arco cenital de 1m de radio, en ambos. Acimutalmente se puede mover de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ , siendo el incremento mínimo de  $10^\circ$  y cenitalmente de  $0^\circ$  (nadir) a  $60^\circ$ , con incrementos de  $10^\circ$ .

El goniómetro consta de cinco partes fundamentales: un círculo acimutal, un arco cenital, una varilla corrediza en la que se montan los sensores, tres sistemas de rodamiento y los soportes que permiten elevarlo de de 0.20m a 1m (Figura B-19 y B-20).



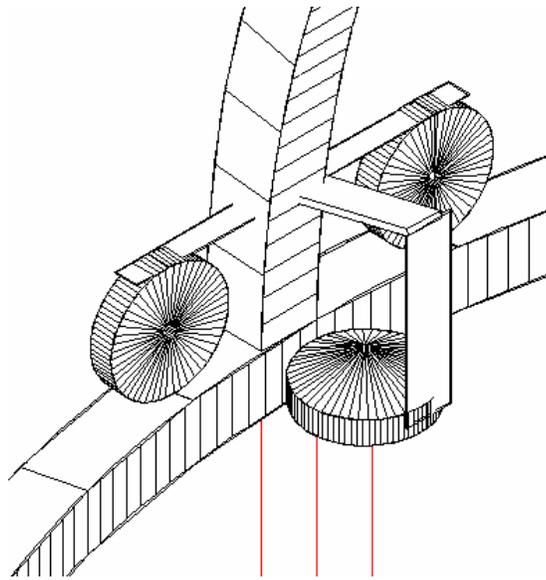
**Figura B-19. Imagen de las partes del Goniómetro**

Tanto el círculo como el arco están fabricados de PTR galvanizado de 1 ¼ pulgadas con 1m de radio y la varilla es una platina de ¾ pulgadas de acero (Figura B- 20).



**Figura B-20. Esquema de las partes del Goniómetro**

El sistema de rodamiento consta de 3 baleros en cada una de las bases (Figura B-20 y B-21). El círculo acimutal se desarma en dos partes y el arco cenital se desmonta de los sistemas de rodamiento, para facilitar su transportación. Aún y cuando está fabricado de acero el peso del goniómetro es fácilmente manejado por dos personas.

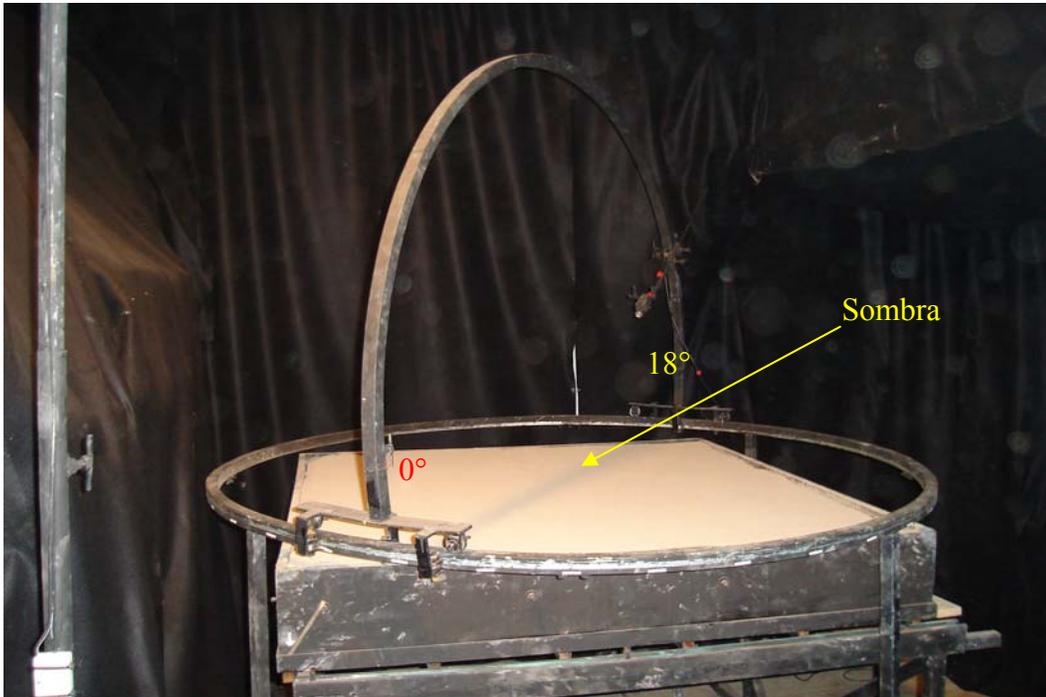


**Figura B-21. Detalle del rodamiento para el desplazamiento del arco cenital**

Los sensores son montados en la varilla de tal forma que estos quedan situados al centro y por debajo del arco cenital (Figura B-22), lo que ocasiona una pequeña sombra de  $\pm 3$  cm de ancho cuando el arco cenital queda ubicado exactamente en el mismo cuadrante de la fuente de iluminación (Acimut  $0^\circ$ - $30^\circ$ ) (Figura B-23).



**Figura B-22. Posición de los sensores por debajo del arco cenital.**



**Figura B-23. Sombra ocasionada por el diseño del goniómetro**

No obstante la sombra únicamente afecta directamente en la medición de acimut  $0^\circ$  y siendo menor su efecto en las siguientes tres tomas (acimut  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  y  $30^\circ$ ), a partir del acimut  $40^\circ$  la sombra queda fuera del área de observación del radiómetro (41cm de diámetro).

El radiómetro mide un círculo de 0.41m de diámetro a nadir ( $0^\circ$ ) y posteriormente el área de observación se transforma en una elipse cada vez mas alargada (Cuadro B-4).

**CUADRO B-4. DIMENSIONES DE LAS ELIPSES FORMADAS**

Tv	Eje menor	Eje mayor
0	41.2	41.2
10.0	39.5	40.1
19.2	37.9	40.1
28.1	35.3	40.0
37.6	30.6	38.6
46.5	25.1	36.5
55.7	16.9	29.9

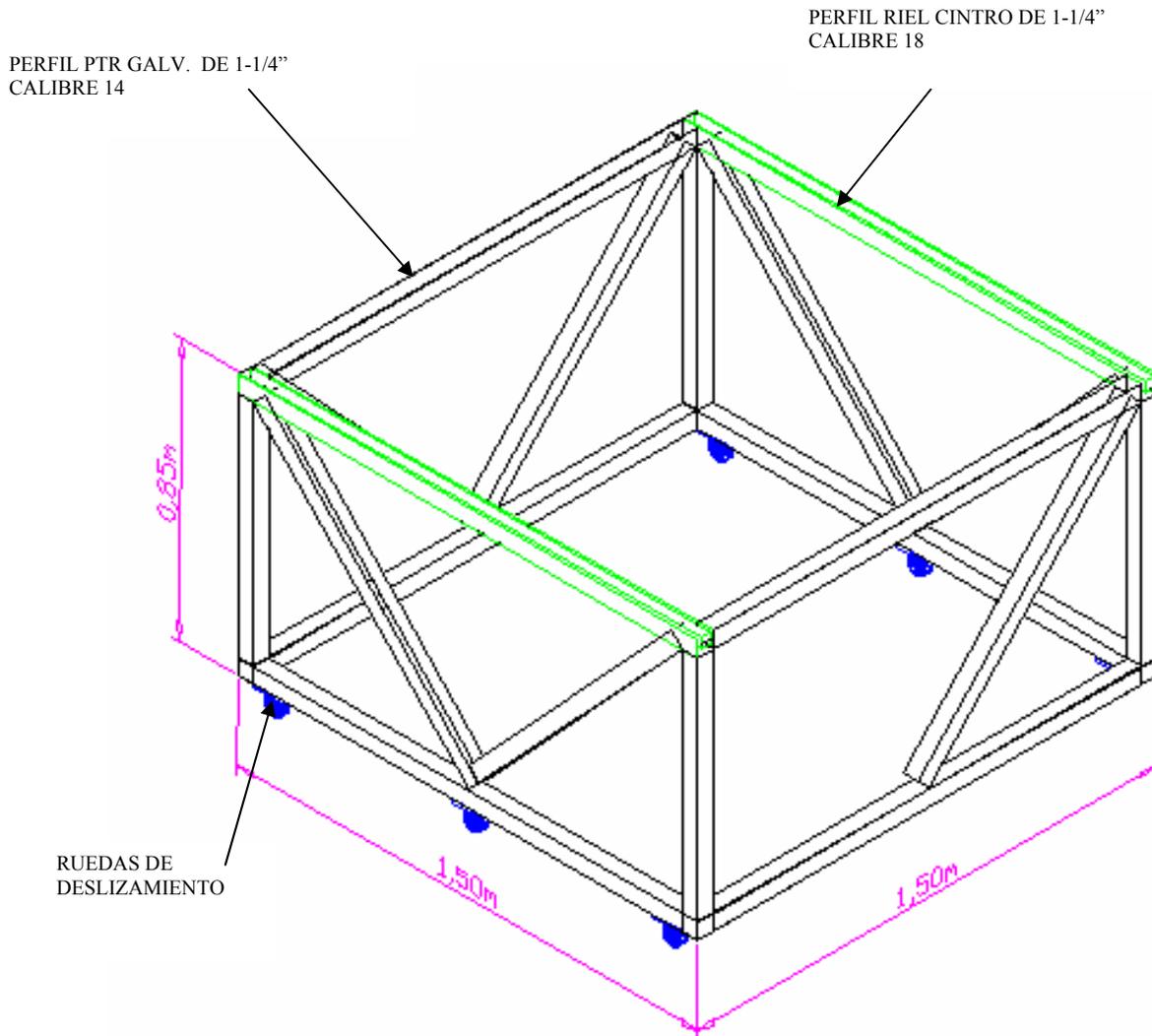
Tv = Angulo cenital nominal de visión

El ciclo completo de medición del goniómetro esta conformado por 7 ángulos cenitales ( $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $50^\circ$  y  $60^\circ$ ) y cada una de ellos cuenta con 36 mediciones acimutales, dando un total de 252 observaciones. Aunque es un equipo

de fabricación rústica y de operación manual, el tiempo requerido para un ciclo de medición es de 30-40 minutos, con un mínimo de 2 personas para manejarlo.

### Bases y cajón para las plantas

Para poder mojar los suelos utilizados como fondo en la vegetación se diseñó y construyó una base deslizable en la cual se colocan las plantas para su transportación al simulador de lluvia utilizado para mojar el suelo. La estructura esta conformada por dos bases de PTR galvanizado de 1 1/4" con 6 ruedas con capacidad de carga de 75 kilogramos cada una (Figura B-24 y B-25).

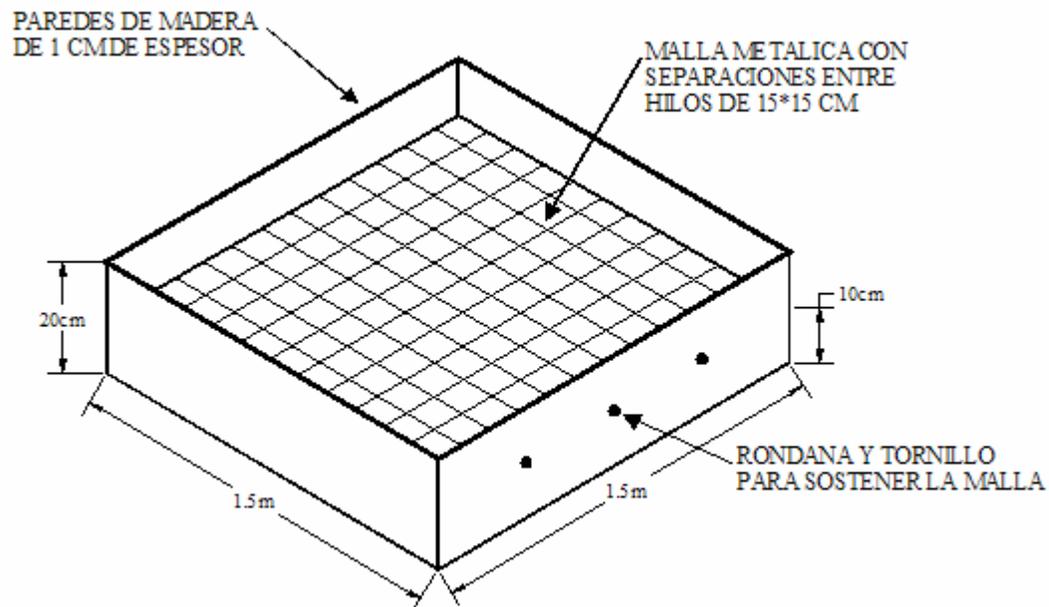


**Figura B-24. Esquema de las bases para transportación del cajón con planta al simulador**

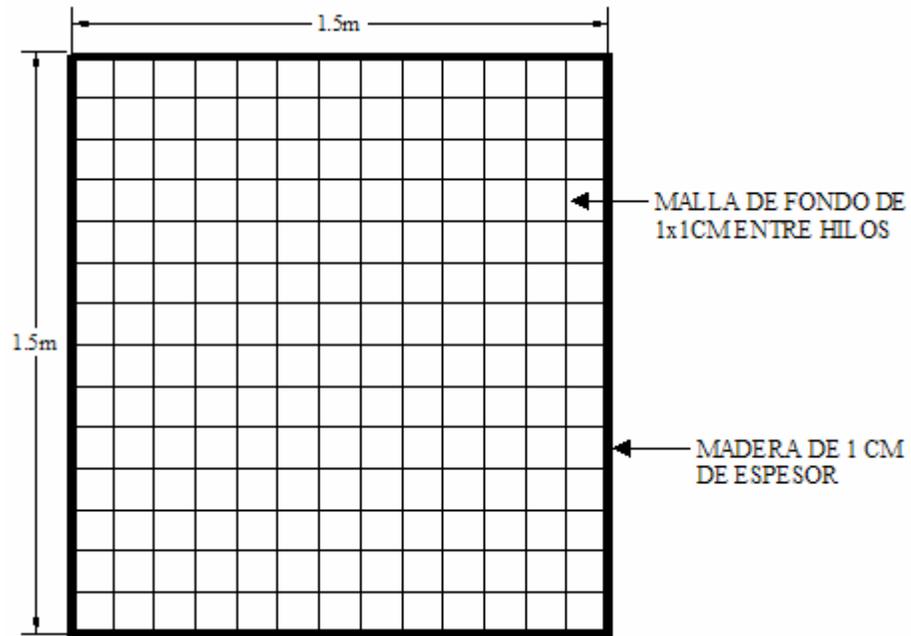


**Figura B-25. Imagen de una de las bases colocada dentro del simulador de lluvia**

El cajón fue diseñado para colocar plantas en bolsas de 20cm de alto y 15cm de diámetro. El cajón está formado por dos juegos de mallas (una de 15 x 15cm y la otra de 1 x 1 cm), un par de compuertas de lámina, un cajón de madera sin fondo, seis barras de 1.5m (PTR de ½ pulgada) y tramos de madera triplay de 3mm de 10 y 5cm de ancho, las cuales sostienen el suelo (Figura B-26, B-27 y B-28).



**Figura B-26. Esquema del cajón**



**Figura B-27. Vista en planta del cajón y la malla de fondo de 1 x 1cm entre hilos**



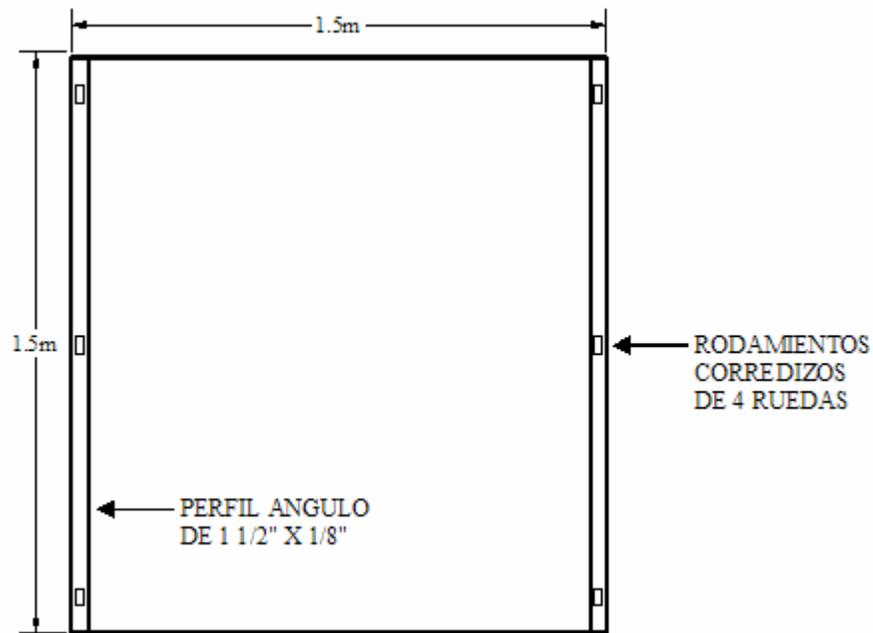
**Figura B-28. Cajón con las maderas sostenidas por las barras de PTR de 1/2 pulgadas**

La malla más fina (1 x 1cm) sirve como soporte inferior de las bolsas y la malla de 15 x 15cm evita que las bolsas se vayan de lado (Figura B-29). Finalmente las compuertas de lámina permiten sacar el suelo que se ha caído dentro del cajón.

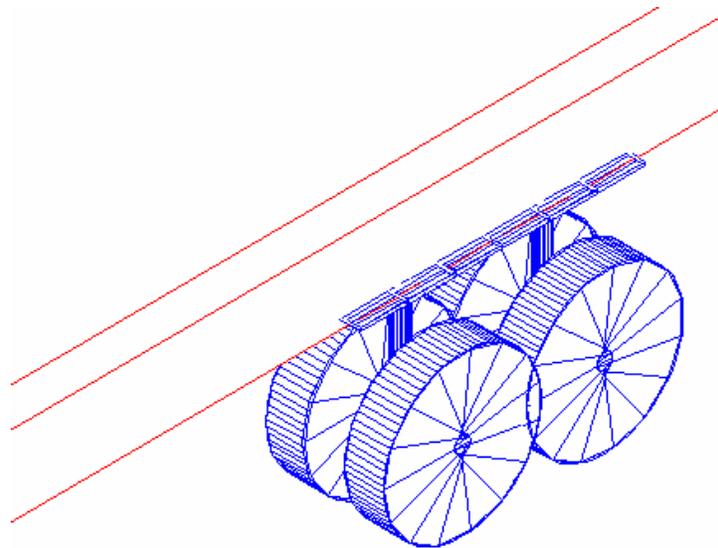


**Figura B-29. Mallas que permiten el arreglo de las plantas en el cajón**

El cajón se montó en un marco metálico, construido de perfil angular de 1 ½" x 1/8" (Figura B-30) y seis ruedas metálicas tipo carretilla (Figura B-31), para deslizarlo entre las dos bases.



**Figura B-30. Marco metálico para deslizar el cajón entre las bases**



**Figura B-31. Detalle del rodamiento tipo carretilla del marco metálico**

En la Figura B-32 se ilustra el movimiento del cajón de una base a otra.



**Figura B-32. Traslado del cajón entre las bases**

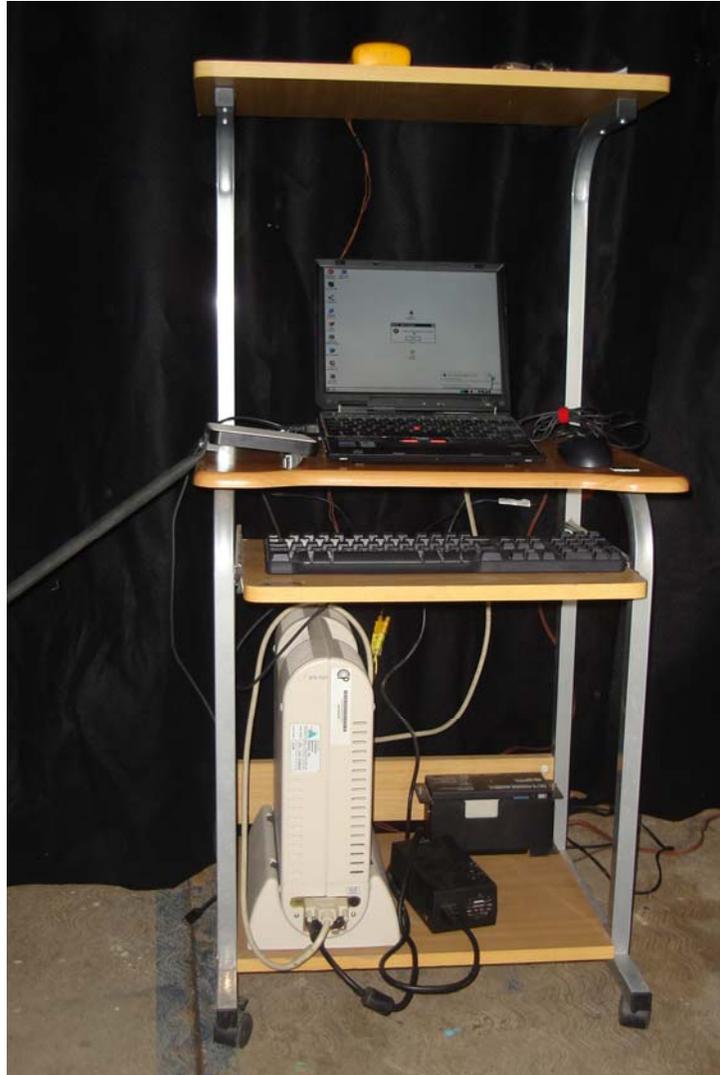
#### **B-4. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN**

##### **Radiómetro**

El radiómetro hiperespectral utilizado es un ASD FieldSpecFR Jr (Figura B-33) el cual está conformado por tres espectrómetros independientes, el espectrómetro VIRC (VIRC = Visible e infrarrojo cercano), el espectrómetro SWIR1, y el espectrómetro SWIR2 (SWIR = Infrarrojo medio). Cuenta con un ancho de banda de 350 a 2500 nm. La resolución espectral es de 3 nm en el visible y 10 nm en el infrarrojo, con un intervalo de muestreo de 1.4 nm en el rango 350-1000 nm y 2 nm para el rango de 1000-2500 nm. El ASD captura el espectro total en 0.1 segundos y para cada medida de reflectancia se predefinió al promedio de 20 lecturas y el número de lecturas para el panel blanco de referencia y la corrección de los componentes electrónicos se estableció en 60.

El cable de fibra óptica cuenta con un FOV (ángulo de visión) de 25° o 2.25:1 lo que permite un área de medición de 41.2 cm de diámetro a nadir.

El *software* del espectro radiómetro proporciona los datos por nanómetro, usando una interpolación cúbica (Analytical Spectral Devices, Inc, 1999).



**Figura B-33. Radiómetro hiperespectral ASD**

### **Termómetro**

El sensor de temperatura utilizado es de la marca Apogee IRTS (Figura B-34). El cual mide la temperatura a través de la radiación infrarroja emitida por el objeto. El ángulo de visión del sensor es de 3:1 por lo que a 3 metros de altura el círculo de visión será de 1 metro. En el presente experimento se colocó a una altura de 1 metro por lo que el diámetro del área observada es de 0.33m.



**Figura B-34. Sensor de temperatura Apogee ITRS**

### **Cámara**

La cámara digital utilizada es una Sony Cyber-shot DSC-V1 con un ángulo de visión de 01:01 y 5.0 mega píxeles de resolución (Figura B-35).



**Figura B-35. Cámara digital Sony Cyber-shot DSC-V1 y otros sensores.**

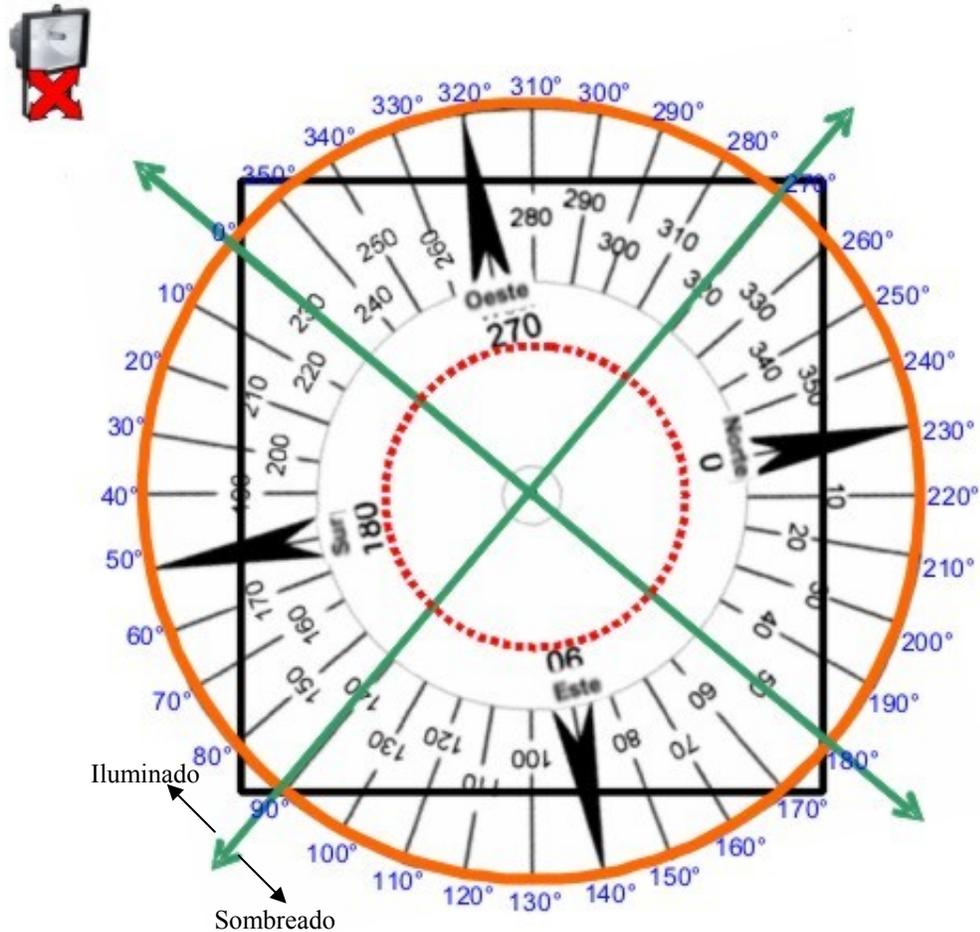
### B-5. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

A continuación se describirá de manera detallada el procedimiento realizado durante el segundo experimento de la investigación. Tanto para las especies individuales como para las mezclas.

1. En la Figura B-36 se ilustra la posición de la fuente de iluminación y de los ángulos acimutales con respecto al cajón. La base de la lámpara (cruz roja) deberá estar alineada con el ángulo cero acimutal a una distancia del círculo de 0.7m, el reflector deberá estar centrado con el arco cenital al colocar este en acimut  $0^\circ$  y elevado a 3m para que la lámpara este a 1m por encima del nadir del arco cenital.

Asimismo, en la Figura B-36 se esquematiza el área efectiva de medición (0.41m de diámetro a nadir) en rojo. La línea paralela a la lámpara divide la zona iluminada, que va de  $0^\circ$  a  $80^\circ$  y de  $280^\circ$  a  $350^\circ$ , de la sombreada que parte de  $90^\circ$  hasta  $270^\circ$  y la línea perpendicular es la sombra la cual disminuye con el incremento acimutal, quedando fuera del área de medición en acimut  $40^\circ$ .

La graduación externa, en azul, corresponde al acimut del goniómetro y la interna a los grados y cuadrantes de una brújula, corregida por la declinación magnética local.



**Figura B-36. Vista en planta de la ubicación de la lámpara y del goniómetro con respecto al cajón**

2. Colocar la densidad alta de la primera especie a medir.
3. Armar el equipo (cámara, cable de fibra óptica y termómetro) y bajar las cortinas.
4. Encender la lámpara y equipo para que se establezca la temperatura de los sensores.
5. Numerar las plantas según la posición que ocupen (1-49).
6. Acomodar las maderas de triplay de 3mm entre las plantas. Normalmente se utilizó una tabla de 10cm y una de 5cm entre plantas.
7. Tapar los agujeros entre las tablas.
8. Medir la altura, diámetro de tallo y diámetro basal de las 49 plantas.
9. Colocar el suelo, procurando un espesor de 1 cm.
10. Colocar la varilla de los sensores en el ángulo 0 cenital.
11. Colocar el arco cenital entre el ángulo acimutal 30 y 40 para tomar la fotografía o en su defecto donde se considere apropiado.

12. Establecer en la computadora la carpeta para grabar los archivos y el código de la especie en proceso, el cual se fue modificando al cambiar el ángulo cenital.
13. Posicionar el arco cenital en el ángulo 60 acimutal y optimizar el radiómetro.
14. También a 60° acimut colocar el panel blanco de referencia a una distancia del sensor de 20cm, aproximadamente, para la referencia (Figura B-37).



**Figura B-37. Colocación del panel blanco de referencia para calibrar el ASD**

15. Regresar el arco cenital al acimut 0° y comenzar la toma de los 36 ángulos acimutales para el ángulo cenital 0.
16. Una vez concluidos los 36 ángulos cambiar los sensores al ángulo cenital de 10° y recorrer la varilla a la posición correspondiente (segunda marca).
17. Tomar la foto entre el acimut 3 y 4, regresar a 0° y comenzar de nuevo (tiempo promedio de la toma de los 7 ángulos cenitales 35min) hasta concluir los 7 ángulos.
18. Posteriormente se desmonta el goniómetro para trasladar la base al simulador de lluvia.
19. Alinear y ensamblar las bases.
20. Recorrer el cajón al centro del simulador.
21. Aplicar el evento de lluvia con el disco de 75mm y durante 5 minutos con la llave del simulador abierta al máximo. Lo que aporta una lamina de 8.3mm.
22. Alinear y ensamblar bases del cajón para retirarlo del simulador.
23. Colocar nuevamente el cajón en su posición, ensamblar el goniómetro (Figura B-38).



**Figura B-38. Armado del goniómetro**

24. Posicionar los sensores a nadir y la varilla en la posición correspondiente.
25. Colocar la lámpara y alinearla con el goniómetro.
26. Encender lámpara para estabilizar la temperatura.
27. Verificar que no se haya descubierto de suelo la madera.
28. Bajar cortinas.
29. Colocar el arco en posición para la fotografía y tomarla.
30. Optimizar en el ángulo acimutal  $60^\circ$ .
31. Colocar el panel blanco de referencia para su toma.
32. Regresar al acimut  $0^\circ$ .
33. Repetir el ciclo del goniómetro.
34. Retirar el suelo mojado de cada una de las tablas colocándolo en 2 charolas
35. Introducir el suelo mojado a la estufa a  $100^\circ\text{C}$  durante 24 horas
36. Voltar las tablas y colocar el siguiente suelo seco
37. Repetir el procedimiento desde el paso 9.
38. Una vez concluido el nuevo ciclo con el otro suelo, se sacan las plantas de números pares para establecer la densidad media.
39. Repetir procedimiento desde el paso 9 hasta el 37.
40. Concluido el paso anterior se repite el paso 37 pero ahora estableciendo la densidad baja.
41. Repetir procedimiento desde el paso 9 hasta el 37.
42. Desmontar el goniómetro, abrir las compuertas de lámina para recoger el suelo acumulado y lavar el cajón.

43. Fin de una especie. En total se realizaron 12 rutinas del goniómetro por especie (4 por cada densidad medida) y dado que se usaron 8 especies, el número total de rutinas del goniómetro realizadas fue de 96, lo cual, generó 24,192 archivos de texto conteniendo la información de reflectancia de cada uno de los ángulos acimutales medidos.
44. Finalmente y cada vez que se acumuló un buen número de charolas con suelo seco se procedió a romper los terrones y a cernir el suelo para poder reutilizarlo (Figura B-39).



**Figura B-39. Proceso de cernido del suelo**

En total se realizaron 12 rutinas del goniómetro por especie (4 por cada densidad medida) y dado que se usaron 8 especies, el número total de rutinas realizadas fue de 96, lo cual, generó 24,192 archivos de texto conteniendo la información de reflectancia de cada uno de los ángulos acimutales medidos.

El procedimiento se realizó también colocando únicamente cada uno de los suelos utilizados y sus dos condiciones hidrológicas (seco y mojado). Generándose 1,008 archivos de texto con información de reflectancia.

En total se realizaron 148 rutinas de medición con el goniómetro. Lo cual, generó 37,296 archivos con valores de reflectancia y temperatura lo que equivale a 1,036 giros de 360° del goniómetro.

Por lo que respecta a las fotografías, solo se tomaron al inicio de cada ángulo cenital y en la posición acimutal de 40° por lo que se cuenta con 84 fotografías por cada una de las especies individuales y 672 considerando las 8 especies. Dos fotografías fueron tomadas del suelo.

### **Procedimientos adicionales**

A continuación se mencionaran una serie de procedimientos adicionales que se realizaron durante y después del experimento.

1. Periódicamente se fueron exportando los datos capturados por el radiómetro a un formato legible por el programa *Excel* (Texto separado por tabulaciones). Por lo que se duplica el número de archivos en las carpetas de los ángulos cenitales.
2. Se seleccionó al menos una de las fotografías tomadas a nadir (0° cenital) por cada una de las densidades de cada especie para calcular el porcentaje de cobertura vegetal global y el cálculo de la cobertura al área de observación local con la implementación de una máscara circular de 41.2 cm de diámetro. Los resultados se presentan en el Cuadro B-5. También se calcularon las coberturas considerando el área de observación delimitada por la elipse, seleccionando una secuencia de siete ángulos cenitales por cada una de las densidades de cada especie (Cuadro B-6). La fotografía siempre fue tomada entre el ángulo acimutal 30° y el 40°.
3. Se capturo y corrigieron las temperaturas de todas las especies y mezclas, para cada uno de los ángulos cenitales y acimutales.
4. Las firmas espectrales presentan ruido en dos regiones debido a la iluminación artificial. De 350 a 500 nanómetros el ruido se debe a que la luz artificial no produce rayos ultravioletas (Analytical Spectral Devices, Inc, 1999) y de 1830 a 2500 nanómetros la dispersión es ocasionada por la poca cantidad de energía captada por el sensor.  
Para poder analizar los datos fue necesario establecer dos ventanas en las que se determinó el rango a eliminar del espectro. Los rangos se presentan el Cuadro B-7.

**CUADRO B-5. PORCENTAJES DE COBERTURAS DEL ÁREA DE OBSERVACIÓN A NADIR.**

ESPECIE	DENSIDAD	SUELO	HUMEDAD	CENITAL	CODIGO	FOTO	COB_Veg global	COB_Suelo global	COB_Veg Local	COB_Suelo Local
Abies	Alta	Claro	Seco	0°	11110	1111001	60.86%	39.14%	71.19%	28.81%
Abies	Media	Claro	Seco	0°	12110	1211001	37.05%	62.95%	56.29%	43.71%
Abies	Baja	Claro	Seco	0°	13110	1311001	25.03%	74.97%	28.16%	71.84%
Acacia	Alta	Oscuro	Seco	0°	21210	2121001	56.20%	43.80%	65.45%	34.55%
Acacia	Media	Claro	Seco	0°	22110	2211001	36.61%	63.39%	38.02%	61.98%
Acacia	Baja	Claro	Seco	0°	23110	2311001	25.72%	74.28%	24.14%	75.86%
Casuarina	Alta	Oscuro	Seco	0°	31210	3121001	71.28%	28.72%	50.07%	49.93%
Casuarina	Media	Oscuro	Seco	0°	32210	3221001	30.55%	69.45%	33.52%	66.48%
Casuarina	Baja	Oscuro	Seco	0°	33210	3321001	25.51%	74.49%	18.02%	81.98%
Encino	Alta	Claro	Seco	0°	41110	4111001	73.97%	26.03%	68.76%	31.24%
Encino	Media	Claro	Mojado	0°	42120	4212001	42.99%	57.01%	45.15%	54.85%
Encino	Baja	Claro	Mojado	0°	43120	4312001	31.17%	68.83%	27.71%	72.29%
Fresno	Alta	Claro	Seco	0°	51110	5111001	60.80%	39.20%	61.25%	38.75%
Fresno	Media	Claro	Seco	0°	52110	5211001	37.28%	62.72%	40.38%	59.62%
Fresno	Baja	Claro	Seco	0°	53110	5311001	21.68%	78.32%	25.34%	74.66%
Matorral	Alta	Claro	Seco	0°	61110	6111001	45.70%	54.30%	41.28%	58.72%
Matorral	Media	Claro	Seco	0°	62110	6211001	28.58%	71.42%	20.96%	79.04%
Matorral	Baja	Claro	Seco	0°	63110	6311001	20.66%	79.34%	11.03%	88.97%
P.greggii	Alta	Claro	Seco	0°	71110	7111001	53.08%	46.92%	55.62%	44.38%
P.greggii	Media	Claro	Seco	0°	72110	7211001	23.27%	76.73%	26.93%	73.07%
P.greggii	Baja	Claro	Seco	0°	73110	7311001	12.16%	87.84%	11.39%	88.61%
Pastizal	Alta	Claro	Seco	0°	81110	8111001	26.63%	73.37%	44.25%	55.75%
Pastizal	Media	Oscuro	Seco	0°	82210	8221001	19.66%	80.34%	30.24%	69.76%
Pastizal	Baja	Claro	Seco	0°	83110	8311001	17.98%	82.02%	18.36%	81.64%

**CUADRO B-6. PORCENTAJES DE COBERTURAS DE LAS ÁREAS DE OBSERVACIÓN ELIPTICAS.**

ESPECIE	DENSIDAD	SUELO	HIDROLOGÍA	CENITAL	CODIGO	FOTO	COB_Veg	COB_Suelo
Abies	Alta	Claro	Seco	0°	11110	1111001	66.46%	33.54%
Abies	Alta	Claro	Seco	10°	11111	1111002	73.19%	26.81%
Abies	Alta	Claro	Seco	20°	11112	1111003	71.68%	28.32%
Abies	Alta	Claro	Seco	30°	11113	1111004	74.42%	25.58%
Abies	Alta	Claro	Seco	40°	11114	1111005	79.01%	20.99%
Abies	Alta	Claro	Seco	50°	11115	1111006	70.63%	29.37%
Abies	Alta	Claro	Seco	60°	11116	1111007	77.28%	22.72%
Abies	Media	Claro	Seco	0°	12110	1211001	59.88%	40.12%
Abies	Media	Claro	Seco	10°	12111	1211002	48.41%	51.59%
Abies	Media	Claro	Seco	20°	12112	1211003	41.16%	58.84%
Abies	Media	Claro	Seco	30°	12113	1211004	35.49%	64.51%
Abies	Media	Claro	Seco	40°	12114	1211005	31.94%	68.06%
Abies	Media	Claro	Seco	50°	12115	1211006	37.87%	62.13%
Abies	Media	Claro	Seco	60°	12116	1211007	29.92%	70.08%
Abies	Baja	Claro	Seco	0°	13110	1311001	22.07%	77.93%
Abies	Baja	Claro	Seco	10°	13111	1311002	13.53%	86.47%
Abies	Baja	Claro	Seco	20°	13112	1311003	17.94%	82.06%

Abies	Baja	Claro	Seco	30°	13113	1311004	18.04%	81.96%
Abies	Baja	Claro	Seco	40°	13114	1311005	24.20%	75.80%
Abies	Baja	Claro	Seco	50°	13115	1311006	33.10%	66.90%
Abies	Baja	Claro	Seco	60°	13116	1311007	7.73%	92.27%
Acacia	Alta	Oscuro	Seco	0°	21210	2121001	59.94%	40.06%
Acacia	Alta	Oscuro	Seco	10°	21211	2121002	58.09%	41.91%
Acacia	Alta	Oscuro	Seco	20°	21212	2121003	57.16%	42.84%
Acacia	Alta	Oscuro	Seco	30°	21213	2121004	60.47%	39.53%
Acacia	Alta	Oscuro	Seco	40°	21214	2121005	68.68%	31.32%
Acacia	Alta	Oscuro	Seco	50°	21215	2121006	86.22%	13.78%
Acacia	Alta	Oscuro	Seco	60°	21216	2121007	73.07%	26.93%
Acacia	Media	Claro	Seco	0°	22110	2211001	30.38%	69.62%
Acacia	Media	Claro	Seco	10°	22111	2211002	31.91%	68.09%
Acacia	Media	Claro	Seco	20°	22112	2211003	39.48%	60.52%
Acacia	Media	Claro	Seco	30°	22113	2211004	38.36%	61.64%
Acacia	Media	Claro	Seco	40°	22114	2211005	28.26%	71.74%
Acacia	Media	Claro	Seco	50°	22115	2211006	46.83%	53.17%
Acacia	Media	Claro	Seco	60°	22116	2211007	23.29%	76.71%
Acacia	Baja	Claro	Seco	0°	23110	2311001	22.90%	77.10%
Acacia	Baja	Claro	Seco	10°	23111	2311002	19.55%	80.45%
Acacia	Baja	Claro	Seco	20°	23112	2311003	28.69%	71.31%
Acacia	Baja	Claro	Seco	30°	23113	2311004	30.97%	69.03%
Acacia	Baja	Claro	Seco	40°	23114	2311005	19.36%	80.64%
Acacia	Baja	Claro	Seco	50°	23115	2311006	9.73%	90.27%
Acacia	Baja	Claro	Seco	60°	23116	2311007	15.37%	84.63%
Casuarina	Alta	Oscuro	Seco	0°	31210	3121001	49.10%	50.90%
Casuarina	Alta	Oscuro	Seco	10°	31211	3121002	63.87%	36.13%
Casuarina	Alta	Oscuro	Seco	20°	31212	3121003	70.31%	29.69%
Casuarina	Alta	Oscuro	Seco	30°	31213	3121004	69.91%	30.09%
Casuarina	Alta	Oscuro	Seco	40°	31214	3121005	73.30%	26.70%
Casuarina	Alta	Oscuro	Seco	50°	31215	3121006	72.76%	27.24%
Casuarina	Alta	Oscuro	Seco	60°	31216	3121007	81.67%	18.33%
Casuarina	Media	Oscuro	Seco	0°	32210	3221001	35.83%	64.17%
Casuarina	Media	Oscuro	Seco	10°	32211	3221002	34.72%	65.28%
Casuarina	Media	Oscuro	Seco	20°	32212	3221003	43.89%	56.11%
Casuarina	Media	Oscuro	Seco	30°	32213	3221004	43.09%	56.91%
Casuarina	Media	Oscuro	Seco	40°	32214	3221005	36.19%	63.81%
Casuarina	Media	Oscuro	Seco	50°	32215	3221006	40.90%	59.10%
Casuarina	Media	Oscuro	Seco	60°	32216	3221007	57.76%	42.24%
Casuarina	Baja	Oscuro	Seco	0°	33210	3321001	14.23%	85.77%
Casuarina	Baja	Oscuro	Seco	10°	33211	3321002	11.35%	88.65%
Casuarina	Baja	Oscuro	Seco	20°	33212	3321003	12.95%	87.05%
Casuarina	Baja	Oscuro	Seco	30°	33213	3321004	9.06%	90.94%
Casuarina	Baja	Oscuro	Seco	40°	33214	3321005	8.83%	91.17%
Casuarina	Baja	Oscuro	Seco	50°	33215	3321006	10.44%	89.56%
Casuarina	Baja	Oscuro	Seco	60°	33216	3321007	15.05%	84.95%
Encino	Alta	Claro	Seco	0°	41110	4111001	73.47%	26.53%
Encino	Alta	Claro	Seco	10°	41111	4111002	79.36%	20.64%
Encino	Alta	Claro	Seco	20°	41112	4111003	80.80%	19.20%
Encino	Alta	Claro	Seco	30°	41113	4111004	80.29%	19.71%

Encino	Alta	Claro	Seco	40°	41114	4111005	77.35%	22.65%
Encino	Alta	Claro	Seco	50°	41115	4111006	90.22%	9.78%
Encino	Alta	Claro	Seco	60°	41116	4111007	80.74%	19.26%
Encino	Media	Claro	Mojado	0°	42120	4212001	47.63%	52.37%
Encino	Media	Claro	Mojado	10°	42121	4212002	59.10%	40.90%
Encino	Media	Claro	Mojado	20°	42122	4212003	58.64%	41.36%
Encino	Media	Claro	Mojado	30°	42123	4212004	58.60%	41.40%
Encino	Media	Claro	Mojado	40°	42124	4212005	62.12%	37.88%
Encino	Media	Claro	Mojado	50°	42125	4212006	65.56%	34.44%
Encino	Media	Claro	Mojado	60°	42126	4212007	16.41%	83.59%
Encino	Baja	Claro	Mojado	0°	43120	4312001	15.74%	84.26%
Encino	Baja	Claro	Mojado	10°	43121	4312002	17.32%	82.68%
Encino	Baja	Claro	Mojado	20°	43122	4312003	18.38%	81.62%
Encino	Baja	Claro	Mojado	30°	43123	4312004	15.00%	85.00%
Encino	Baja	Claro	Mojado	40°	43124	4312005	7.80%	92.20%
Encino	Baja	Claro	Mojado	50°	43125	4312006	3.61%	96.39%
Encino	Baja	Claro	Mojado	60°	43126	4312007	1.83%	98.17%
Fresno	Alta	Claro	Seco	0°	51110	5111001	71.68%	28.32%
Fresno	Alta	Claro	Seco	10°	51111	5111002	69.97%	30.03%
Fresno	Alta	Claro	Seco	20°	51112	5111003	50.73%	49.27%
Fresno	Alta	Claro	Seco	30°	51113	5111004	68.65%	31.35%
Fresno	Alta	Claro	Seco	40°	51114	5111005	64.18%	35.82%
Fresno	Alta	Claro	Seco	50°	51115	5111006	63.10%	36.90%
Fresno	Alta	Claro	Seco	60°	51116	5111007	79.15%	20.85%
Fresno	Media	Claro	Seco	0°	52110	5211001	49.31%	50.69%
Fresno	Media	Claro	Seco	10°	52111	5211002	46.72%	53.28%
Fresno	Media	Claro	Seco	20°	52112	5211003	39.51%	60.49%
Fresno	Media	Claro	Seco	30°	52113	5211004	36.19%	63.81%
Fresno	Media	Claro	Seco	40°	52114	5211005	34.80%	65.20%
Fresno	Media	Claro	Seco	50°	52115	5211006	45.70%	54.30%
Fresno	Media	Claro	Seco	60°	52116	5211007	19.49%	80.51%
Fresno	Baja	Claro	Seco	0°	53110	5311001	42.21%	57.79%
Fresno	Baja	Claro	Seco	10°	53111	5311002	41.75%	58.25%
Fresno	Baja	Claro	Seco	20°	53112	5311003	41.77%	58.23%
Fresno	Baja	Claro	Seco	30°	53113	5311004	38.08%	61.92%
Fresno	Baja	Claro	Seco	40°	53114	5311005	32.12%	67.88%
Fresno	Baja	Claro	Seco	50°	53115	5311006	36.63%	63.37%
Fresno	Baja	Claro	Seco	60°	53116	5311007	30.40%	69.60%
Matorral	Alta	Claro	Seco	0°	61110	6111001	32.53%	67.47%
Matorral	Alta	Claro	Seco	10°	61111	6111002	33.25%	66.75%
Matorral	Alta	Claro	Seco	20°	61112	6111003	32.18%	67.82%
Matorral	Alta	Claro	Seco	30°	61113	6111004	31.22%	68.78%
Matorral	Alta	Claro	Seco	40°	61114	6111005	26.31%	73.69%
Matorral	Alta	Claro	Seco	50°	61115	6111006	29.38%	70.62%
Matorral	Alta	Claro	Seco	60°	61116	6111007	68.90%	31.10%
Matorral	Media	Claro	Seco	0°	62110	6211001	4.59%	95.41%
Matorral	Media	Claro	Seco	10°	62111	6211002	9.56%	90.44%
Matorral	Media	Claro	Seco	20°	62112	6211003	9.22%	90.78%
Matorral	Media	Claro	Seco	30°	62113	6211004	11.36%	88.64%
Matorral	Media	Claro	Seco	40°	62114	6211005	14.31%	85.69%

Matorral	Media	Claro	Seco	50°	62115	6211006	21.41%	78.59%
Matorral	Media	Claro	Seco	60°	62116	6211007	33.35%	66.65%
Matorral	Baja	Claro	Seco	0°	63110	6311001	2.28%	97.72%
Matorral	Baja	Claro	Seco	10°	63111	6311002	8.26%	91.74%
Matorral	Baja	Claro	Seco	20°	63112	6311003	11.47%	88.53%
Matorral	Baja	Claro	Seco	30°	63113	6311004	10.47%	89.53%
Matorral	Baja	Claro	Seco	40°	63114	6311005	14.19%	85.81%
Matorral	Baja	Claro	Seco	50°	63115	6311006	5.95%	94.05%
Matorral	Baja	Claro	Seco	60°	63116	6311007	0.00%	100.00%
P.greggii	Alta	Claro	Seco	0°	71110	7111001	50.19%	49.81%
P.greggii	Alta	Claro	Seco	10°	71111	7111002	53.36%	46.64%
P.greggii	Alta	Claro	Seco	20°	71112	7111003	49.52%	50.48%
P.greggii	Alta	Claro	Seco	30°	71113	7111004	50.51%	49.49%
P.greggii	Alta	Claro	Seco	40°	71114	7111005	58.22%	41.78%
P.greggii	Alta	Claro	Seco	50°	71115	7111006	64.11%	35.89%
P.greggii	Alta	Claro	Seco	60°	71116	7111007	61.71%	38.29%
P.greggii	Media	Claro	Seco	0°	72110	7211001	27.14%	72.86%
P.greggii	Media	Claro	Seco	10°	72111	7211002	26.73%	73.27%
P.greggii	Media	Claro	Seco	20°	72112	7211003	28.61%	71.39%
P.greggii	Media	Claro	Seco	30°	72113	7211004	32.50%	67.50%
P.greggii	Media	Claro	Seco	40°	72114	7211005	36.05%	63.95%
P.greggii	Media	Claro	Seco	50°	72115	7211006	32.33%	67.67%
P.greggii	Media	Claro	Seco	60°	72116	7211007	45.57%	54.43%
P.greggii	Baja	Claro	Seco	0°	73110	7311001	6.35%	93.65%
P.greggii	Baja	Claro	Seco	10°	73111	7311002	4.44%	95.56%
P.greggii	Baja	Claro	Seco	20°	73112	7311003	10.93%	89.07%
P.greggii	Baja	Claro	Seco	30°	73113	7311004	13.19%	86.81%
P.greggii	Baja	Claro	Seco	40°	73114	7311005	5.76%	94.24%
P.greggii	Baja	Claro	Seco	50°	73115	7311006	7.25%	92.75%
P.greggii	Baja	Claro	Seco	60°	73116	7311007	6.89%	93.11%
Pastizal	Alta	Claro	Seco	0°	81110	8111001	44.36%	55.64%
Pastizal	Alta	Claro	Seco	10°	81111	8111002	46.59%	53.41%
Pastizal	Alta	Claro	Seco	20°	81112	8111003	49.82%	50.18%
Pastizal	Alta	Claro	Seco	30°	81113	8111004	56.14%	43.86%
Pastizal	Alta	Claro	Seco	40°	81114	8111005	54.88%	45.12%
Pastizal	Alta	Claro	Seco	50°	81115	8111006	67.90%	32.10%
Pastizal	Alta	Claro	Seco	60°	81116	8111007	70.95%	29.05%
Pastizal	Media	Claro	Seco	0°	82110	8211001	29.81%	70.19%
Pastizal	Media	Claro	Seco	10°	82111	8211002	33.20%	66.80%
Pastizal	Media	Claro	Seco	20°	82112	8211003	36.38%	63.62%
Pastizal	Media	Claro	Seco	30°	82113	8211004	38.67%	61.33%
Pastizal	Media	Claro	Seco	40°	82114	8211005	43.38%	56.62%
Pastizal	Media	Claro	Seco	50°	82115	8211006	51.59%	48.41%
Pastizal	Media	Claro	Seco	60°	82116	8211007	71.77%	28.23%
Pastizal	Baja	Claro	Seco	0°	83110	8311001	9.44%	90.56%
Pastizal	Baja	Claro	Seco	10°	83111	8311002	9.90%	90.10%
Pastizal	Baja	Claro	Seco	20°	83112	8311003	11.38%	88.62%
Pastizal	Baja	Claro	Seco	30°	83113	8311004	5.55%	94.45%
Pastizal	Baja	Claro	Seco	40°	83114	8311005	9.19%	90.81%
Pastizal	Baja	Claro	Seco	50°	83115	8311006	13.86%	86.14%

---



---

Pastizal      Baja      Claro      Seco      60°      83116      8311007      0.00%      100.00%

---

**CUADRO B-7. ANCHOS DE BANDA QUE FUERON ELIMINADOS DE LA FIRMA ESPECTRAL DE CADA ESPECIE Y MEZCLA MEDIDA**

Arreglo	Especie	Ancho de banda eliminado	
		Rango 1	Rango 2
Individual	Abies	350-500	2200-2500
Individual	Acacia	350-500	1830-2500
Individual	Casuarina	350-500	2100-2500
Individual	Encino	350-450	2150-2500
Individual	Fresno	350-450	2250-2500
Individual	Matorral	350-500	1900-2500
Individual	P.Greggii	350-450	2200-2500
Individual	Pastizal	350-450	2200-2500
Individual	Suelo	350-450	2250-2500

**B-6. RECOMENDACIONES**

- ✓ Automatizar el goniómetro para que el trabajo pueda ser realizado por una persona.
- ✓ Colocar un sistema de micro-aspersión sobre el goniómetro para mojar el suelo y evitar moverlo de su posición para que no se requiera de más una persona.
- ✓ Adaptar el cableado de los sensores a un tipo suspendido del techo para el manejo.
- ✓ Construcción de un cuarto oscuro ex profeso para SIGO, es decir, sin ventanas y de al menos 25m<sup>2</sup>.
- ✓ Diseñar un software que permita captar los datos de temperatura simultáneamente con el radiómetro, ya que la captura manual de estos requiere de al menos 5 minutos por ciclo.
- ✓ De usar el SIGO en el campo en terrenos con pendiente será necesaria la adaptación de un medio arco perpendicular al actual.
- ✓ Modificar los soportes de 1m de alto a un sistema tipo telescopio, para que se puedan adaptar a varias altura, por lo menos tres posiciones intermedias. Lo que permitirá colocar el goniómetro de .20 m hasta 1 m con incrementos de 20 cm.

**B-7. DOCUMENTACIÓN DE ARCHIVOS DE REFLECTANCIA**

Para la realización del experimento se seleccionaron ocho especies forestales, con la finalidad de medir la reflectancia bajo diferentes condiciones de visión, densidad y fondo del suelo. Como se mencionó anteriormente la campaña de medición se realizó bajo condiciones controladas, con el objetivo fundamental de obtener las

---

---

funciones generales de comportamiento de la reflectancia, para relacionarlas con información estructural de la vegetación.

En este sentido, es necesario mencionar que para poder controlar todos los factores que influyen en el comportamiento de la reflectancia de la mezcla suelo-vegetación, fue necesario diseñar y construir un sistema de medición conformado por un goniómetro, una fuente de iluminación y un cajón en el que se colocaron las plantas que fueron medidas, con diferentes densidades, al igual que los fondos de la vegetación. Las densidades utilizadas fueron tres: alta, media y baja y dos tipos de suelo (claro y oscuro) en condición seco y mojado, como fondo de la vegetación. Las mediciones se realizaron, en todos los casos, en el orden descrito anteriormente.

Una medición completa, para una especie, densidad, suelo, condición hidrológica y ángulo cenital en particular correspondió a la generación de 36 espectros para la combinación en cuestión.

Los 36 espectros, correspondientes a una medición completa, se agruparon en una misma carpeta, denominada por el ángulo cenital utilizado y usando un nombre (código) que incluye a la especie, la densidad, el suelo, la condición hidrológica y el ángulo cenital seguido de un punto y el ángulo acimutal. De esta forma, la carpeta denominada "0" contiene los 36 espectros correspondientes a la primera medición y los 36 archivos de texto resultantes de la exportación de estos.

El orden jerárquico como se ordenaron y codificaron las carpetas y archivos de los espectros medidos es el siguiente:

- ❖ Especie (abies, acacia, casuarina, encino, fresno, matorral, *P. greggii*, pastizal y suelo).
  - Densidad (alta, media y baja).
    - Suelo (SCS, SCH, SOS y SOH).
      - Ángulo cenital (0, 10, 20, 30, 40, 50 y 60).
      - Archivos de espectros medidos por ángulo acimutal, en formato del radiómetro y formato \*.txt (separado por tabulaciones).

## B-8. LITERATURA CITADA

- Analytical Spectral Devices, Inc. 1999. (ASD) Technical guide. 3rd ed. pp 136.
- Cano A., F. Paz., M. Bolaños., E. Palacios., E. Mejía., J. L. Oropeza., L. Valdez., J. Chávez y A. Zarco. 2007. Sobre la clasificación de sistemas arbolados usando información espectral multi-angular. Enviado a Agrociencia.
- 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. *International Journal of Remote Sensing*, 6:1271-1381.
- Morin J., D. Goldberg and I. Seginer. 1967. A Rainfall simulator with a rotating disk. *Transactions of ASAE*, 10: 74-79.

## ANEXO C. GRÁFICAS DIRECCIONALES DE REFLECTANCIA

En el presente anexo se muestran las gráficas direccionales de reflectancia para cada una de las cuatro bandas espectrales del satélite Landsat TM y para cada condición de la especie graficadas, siendo un total de 400 gráficas. Los códigos de las graficas se describen en el cuadro C-1.

Los valores de “z” en las gráficas corresponden a la reflectancia en porcentaje: los de “x” a los ángulos cenitales, ordenados de  $-60^\circ$  a  $60^\circ$ , y los de “y” corresponden a los ángulos acimutales ordenados de  $-90^\circ$  a  $90^\circ$ . Correspondiendo la parte cenital negativa a la zona iluminada y la parte positiva a la sombreada del área de medición y en la parte acimutal, los números negativos van a favor de las manecillas del reloj y los positivos en sentido contrario.

**Cuadro C-1. Códigos de gráficas direccionales de reflectancia**

ESPECIE	DENSIDAD	SUELO	HIDROLÓGIA	CODIGO	BANDA TM	GRAFICA
Suelo	N/D	Claro	Seco	0011	V	0011-V
Suelo	N/D	Claro	Seco	0011	R	0011-R
Suelo	N/D	Claro	Seco	0011	IRC	0011-IRC
Suelo	N/D	Claro	Seco	0011	IRM1	0011-IRM1
Suelo	N/D	Claro	Mojado	0012	V	0012-V
Suelo	N/D	Claro	Mojado	0012	R	0012-R
Suelo	N/D	Claro	Mojado	0012	IRC	0012-IRC
Suelo	N/D	Claro	Mojado	0012	IRM1	0012-IRM1
Suelo	N/D	Oscuro	Seco	0021	V	0021-V
Suelo	N/D	Oscuro	Seco	0021	R	0021-R
Suelo	N/D	Oscuro	Seco	0021	IRC	0021-IRC
Suelo	N/D	Oscuro	Seco	0021	IRM1	0021-IRM1
Suelo	N/D	Oscuro	Mojado	0022	V	0022-V
Suelo	N/D	Oscuro	Mojado	0022	R	0022-R
Suelo	N/D	Oscuro	Mojado	0022	IRC	0022-IRC
Suelo	N/D	Oscuro	Mojado	0022	IRM1	0022-IRM1
Abies	Alta	Claro	Seco	1111	V	1111-V
Abies	Alta	Claro	Seco	1111	R	1111-R
Abies	Alta	Claro	Seco	1111	IRC	1111-IRC
Abies	Alta	Claro	Seco	1111	IRM1	1111-IRM1
Abies	Alta	Claro	Mojado	1112	V	1112-V
Abies	Alta	Claro	Mojado	1112	R	1112-R
Abies	Alta	Claro	Mojado	1112	IRC	1112-IRC
Abies	Alta	Claro	Mojado	1112	IRM1	1112-IRM1
Abies	Alta	Oscuro	Seco	1121	V	1121-V
Abies	Alta	Oscuro	Seco	1121	R	1121-R
Abies	Alta	Oscuro	Seco	1121	IRC	1121-IRC
Abies	Alta	Oscuro	Seco	1121	IRM1	1121-IRM1
Abies	Alta	Oscuro	Mojado	1122	V	1122-V
Abies	Alta	Oscuro	Mojado	1122	R	1122-R
Abies	Alta	Oscuro	Mojado	1122	IRC	1122-IRC
Abies	Alta	Oscuro	Mojado	1122	IRM1	1122-IRM1
Abies	Media	Claro	Seco	1211	V	1211-V

Abies	Media	Claro	Seco	1211	R	1211-R
Abies	Media	Claro	Seco	1211	IRC	1211-IRC
Abies	Media	Claro	Seco	1211	IRM1	1211-IRM1
Abies	Media	Claro	Mojado	1212	V	1212-V
Abies	Media	Claro	Mojado	1212	R	1212-R
Abies	Media	Claro	Mojado	1212	IRC	1212-IRC
Abies	Media	Claro	Mojado	1212	IRM1	1212-IRM1
Abies	Media	Oscuro	Seco	1221	V	1221-V
Abies	Media	Oscuro	Seco	1221	R	1221-R
Abies	Media	Oscuro	Seco	1221	IRC	1221-IRC
Abies	Media	Oscuro	Seco	1221	IRM1	1221-IRM1
Abies	Media	Oscuro	Mojado	1222	V	1222-V
Abies	Media	Oscuro	Mojado	1222	R	1222-R
Abies	Media	Oscuro	Mojado	1222	IRC	1222-IRC
Abies	Media	Oscuro	Mojado	1222	IRM1	1222-IRM1
Abies	Baja	Claro	Seco	1311	V	1311-V
Abies	Baja	Claro	Seco	1311	R	1311-R
Abies	Baja	Claro	Seco	1311	IRC	1311-IRC
Abies	Baja	Claro	Seco	1311	IRM1	1311-IRM1
Abies	Baja	Claro	Mojado	1312	V	1312-V
Abies	Baja	Claro	Mojado	1312	R	1312-R
Abies	Baja	Claro	Mojado	1312	IRC	1312-IRC
Abies	Baja	Claro	Mojado	1312	IRM1	1312-IRM1
Abies	Baja	Oscuro	Seco	1321	V	1321-V
Abies	Baja	Oscuro	Seco	1321	R	1321-R
Abies	Baja	Oscuro	Seco	1321	IRC	1321-IRC
Abies	Baja	Oscuro	Seco	1321	IRM1	1321-IRM1
Abies	Baja	Oscuro	Mojado	1322	V	1322-V
Abies	Baja	Oscuro	Mojado	1322	R	1322-R
Abies	Baja	Oscuro	Mojado	1322	IRC	1322-IRC
Abies	Baja	Oscuro	Mojado	1322	IRM1	1322-IRM1
Acacia	Alta	Claro	Seco	2111	V	2111-V
Acacia	Alta	Claro	Seco	2111	R	2111-R
Acacia	Alta	Claro	Seco	2111	IRC	2111-IRC
Acacia	Alta	Claro	Seco	2111	IRM1	2111-IRM1
Acacia	Alta	Claro	Mojado	2112	V	2112-V
Acacia	Alta	Claro	Mojado	2112	R	2112-R
Acacia	Alta	Claro	Mojado	2112	IRC	2112-IRC
Acacia	Alta	Claro	Mojado	2112	IRM1	2112-IRM1
Acacia	Alta	Oscuro	Seco	2121	V	2121-V
Acacia	Alta	Oscuro	Seco	2121	R	2121-R
Acacia	Alta	Oscuro	Seco	2121	IRC	2121-IRC
Acacia	Alta	Oscuro	Seco	2121	IRM1	2121-IRM1
Acacia	Alta	Oscuro	Mojado	2122	V	2122-V
Acacia	Alta	Oscuro	Mojado	2122	R	2122-R
Acacia	Alta	Oscuro	Mojado	2122	IRC	2122-IRC
Acacia	Alta	Oscuro	Mojado	2122	IRM1	2122-IRM1
Acacia	Media	Claro	Seco	2211	V	2211-V
Acacia	Media	Claro	Seco	2211	R	2211-R
Acacia	Media	Claro	Seco	2211	IRC	2211-IRC
Acacia	Media	Claro	Seco	2211	IRM1	2211-IRM1
Acacia	Media	Claro	Mojado	2212	V	2212-V

Acacia	Media	Claro	Mojado	2212	R	2212-R
Acacia	Media	Claro	Mojado	2212	IRC	2212-IRC
Acacia	Media	Claro	Mojado	2212	IRM1	2212-IRM1
Acacia	Media	Oscuro	Seco	2221	V	2221-V
Acacia	Media	Oscuro	Seco	2221	R	2221-R
Acacia	Media	Oscuro	Seco	2221	IRC	2221-IRC
Acacia	Media	Oscuro	Seco	2221	IRM1	2221-IRM1
Acacia	Media	Oscuro	Mojado	2222	V	2222-V
Acacia	Media	Oscuro	Mojado	2222	R	2222-R
Acacia	Media	Oscuro	Mojado	2222	IRC	2222-IRC
Acacia	Media	Oscuro	Mojado	2222	IRM1	2222-IRM1
Acacia	Baja	Claro	Seco	2311	V	2311-V
Acacia	Baja	Claro	Seco	2311	R	2311-R
Acacia	Baja	Claro	Seco	2311	IRC	2311-IRC
Acacia	Baja	Claro	Seco	2311	IRM1	2311-IRM1
Acacia	Baja	Claro	Mojado	2312	V	2312-V
Acacia	Baja	Claro	Mojado	2312	R	2312-R
Acacia	Baja	Claro	Mojado	2312	IRC	2312-IRC
Acacia	Baja	Claro	Mojado	2312	IRM1	2312-IRM1
Acacia	Baja	Oscuro	Seco	2321	V	2321-V
Acacia	Baja	Oscuro	Seco	2321	R	2321-R
Acacia	Baja	Oscuro	Seco	2321	IRC	2321-IRC
Acacia	Baja	Oscuro	Seco	2321	IRM1	2321-IRM1
Acacia	Baja	Oscuro	Mojado	2322	V	2322-V
Acacia	Baja	Oscuro	Mojado	2322	R	2322-R
Acacia	Baja	Oscuro	Mojado	2322	IRC	2322-IRC
Acacia	Baja	Oscuro	Mojado	2322	IRM1	2322-IRM1
Casuarina	Alta	Claro	Seco	3111	V	3111-V
Casuarina	Alta	Claro	Seco	3111	R	3111-R
Casuarina	Alta	Claro	Seco	3111	IRC	3111-IRC
Casuarina	Alta	Claro	Seco	3111	IRM1	3111-IRM1
Casuarina	Alta	Claro	Mojado	3112	V	3112-V
Casuarina	Alta	Claro	Mojado	3112	R	3112-R
Casuarina	Alta	Claro	Mojado	3112	IRC	3112-IRC
Casuarina	Alta	Claro	Mojado	3112	IRM1	3112-IRM1
Casuarina	Alta	Oscuro	Seco	3121	V	3121-V
Casuarina	Alta	Oscuro	Seco	3121	R	3121-R
Casuarina	Alta	Oscuro	Seco	3121	IRC	3121-IRC
Casuarina	Alta	Oscuro	Seco	3121	IRM1	3121-IRM1
Casuarina	Alta	Oscuro	Mojado	3122	V	3122-V
Casuarina	Alta	Oscuro	Mojado	3122	R	3122-R
Casuarina	Alta	Oscuro	Mojado	3122	IRC	3122-IRC
Casuarina	Alta	Oscuro	Mojado	3122	IRM1	3122-IRM1
Casuarina	Media	Claro	Seco	3211	V	3211-V
Casuarina	Media	Claro	Seco	3211	R	3211-R
Casuarina	Media	Claro	Seco	3211	IRC	3211-IRC
Casuarina	Media	Claro	Seco	3211	IRM1	3211-IRM1
Casuarina	Media	Claro	Mojado	3212	V	3212-V
Casuarina	Media	Claro	Mojado	3212	R	3212-R
Casuarina	Media	Claro	Mojado	3212	IRC	3212-IRC
Casuarina	Media	Claro	Mojado	3212	IRM1	3212-IRM1
Casuarina	Media	Oscuro	Seco	3221	V	3221-V

Casuarina	Media	Oscuro	Seco	3221	R	3221-R
Casuarina	Media	Oscuro	Seco	3221	IRC	3221-IRC
Casuarina	Media	Oscuro	Seco	3221	IRM1	3221-IRM1
Casuarina	Media	Oscuro	Mojado	3222	V	3222-V
Casuarina	Media	Oscuro	Mojado	3222	R	3222-R
Casuarina	Media	Oscuro	Mojado	3222	IRC	3222-IRC
Casuarina	Media	Oscuro	Mojado	3222	IRM1	3222-IRM1
Casuarina	Baja	Claro	Seco	3311	V	3311-V
Casuarina	Baja	Claro	Seco	3311	R	3311-R
Casuarina	Baja	Claro	Seco	3311	IRC	3311-IRC
Casuarina	Baja	Claro	Seco	3311	IRM1	3311-IRM1
Casuarina	Baja	Claro	Mojado	3312	V	3312-V
Casuarina	Baja	Claro	Mojado	3312	R	3312-R
Casuarina	Baja	Claro	Mojado	3312	IRC	3312-IRC
Casuarina	Baja	Claro	Mojado	3312	IRM1	3312-IRM1
Casuarina	Baja	Oscuro	Seco	3321	V	3321-V
Casuarina	Baja	Oscuro	Seco	3321	R	3321-R
Casuarina	Baja	Oscuro	Seco	3321	IRC	3321-IRC
Casuarina	Baja	Oscuro	Seco	3321	IRM1	3321-IRM1
Casuarina	Baja	Oscuro	Mojado	3322	V	3322-V
Casuarina	Baja	Oscuro	Mojado	3322	R	3322-R
Casuarina	Baja	Oscuro	Mojado	3322	IRC	3322-IRC
Casuarina	Baja	Oscuro	Mojado	3322	IRM1	3322-IRM1
Encino	Alta	Claro	Seco	4111	V	4111-V
Encino	Alta	Claro	Seco	4111	R	4111-R
Encino	Alta	Claro	Seco	4111	IRC	4111-IRC
Encino	Alta	Claro	Seco	4111	IRM1	4111-IRM1
Encino	Alta	Claro	Mojado	4112	V	4112-V
Encino	Alta	Claro	Mojado	4112	R	4112-R
Encino	Alta	Claro	Mojado	4112	IRC	4112-IRC
Encino	Alta	Claro	Mojado	4112	IRM1	4112-IRM1
Encino	Alta	Oscuro	Seco	4121	V	4121-V
Encino	Alta	Oscuro	Seco	4121	R	4121-R
Encino	Alta	Oscuro	Seco	4121	IRC	4121-IRC
Encino	Alta	Oscuro	Seco	4121	IRM1	4121-IRM1
Encino	Alta	Oscuro	Mojado	4122	V	4122-V
Encino	Alta	Oscuro	Mojado	4122	R	4122-R
Encino	Alta	Oscuro	Mojado	4122	IRC	4122-IRC
Encino	Alta	Oscuro	Mojado	4122	IRM1	4122-IRM1
Encino	Media	Claro	Seco	4211	V	4211-V
Encino	Media	Claro	Seco	4211	R	4211-R
Encino	Media	Claro	Seco	4211	IRC	4211-IRC
Encino	Media	Claro	Seco	4211	IRM1	4211-IRM1
Encino	Media	Claro	Mojado	4212	V	4212-V
Encino	Media	Claro	Mojado	4212	R	4212-R
Encino	Media	Claro	Mojado	4212	IRC	4212-IRC
Encino	Media	Claro	Mojado	4212	IRM1	4212-IRM1
Encino	Media	Oscuro	Seco	4221	V	4221-V
Encino	Media	Oscuro	Seco	4221	R	4221-R
Encino	Media	Oscuro	Seco	4221	IRC	4221-IRC
Encino	Media	Oscuro	Seco	4221	IRM1	4221-IRM1
Encino	Media	Oscuro	Mojado	4222	V	4222-V

Encino	Media	Oscuro	Mojado	4222	R	4222-R
Encino	Media	Oscuro	Mojado	4222	IRC	4222-IRC
Encino	Media	Oscuro	Mojado	4222	IRM1	4222-IRM1
Encino	Baja	Claro	Seco	4311	V	4311-V
Encino	Baja	Claro	Seco	4311	R	4311-R
Encino	Baja	Claro	Seco	4311	IRC	4311-IRC
Encino	Baja	Claro	Seco	4311	IRM1	4311-IRM1
Encino	Baja	Claro	Mojado	4312	V	4312-V
Encino	Baja	Claro	Mojado	4312	R	4312-R
Encino	Baja	Claro	Mojado	4312	IRC	4312-IRC
Encino	Baja	Claro	Mojado	4312	IRM1	4312-IRM1
Encino	Baja	Oscuro	Seco	4321	V	4321-V
Encino	Baja	Oscuro	Seco	4321	R	4321-R
Encino	Baja	Oscuro	Seco	4321	IRC	4321-IRC
Encino	Baja	Oscuro	Seco	4321	IRM1	4321-IRM1
Encino	Baja	Oscuro	Mojado	4322	V	4322-V
Encino	Baja	Oscuro	Mojado	4322	R	4322-R
Encino	Baja	Oscuro	Mojado	4322	IRC	4322-IRC
Encino	Baja	Oscuro	Mojado	4322	IRM1	4322-IRM1
Fresno	Alta	Claro	Seco	5111	V	5111-V
Fresno	Alta	Claro	Seco	5111	R	5111-R
Fresno	Alta	Claro	Seco	5111	IRC	5111-IRC
Fresno	Alta	Claro	Seco	5111	IRM1	5111-IRM1
Fresno	Alta	Claro	Mojado	5112	V	5112-V
Fresno	Alta	Claro	Mojado	5112	R	5112-R
Fresno	Alta	Claro	Mojado	5112	IRC	5112-IRC
Fresno	Alta	Claro	Mojado	5112	IRM1	5112-IRM1
Fresno	Alta	Oscuro	Seco	5121	V	5121-V
Fresno	Alta	Oscuro	Seco	5121	R	5121-R
Fresno	Alta	Oscuro	Seco	5121	IRC	5121-IRC
Fresno	Alta	Oscuro	Seco	5121	IRM1	5121-IRM1
Fresno	Alta	Oscuro	Mojado	5122	V	5122-V
Fresno	Alta	Oscuro	Mojado	5122	R	5122-R
Fresno	Alta	Oscuro	Mojado	5122	IRC	5122-IRC
Fresno	Alta	Oscuro	Mojado	5122	IRM1	5122-IRM1
Fresno	Media	Claro	Seco	5211	V	5211-V
Fresno	Media	Claro	Seco	5211	R	5211-R
Fresno	Media	Claro	Seco	5211	IRC	5211-IRC
Fresno	Media	Claro	Seco	5211	IRM1	5211-IRM1
Fresno	Media	Claro	Mojado	5212	V	5212-V
Fresno	Media	Claro	Mojado	5212	R	5212-R
Fresno	Media	Claro	Mojado	5212	IRC	5212-IRC
Fresno	Media	Claro	Mojado	5212	IRM1	5212-IRM1
Fresno	Media	Oscuro	Seco	5221	V	5221-V
Fresno	Media	Oscuro	Seco	5221	R	5221-R
Fresno	Media	Oscuro	Seco	5221	IRC	5221-IRC
Fresno	Media	Oscuro	Seco	5221	IRM1	5221-IRM1
Fresno	Media	Oscuro	Mojado	5222	V	5222-V
Fresno	Media	Oscuro	Mojado	5222	R	5222-R
Fresno	Media	Oscuro	Mojado	5222	IRC	5222-IRC
Fresno	Media	Oscuro	Mojado	5222	IRM1	5222-IRM1
Fresno	Baja	Claro	Seco	5311	V	5311-V

Fresno	Baja	Claro	Seco	5311	R	5311-R
Fresno	Baja	Claro	Seco	5311	IRC	5311-IRC
Fresno	Baja	Claro	Seco	5311	IRM1	5311-IRM1
Fresno	Baja	Claro	Mojado	5312	V	5312-V
Fresno	Baja	Claro	Mojado	5312	R	5312-R
Fresno	Baja	Claro	Mojado	5312	IRC	5312-IRC
Fresno	Baja	Claro	Mojado	5312	IRM1	5312-IRM1
Fresno	Baja	Oscuro	Seco	5321	V	5321-V
Fresno	Baja	Oscuro	Seco	5321	R	5321-R
Fresno	Baja	Oscuro	Seco	5321	IRC	5321-IRC
Fresno	Baja	Oscuro	Seco	5321	IRM1	5321-IRM1
Fresno	Baja	Oscuro	Mojado	5322	V	5322-V
Fresno	Baja	Oscuro	Mojado	5322	R	5322-R
Fresno	Baja	Oscuro	Mojado	5322	IRC	5322-IRC
Fresno	Baja	Oscuro	Mojado	5322	IRM1	5322-IRM1
Matorral	Alta	Claro	Seco	6111	V	6111-V
Matorral	Alta	Claro	Seco	6111	R	6111-R
Matorral	Alta	Claro	Seco	6111	IRC	6111-IRC
Matorral	Alta	Claro	Seco	6111	IRM1	6111-IRM1
Matorral	Alta	Claro	Mojado	6112	V	6112-V
Matorral	Alta	Claro	Mojado	6112	R	6112-R
Matorral	Alta	Claro	Mojado	6112	IRC	6112-IRC
Matorral	Alta	Claro	Mojado	6112	IRM1	6112-IRM1
Matorral	Alta	Oscuro	Seco	6121	V	6121-V
Matorral	Alta	Oscuro	Seco	6121	R	6121-R
Matorral	Alta	Oscuro	Seco	6121	IRC	6121-IRC
Matorral	Alta	Oscuro	Seco	6121	IRM1	6121-IRM1
Matorral	Alta	Oscuro	Mojado	6122	V	6122-V
Matorral	Alta	Oscuro	Mojado	6122	R	6122-R
Matorral	Alta	Oscuro	Mojado	6122	IRC	6122-IRC
Matorral	Alta	Oscuro	Mojado	6122	IRM1	6122-IRM1
Matorral	Media	Claro	Seco	6211	V	6211-V
Matorral	Media	Claro	Seco	6211	R	6211-R
Matorral	Media	Claro	Seco	6211	IRC	6211-IRC
Matorral	Media	Claro	Seco	6211	IRM1	6211-IRM1
Matorral	Media	Claro	Mojado	6212	V	6212-V
Matorral	Media	Claro	Mojado	6212	R	6212-R
Matorral	Media	Claro	Mojado	6212	IRC	6212-IRC
Matorral	Media	Claro	Mojado	6212	IRM1	6212-IRM1
Matorral	Media	Oscuro	Seco	6221	V	6221-V
Matorral	Media	Oscuro	Seco	6221	R	6221-R
Matorral	Media	Oscuro	Seco	6221	IRC	6221-IRC
Matorral	Media	Oscuro	Seco	6221	IRM1	6221-IRM1
Matorral	Media	Oscuro	Mojado	6222	V	6222-V
Matorral	Media	Oscuro	Mojado	6222	R	6222-R
Matorral	Media	Oscuro	Mojado	6222	IRC	6222-IRC
Matorral	Media	Oscuro	Mojado	6222	IRM1	6222-IRM1
Matorral	Baja	Claro	Seco	6311	V	6311-V
Matorral	Baja	Claro	Seco	6311	R	6311-R
Matorral	Baja	Claro	Seco	6311	IRC	6311-IRC
Matorral	Baja	Claro	Seco	6311	IRM1	6311-IRM1
Matorral	Baja	Claro	Mojado	6312	V	6312-V

Matorral	Baja	Claro	Mojado	6312	R	6312-R
Matorral	Baja	Claro	Mojado	6312	IRC	6312-IRC
Matorral	Baja	Claro	Mojado	6312	IRM1	6312-IRM1
Matorral	Baja	Oscuro	Seco	6321	V	6321-V
Matorral	Baja	Oscuro	Seco	6321	R	6321-R
Matorral	Baja	Oscuro	Seco	6321	IRC	6321-IRC
Matorral	Baja	Oscuro	Seco	6321	IRM1	6321-IRM1
Matorral	Baja	Oscuro	Mojado	6322	V	6322-V
Matorral	Baja	Oscuro	Mojado	6322	R	6322-R
Matorral	Baja	Oscuro	Mojado	6322	IRC	6322-IRC
Matorral	Baja	Oscuro	Mojado	6322	IRM1	6322-IRM1
P.greggii	Alta	Claro	Seco	7111	V	7111-V
P.greggii	Alta	Claro	Seco	7111	R	7111-R
P.greggii	Alta	Claro	Seco	7111	IRC	7111-IRC
P.greggii	Alta	Claro	Seco	7111	IRM1	7111-IRM1
P.greggii	Alta	Claro	Mojado	7112	V	7112-V
P.greggii	Alta	Claro	Mojado	7112	R	7112-R
P.greggii	Alta	Claro	Mojado	7112	IRC	7112-IRC
P.greggii	Alta	Claro	Mojado	7112	IRM1	7112-IRM1
P.greggii	Alta	Oscuro	Seco	7121	V	7121-V
P.greggii	Alta	Oscuro	Seco	7121	R	7121-R
P.greggii	Alta	Oscuro	Seco	7121	IRC	7121-IRC
P.greggii	Alta	Oscuro	Seco	7121	IRM1	7121-IRM1
P.greggii	Alta	Oscuro	Mojado	7122	V	7122-V
P.greggii	Alta	Oscuro	Mojado	7122	R	7122-R
P.greggii	Alta	Oscuro	Mojado	7122	IRC	7122-IRC
P.greggii	Alta	Oscuro	Mojado	7122	IRM1	7122-IRM1
P.greggii	Media	Claro	Seco	7211	V	7211-V
P.greggii	Media	Claro	Seco	7211	R	7211-R
P.greggii	Media	Claro	Seco	7211	IRC	7211-IRC
P.greggii	Media	Claro	Seco	7211	IRM1	7211-IRM1
P.greggii	Media	Claro	Mojado	7212	V	7212-V
P.greggii	Media	Claro	Mojado	7212	R	7212-R
P.greggii	Media	Claro	Mojado	7212	IRC	7212-IRC
P.greggii	Media	Claro	Mojado	7212	IRM1	7212-IRM1
P.greggii	Media	Oscuro	Seco	7221	V	7221-V
P.greggii	Media	Oscuro	Seco	7221	R	7221-R
P.greggii	Media	Oscuro	Seco	7221	IRC	7221-IRC
P.greggii	Media	Oscuro	Seco	7221	IRM1	7221-IRM1
P.greggii	Media	Oscuro	Mojado	7222	V	7222-V
P.greggii	Media	Oscuro	Mojado	7222	R	7222-R
P.greggii	Media	Oscuro	Mojado	7222	IRC	7222-IRC
P.greggii	Media	Oscuro	Mojado	7222	IRM1	7222-IRM1
P.greggii	Baja	Claro	Seco	7311	V	7311-V
P.greggii	Baja	Claro	Seco	7311	R	7311-R
P.greggii	Baja	Claro	Seco	7311	IRC	7311-IRC
P.greggii	Baja	Claro	Seco	7311	IRM1	7311-IRM1
P.greggii	Baja	Claro	Mojado	7312	V	7312-V
P.greggii	Baja	Claro	Mojado	7312	R	7312-R
P.greggii	Baja	Claro	Mojado	7312	IRC	7312-IRC
P.greggii	Baja	Claro	Mojado	7312	IRM1	7312-IRM1
P.greggii	Baja	Oscuro	Seco	7321	V	7321-V

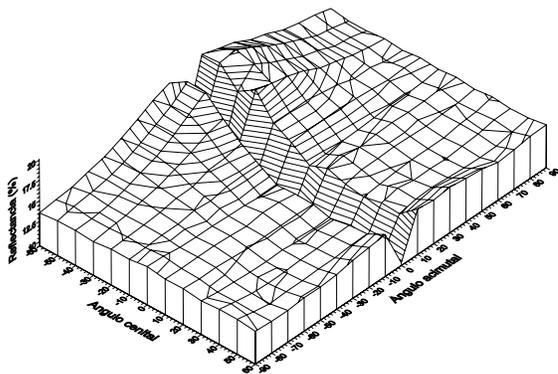
P.greggii	Baja	Oscuro	Seco	7321	R	7321-R
P.greggii	Baja	Oscuro	Seco	7321	IRC	7321-IRC
P.greggii	Baja	Oscuro	Seco	7321	IRM1	7321-IRM1
P.greggii	Baja	Oscuro	Mojado	7322	V	7322-V
P.greggii	Baja	Oscuro	Mojado	7322	R	7322-R
P.greggii	Baja	Oscuro	Mojado	7322	IRC	7322-IRC
P.greggii	Baja	Oscuro	Mojado	7322	IRM1	7322-IRM1
Pastizal	Alta	Claro	Seco	8111	V	8111-V
Pastizal	Alta	Claro	Seco	8111	R	8111-R
Pastizal	Alta	Claro	Seco	8111	IRC	8111-IRC
Pastizal	Alta	Claro	Seco	8111	IRM1	8111-IRM1
Pastizal	Alta	Claro	Mojado	8112	V	8112-V
Pastizal	Alta	Claro	Mojado	8112	R	8112-R
Pastizal	Alta	Claro	Mojado	8112	IRC	8112-IRC
Pastizal	Alta	Claro	Mojado	8112	IRM1	8112-IRM1
Pastizal	Alta	Oscuro	Seco	8121	V	8121-V
Pastizal	Alta	Oscuro	Seco	8121	R	8121-R
Pastizal	Alta	Oscuro	Seco	8121	IRC	8121-IRC
Pastizal	Alta	Oscuro	Seco	8121	IRM1	8121-IRM1
Pastizal	Alta	Oscuro	Mojado	8122	V	8122-V
Pastizal	Alta	Oscuro	Mojado	8122	R	8122-R
Pastizal	Alta	Oscuro	Mojado	8122	IRC	8122-IRC
Pastizal	Alta	Oscuro	Mojado	8122	IRM1	8122-IRM1
Pastizal	Media	Claro	Seco	8211	V	8211-V
Pastizal	Media	Claro	Seco	8211	R	8211-R
Pastizal	Media	Claro	Seco	8211	IRC	8211-IRC
Pastizal	Media	Claro	Seco	8211	IRM1	8211-IRM1
Pastizal	Media	Claro	Mojado	8212	V	8212-V
Pastizal	Media	Claro	Mojado	8212	R	8212-R
Pastizal	Media	Claro	Mojado	8212	IRC	8212-IRC
Pastizal	Media	Claro	Mojado	8212	IRM1	8212-IRM1
Pastizal	Media	Oscuro	Seco	8221	V	8221-V
Pastizal	Media	Oscuro	Seco	8221	R	8221-R
Pastizal	Media	Oscuro	Seco	8221	IRC	8221-IRC
Pastizal	Media	Oscuro	Seco	8221	IRM1	8221-IRM1
Pastizal	Media	Oscuro	Mojado	8222	V	8222-V
Pastizal	Media	Oscuro	Mojado	8222	R	8222-R
Pastizal	Media	Oscuro	Mojado	8222	IRC	8222-IRC
Pastizal	Media	Oscuro	Mojado	8222	IRM1	8222-IRM1
Pastizal	Baja	Claro	Seco	8311	V	8311-V
Pastizal	Baja	Claro	Seco	8311	R	8311-R
Pastizal	Baja	Claro	Seco	8311	IRC	8311-IRC
Pastizal	Baja	Claro	Seco	8311	IRM1	8311-IRM1
Pastizal	Baja	Claro	Mojado	8312	V	8312-V
Pastizal	Baja	Claro	Mojado	8312	R	8312-R
Pastizal	Baja	Claro	Mojado	8312	IRC	8312-IRC
Pastizal	Baja	Claro	Mojado	8312	IRM1	8312-IRM1
Pastizal	Baja	Oscuro	Seco	8321	V	8321-V
Pastizal	Baja	Oscuro	Seco	8321	R	8321-R
Pastizal	Baja	Oscuro	Seco	8321	IRC	8321-IRC
Pastizal	Baja	Oscuro	Seco	8321	IRM1	8321-IRM1
Pastizal	Baja	Oscuro	Mojado	8322	V	8322-V

---

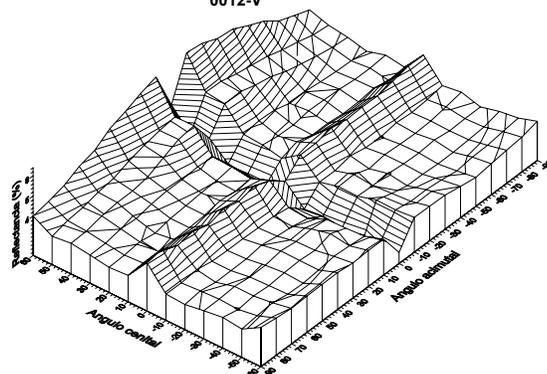
---

Pastizal	Baja	Oscuro	Mojado	8322	R	8322-R
Pastizal	Baja	Oscuro	Mojado	8322	IRC	8322-IRC
Pastizal	Baja	Oscuro	Mojado	8322	IRM1	8322-IRM1

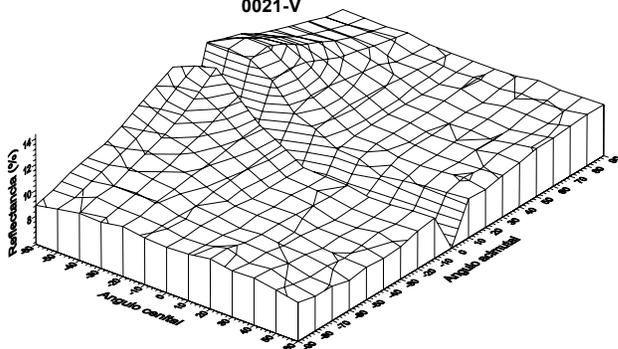
0011-V



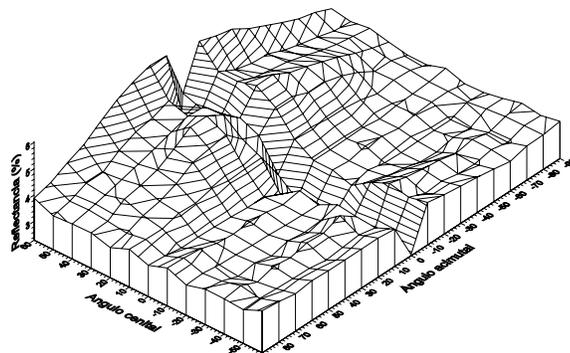
0012-V



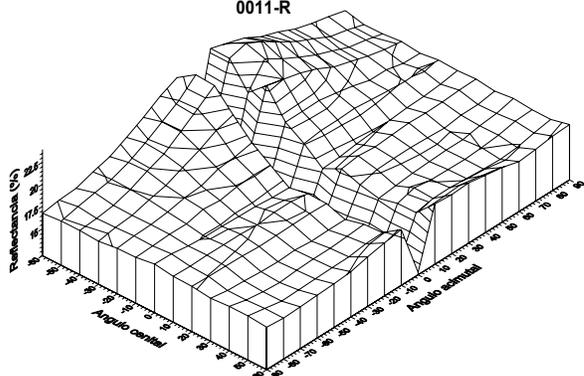
0021-V



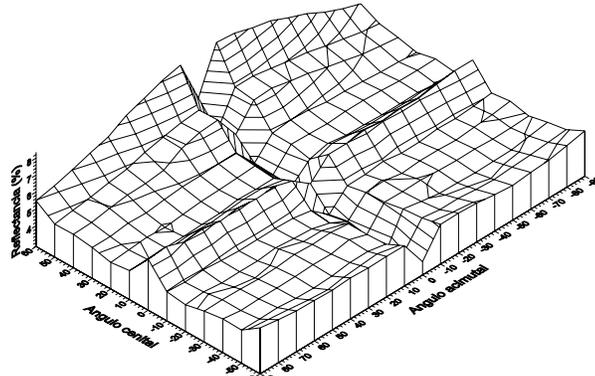
0022-V



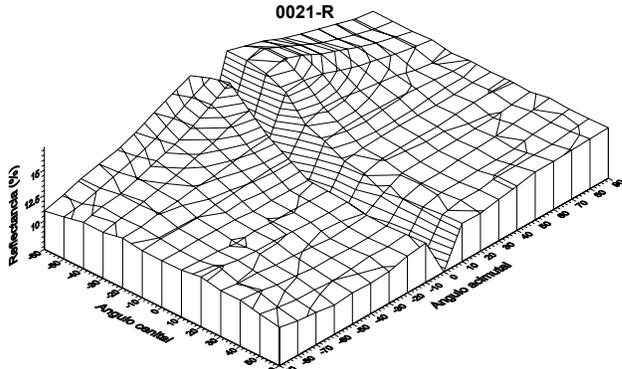
0011-R



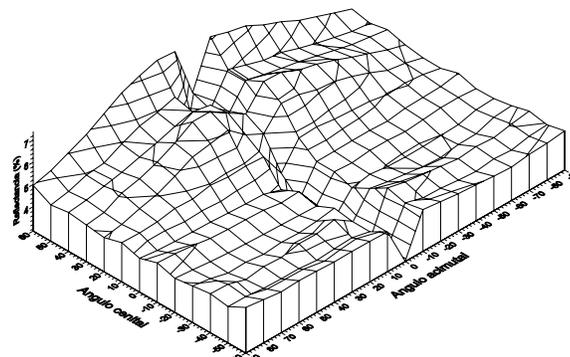
0012-R

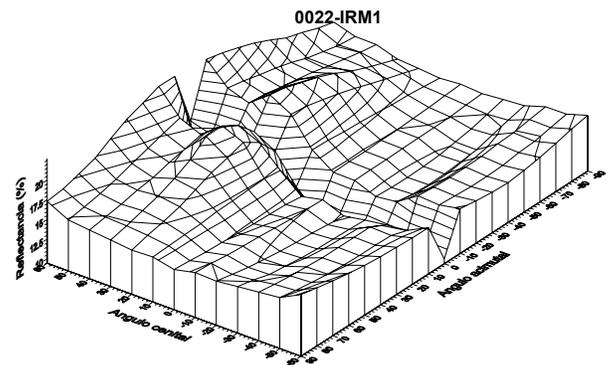
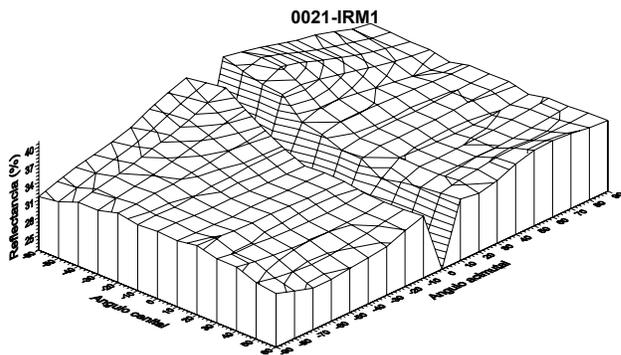
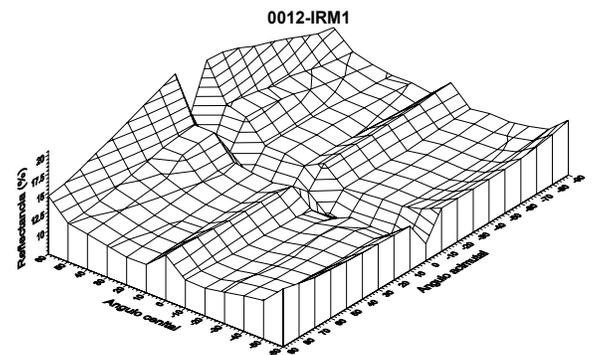
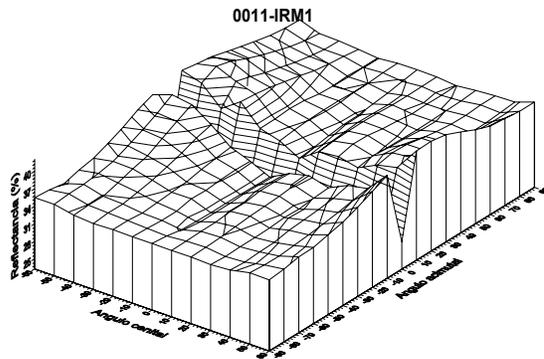
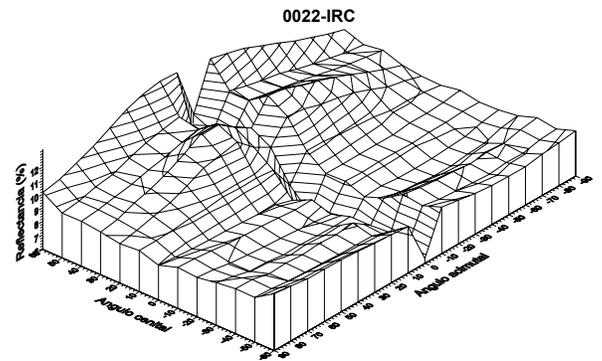
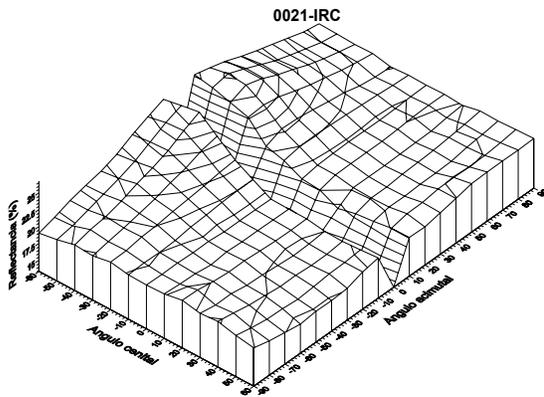
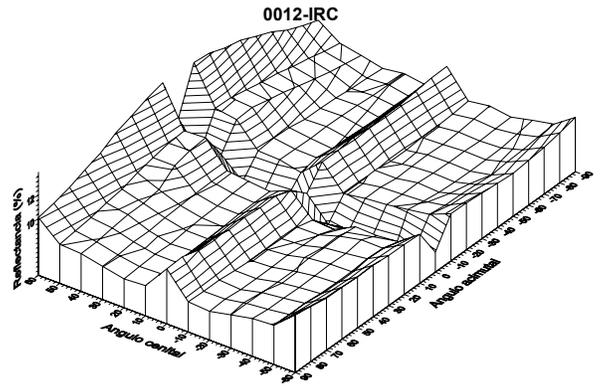
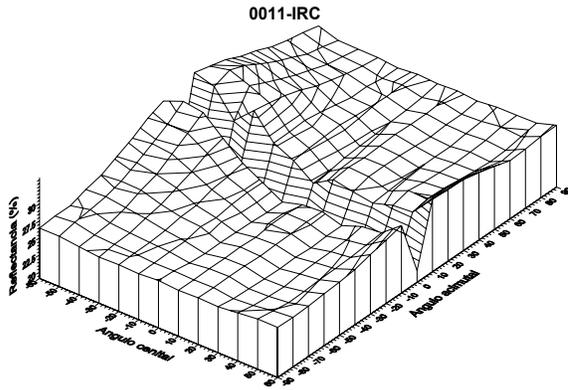


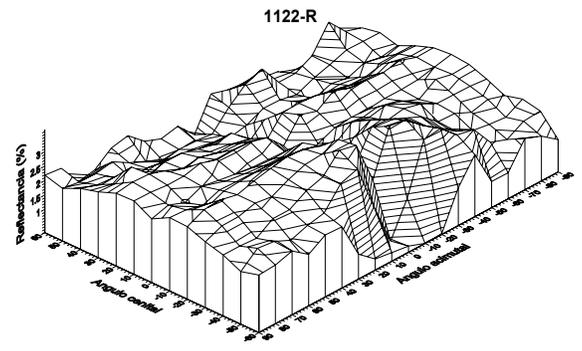
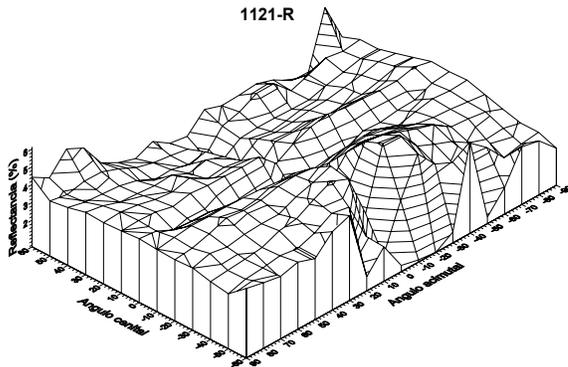
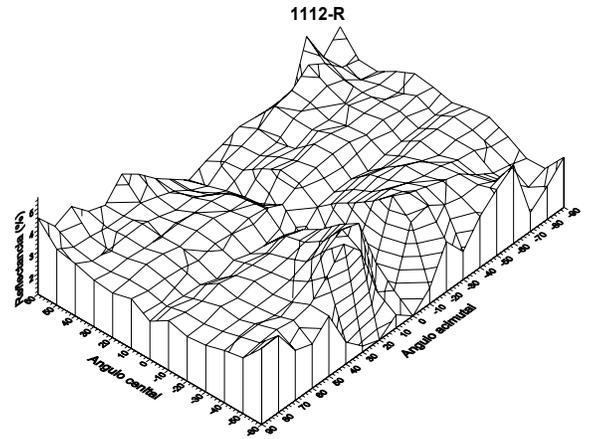
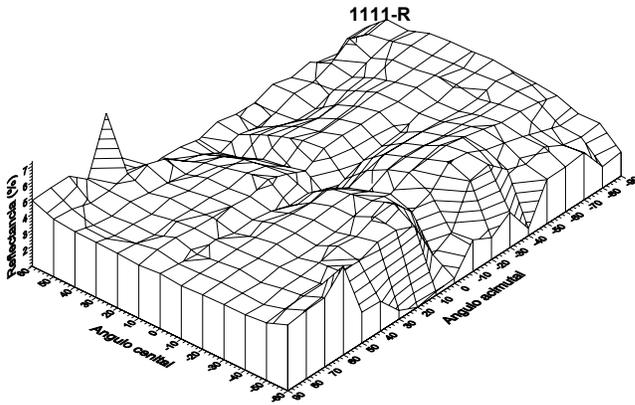
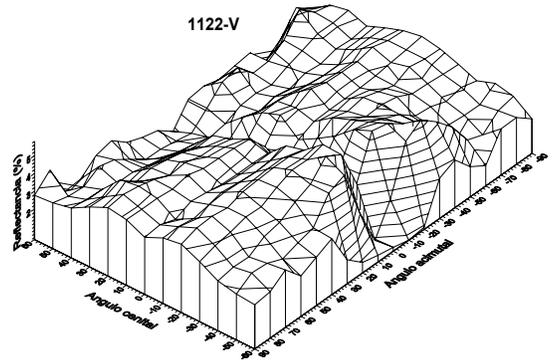
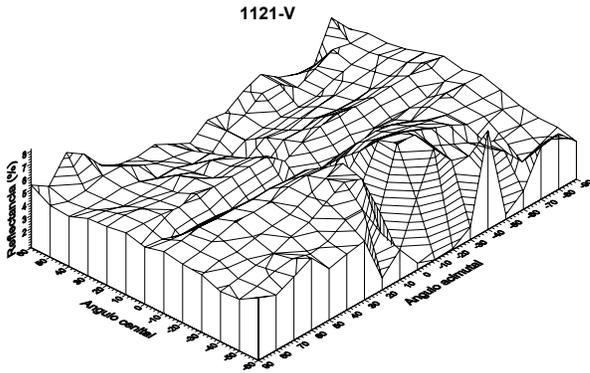
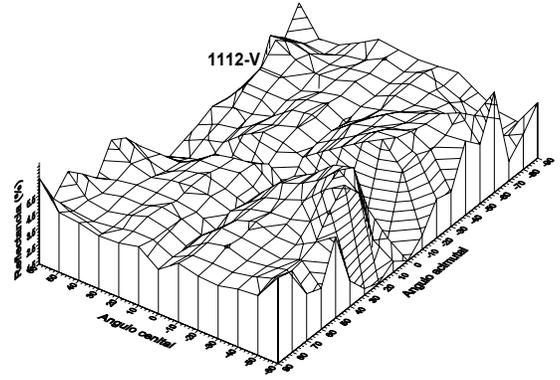
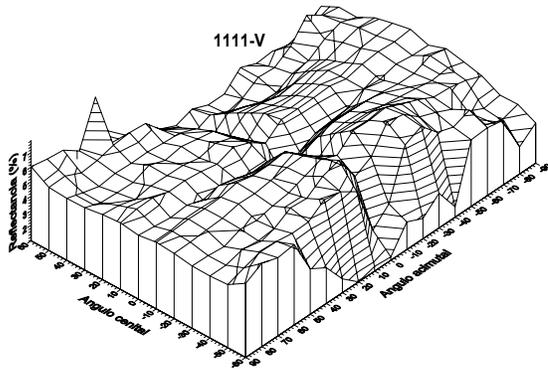
0021-R



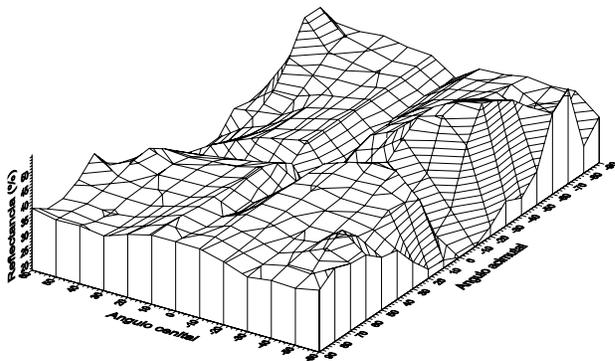
0022-R



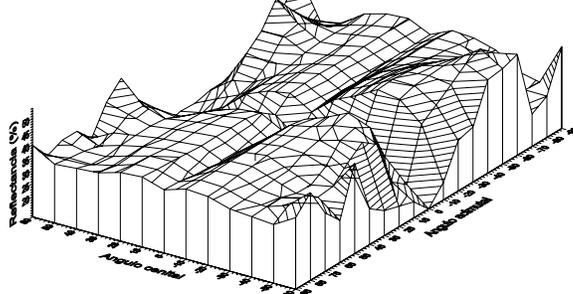




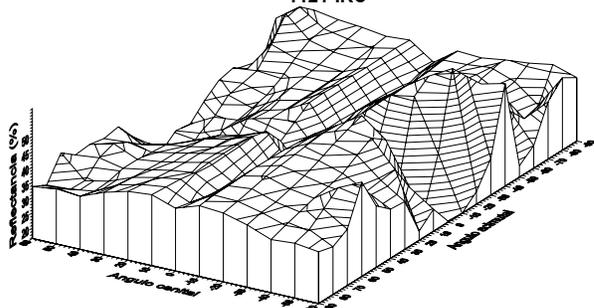
1111-IRC



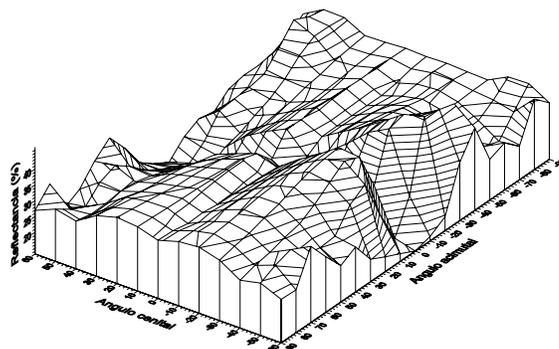
1112-IRC



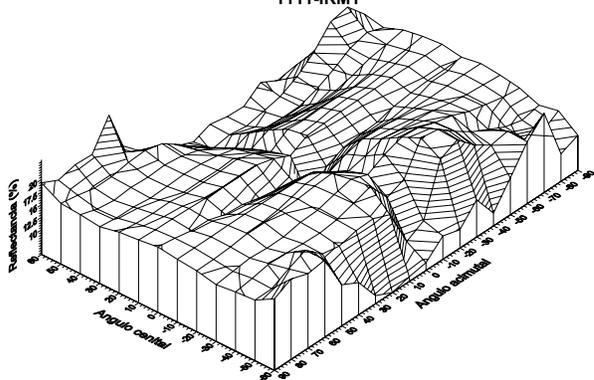
1121-IRC



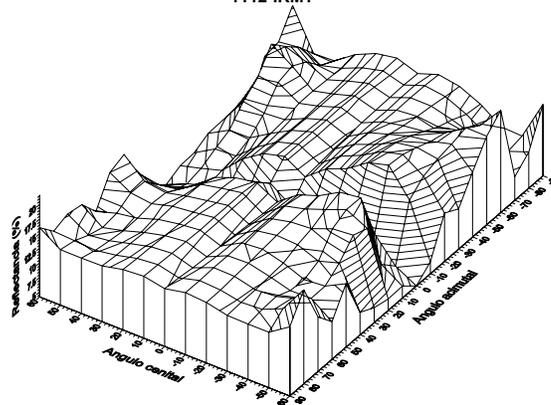
1122-IRC



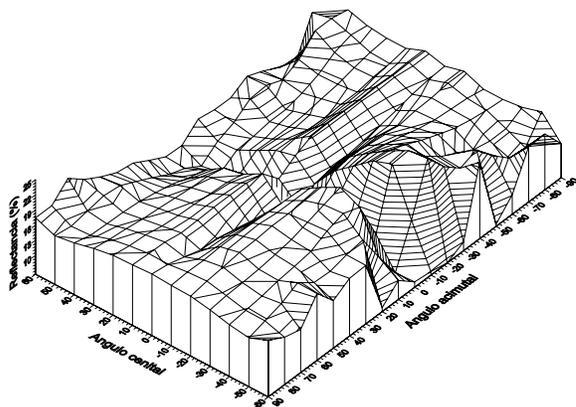
1111-IRM1



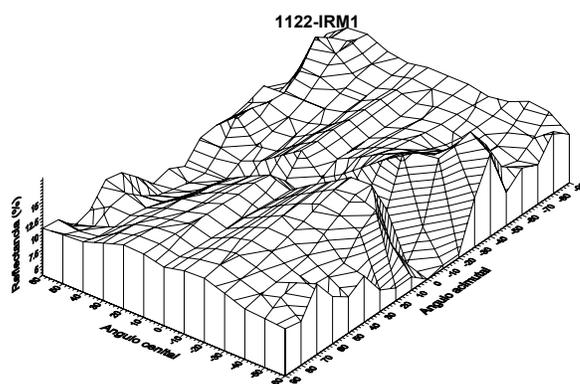
1112-IRM1



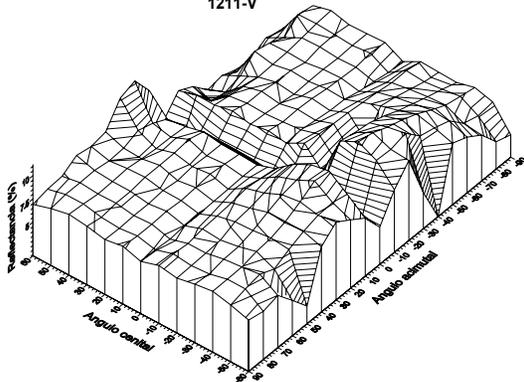
1121-IRM1



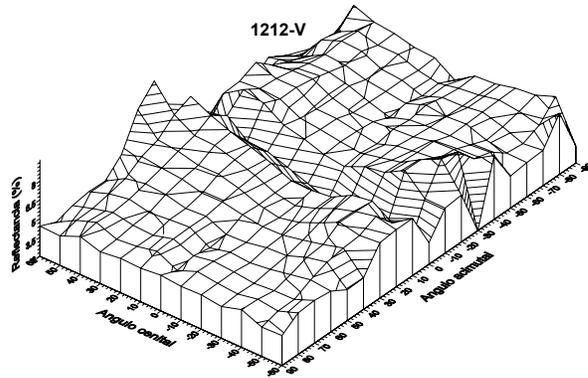
1122-IRM1



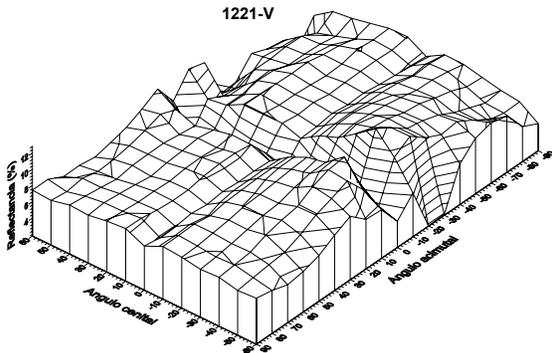
1211-V



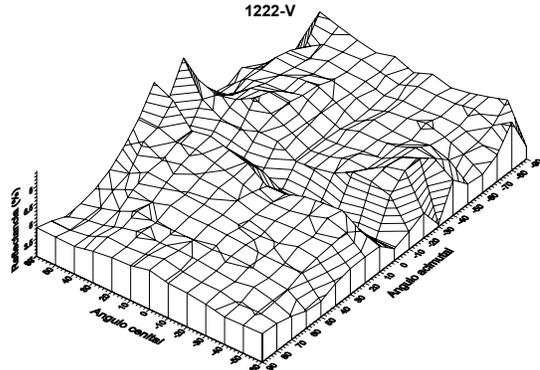
1212-V



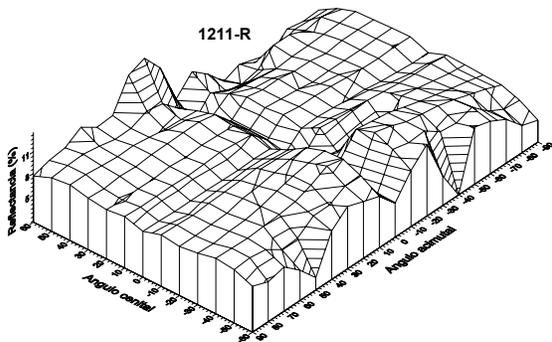
1221-V



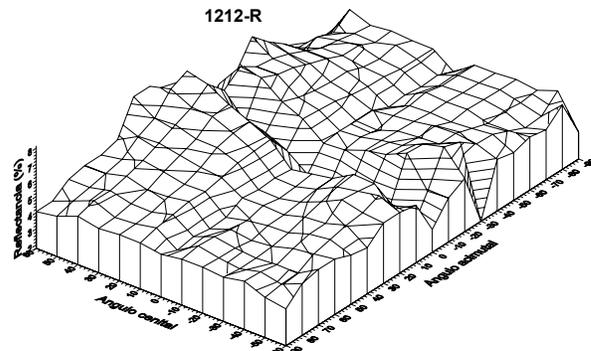
1222-V



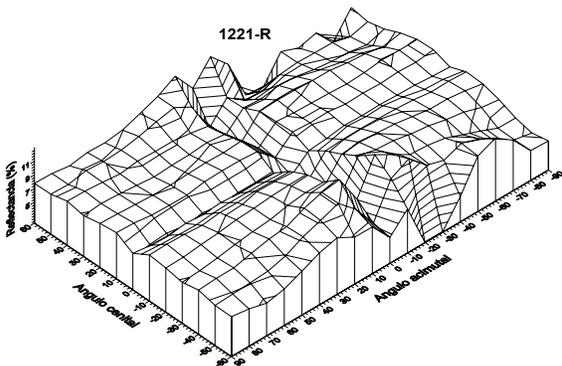
1211-R



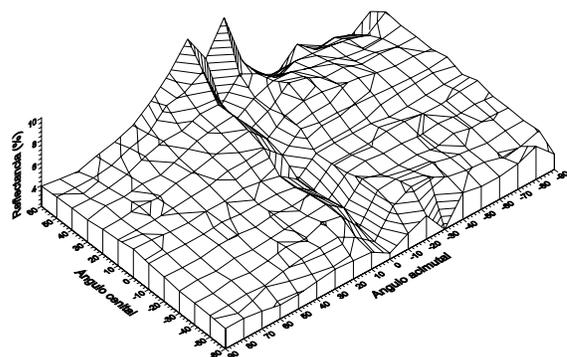
1212-R

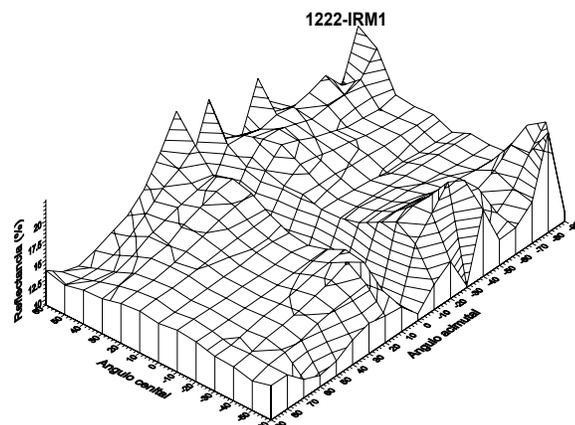
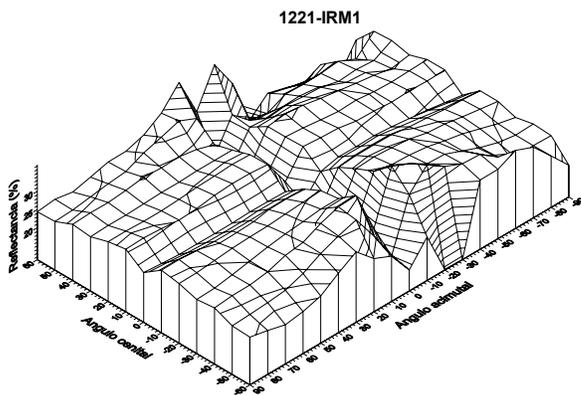
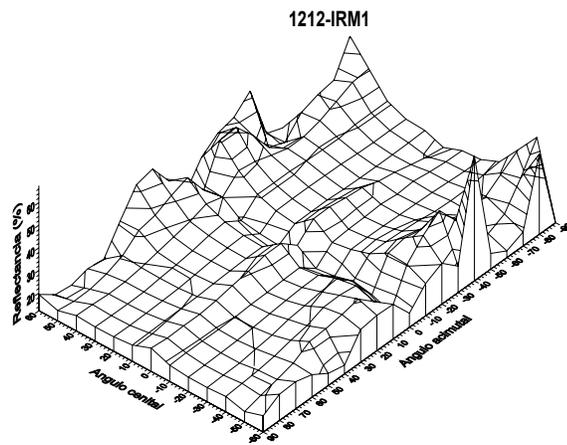
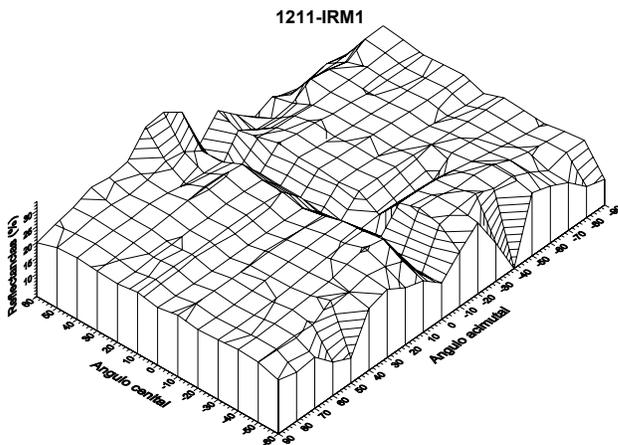
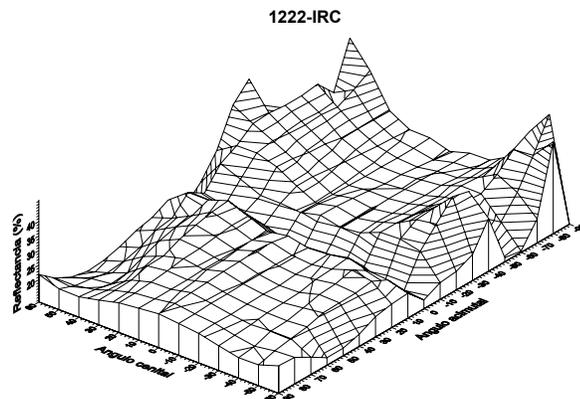
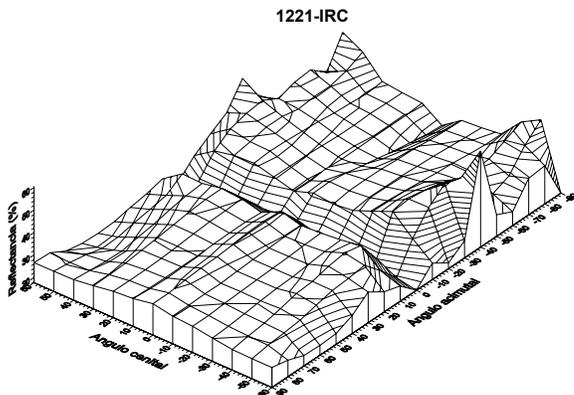
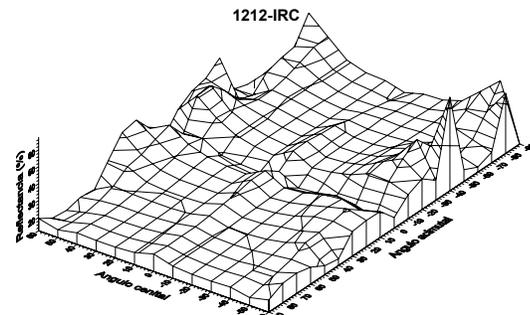
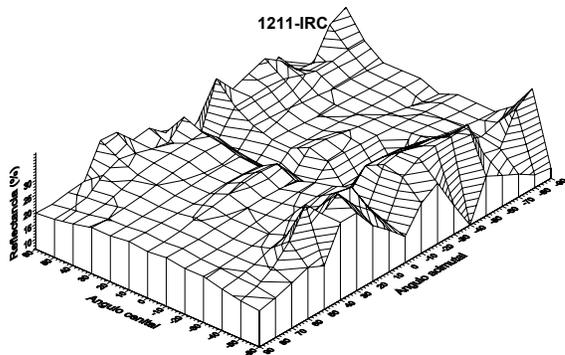


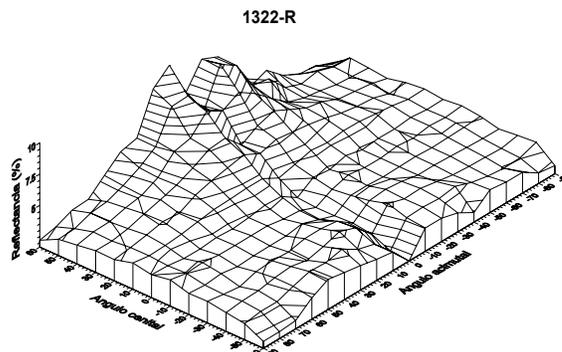
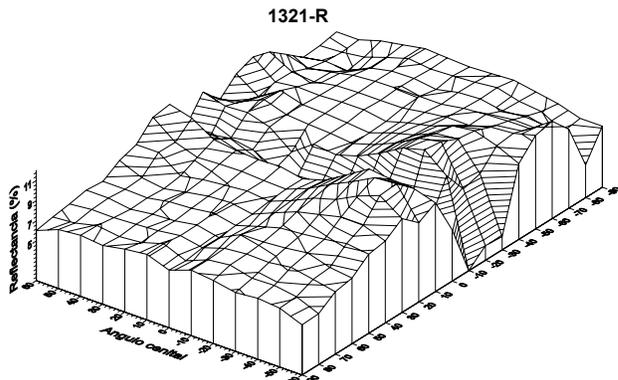
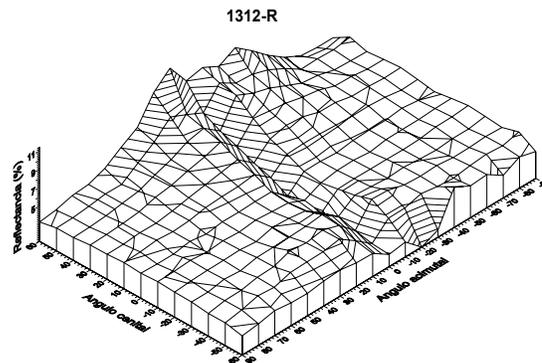
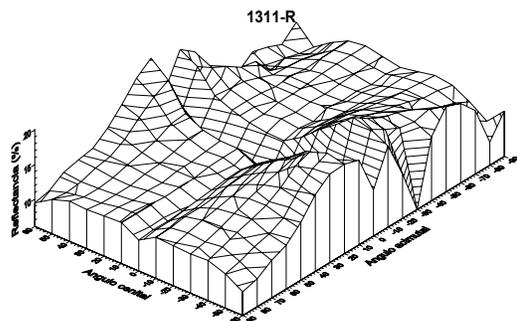
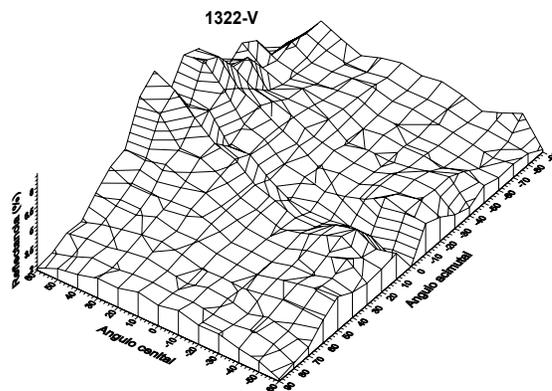
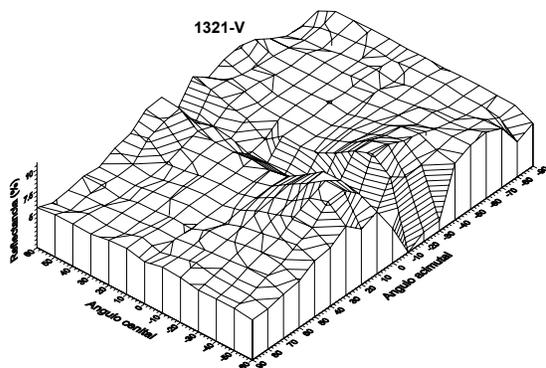
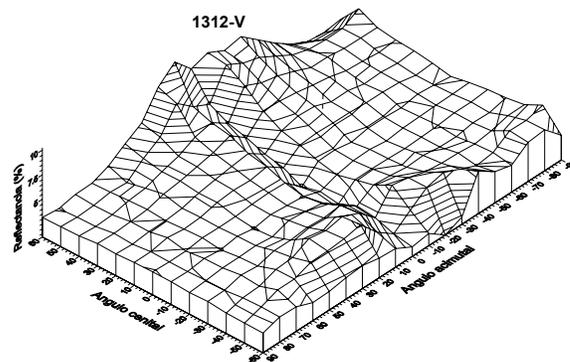
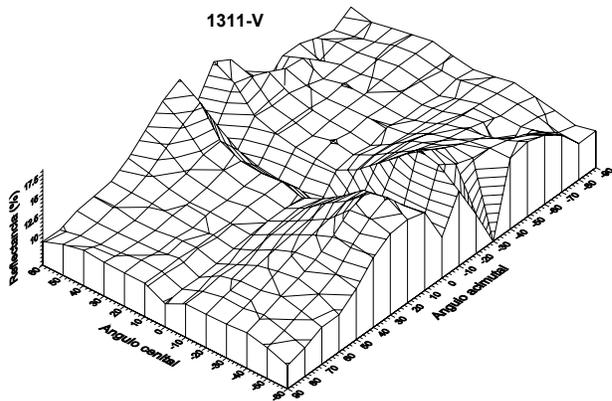
1221-R



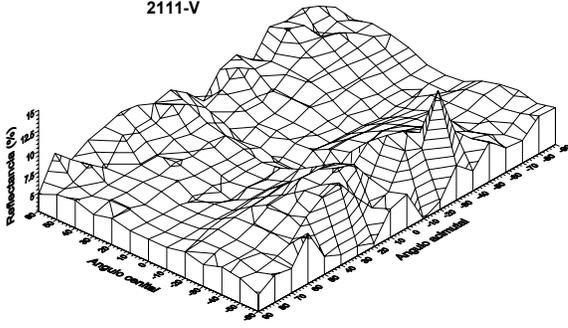
1222-R



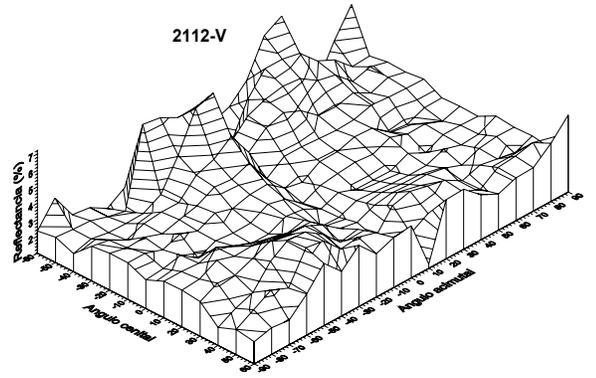




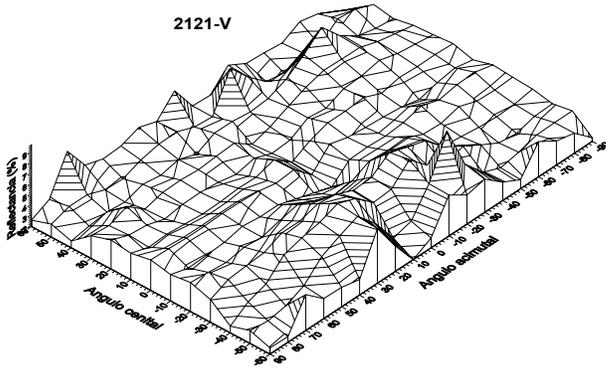
2111-V



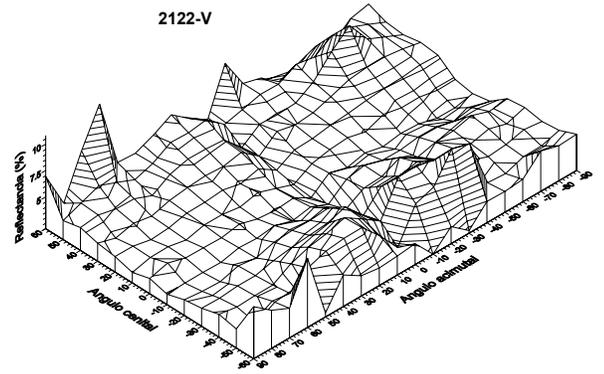
2112-V



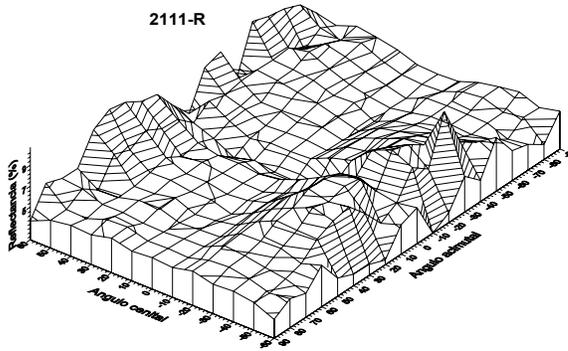
2121-V



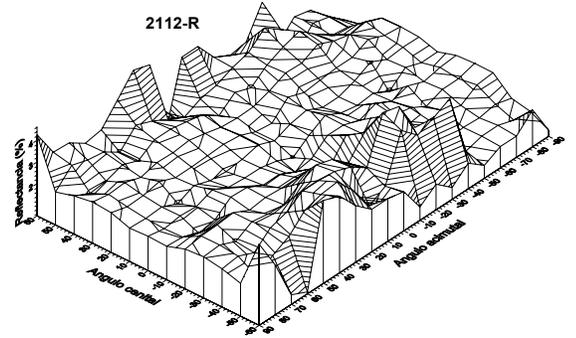
2122-V



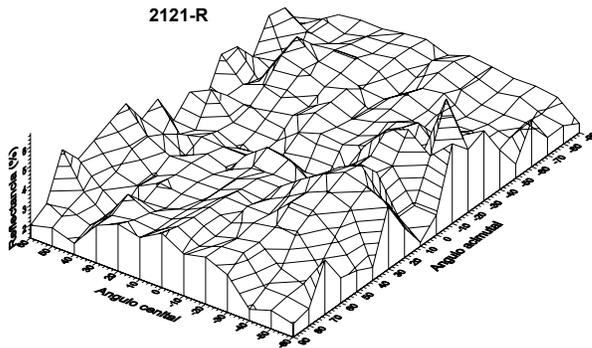
2111-R



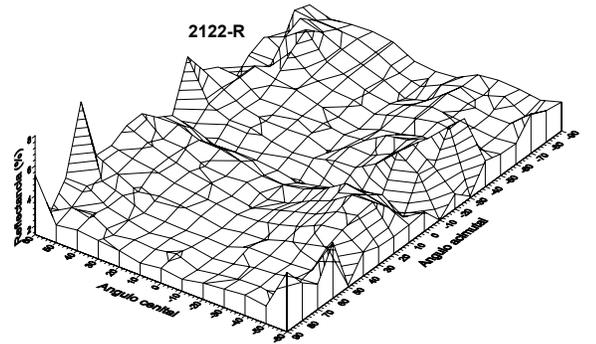
2112-R



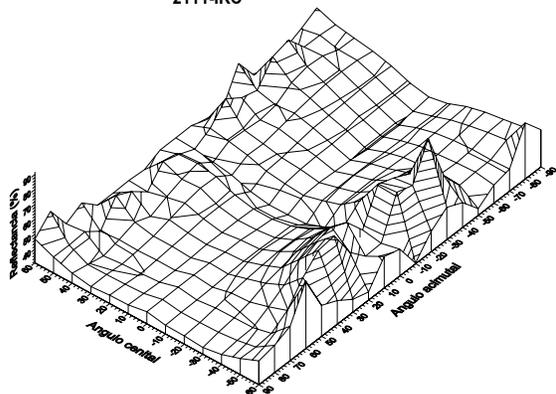
2121-R



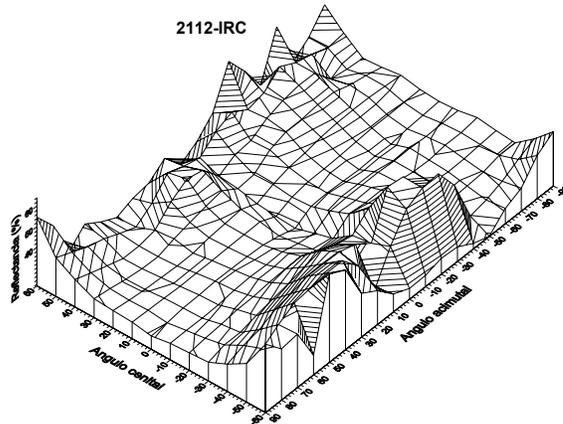
2122-R



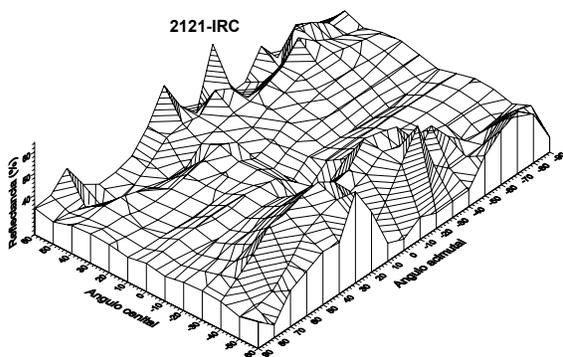
2111-IRC



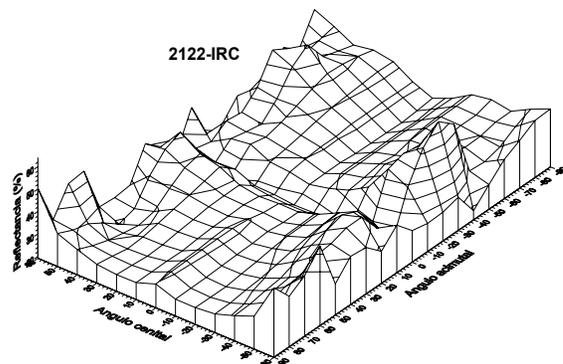
2112-IRC



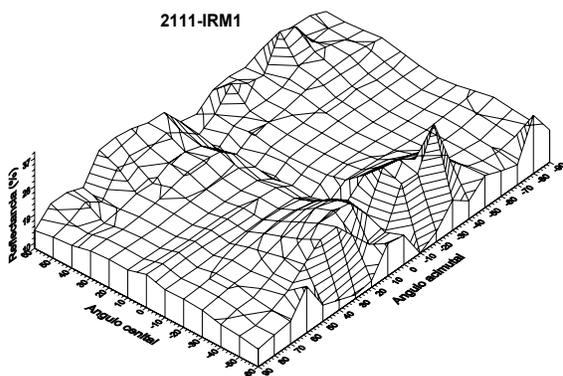
2121-IRC



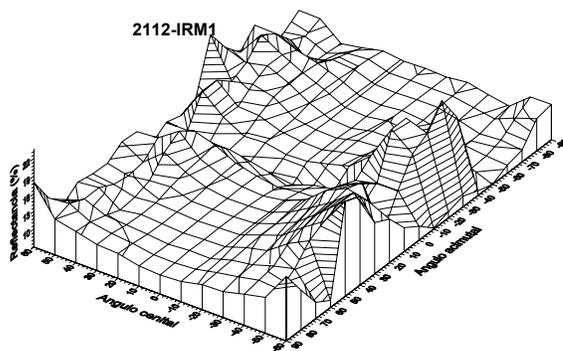
2122-IRC



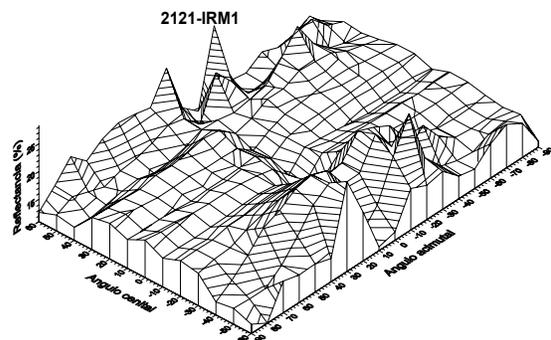
2111-IRM1



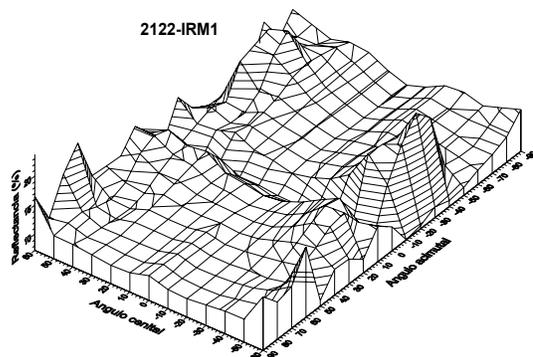
2112-IRM1

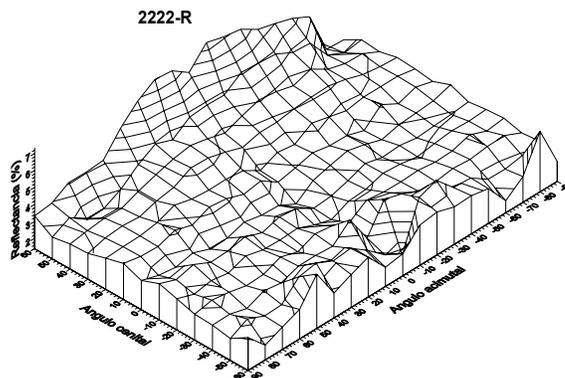
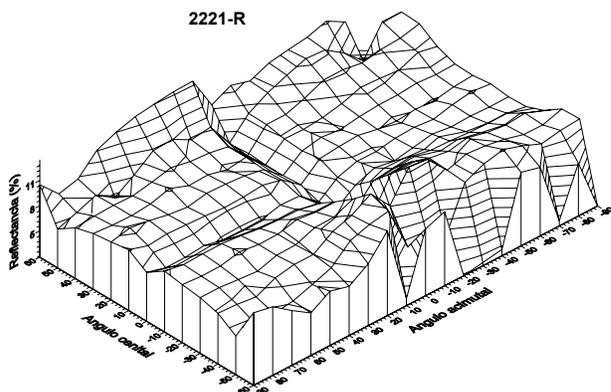
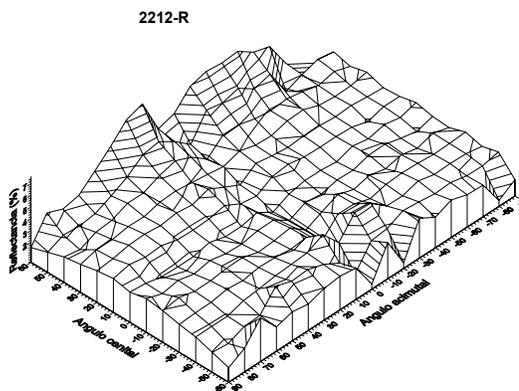
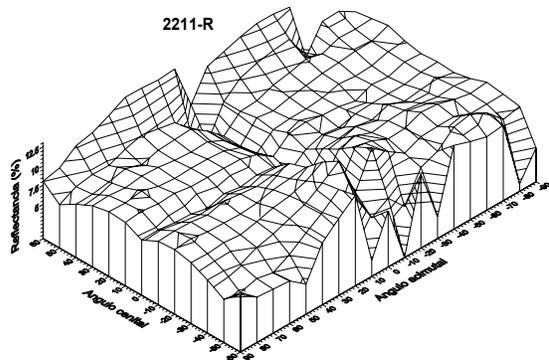
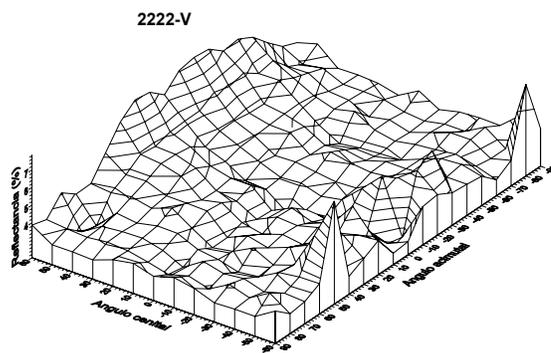
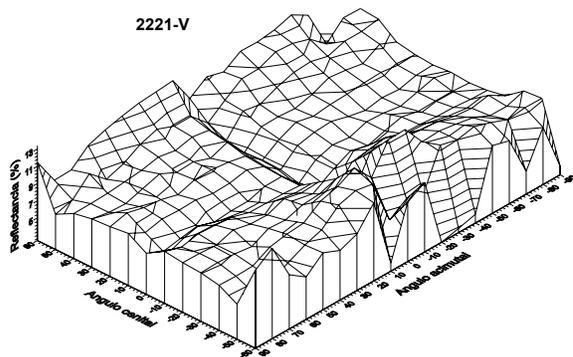
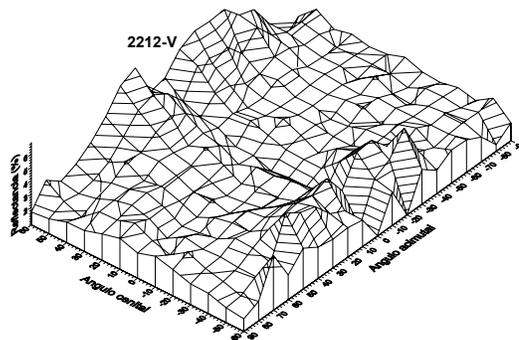
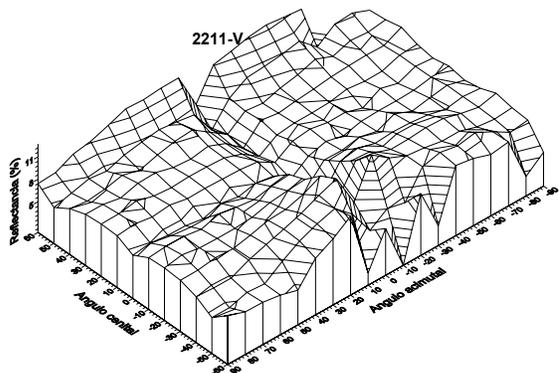


2121-IRM1

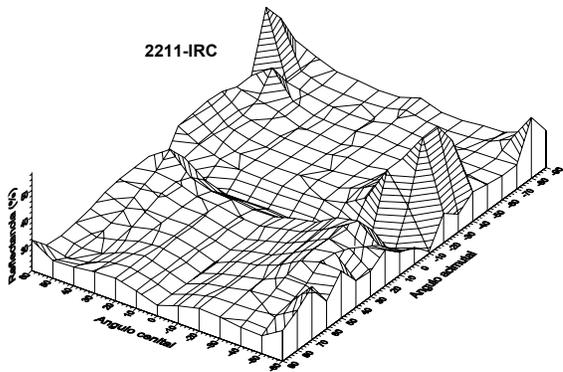


2122-IRM1

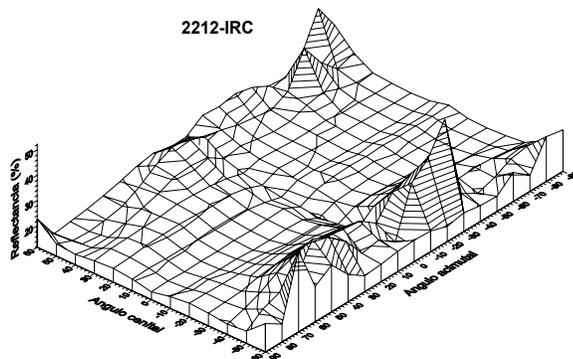




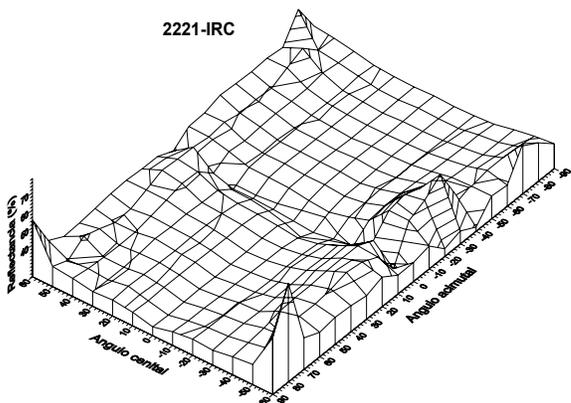
2211-IRC



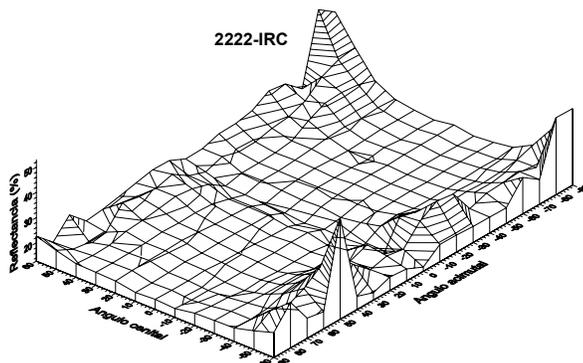
2212-IRC



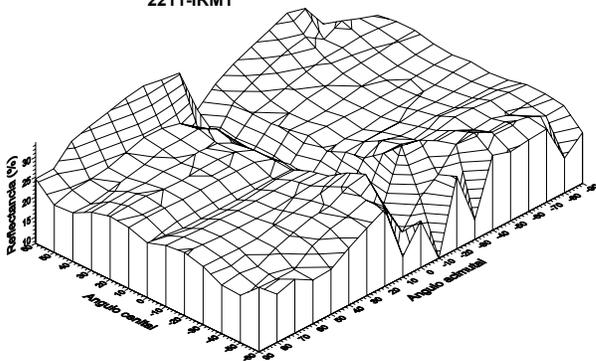
2221-IRC



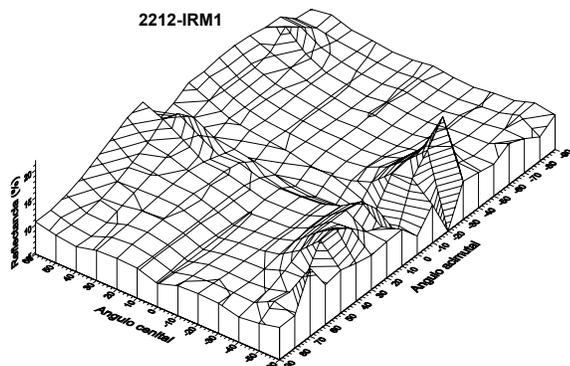
2222-IRC



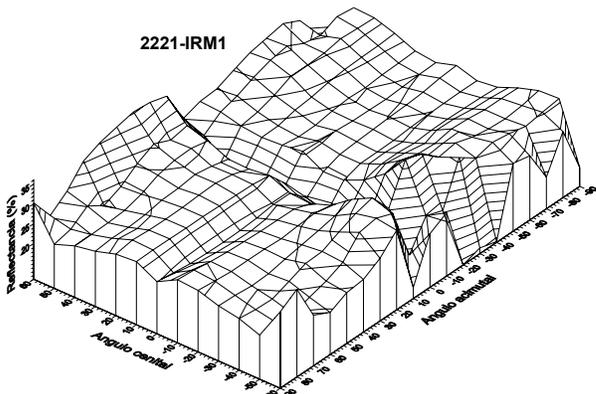
2211-IRM1



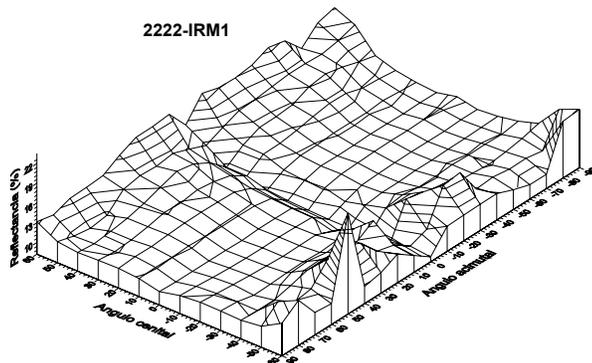
2212-IRM1



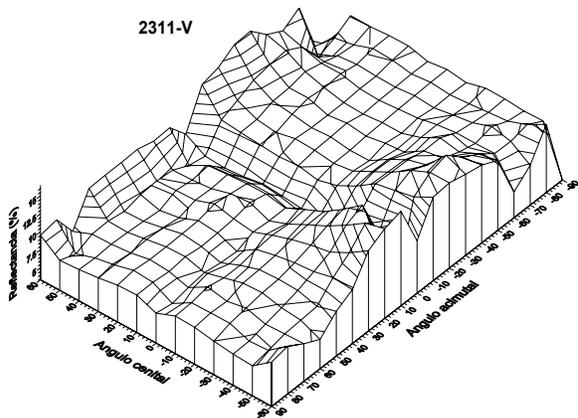
2221-IRM1



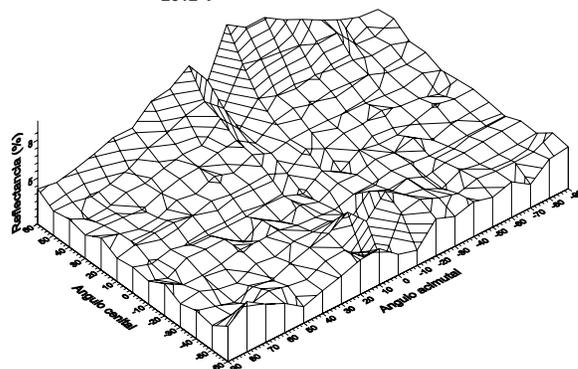
2222-IRM1



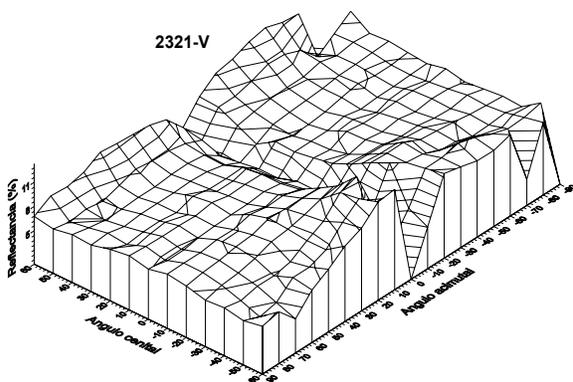
2311-V



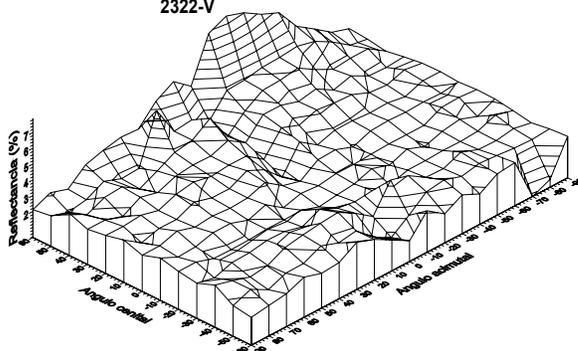
2312-V



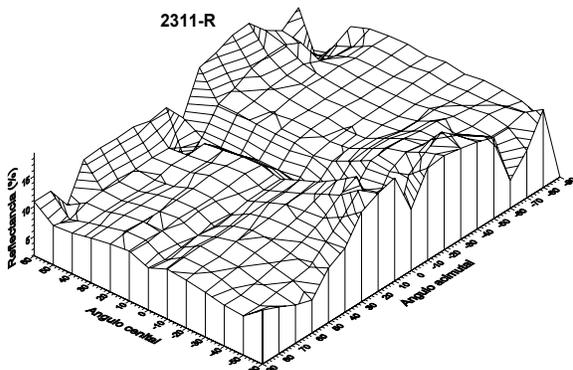
2321-V



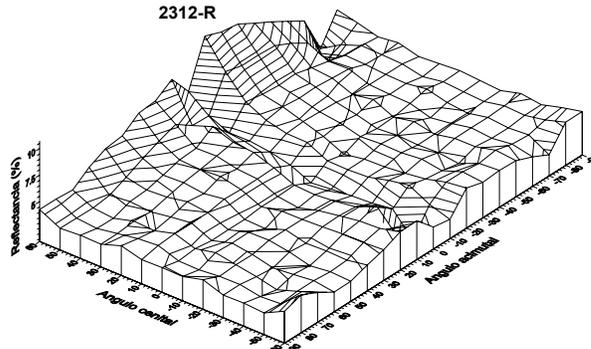
2322-V



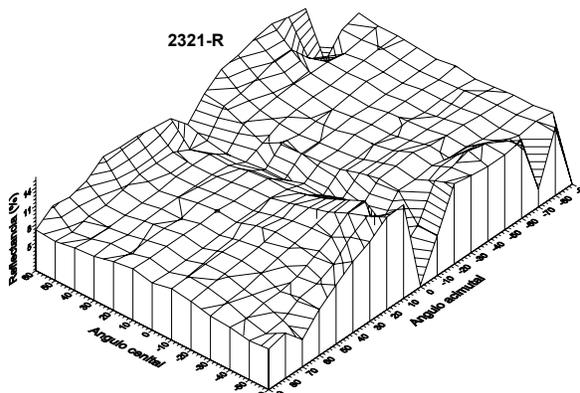
2311-R



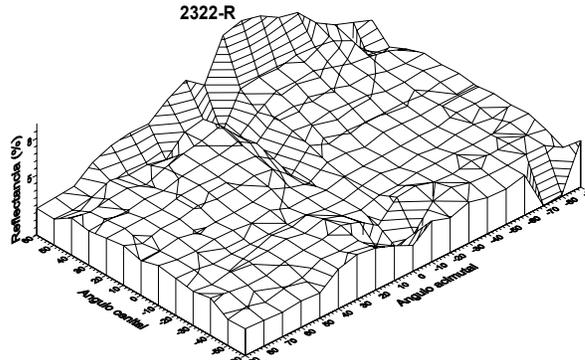
2312-R

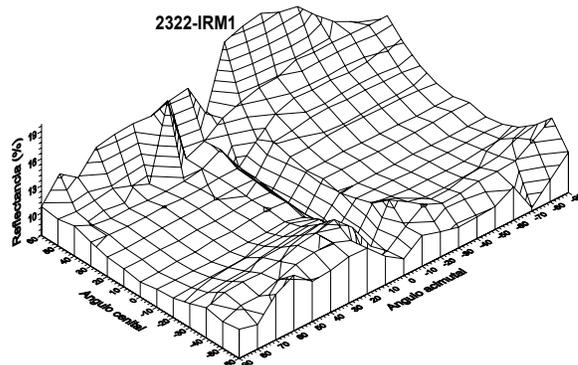
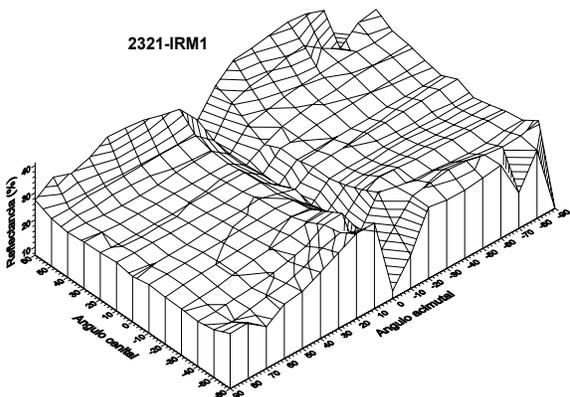
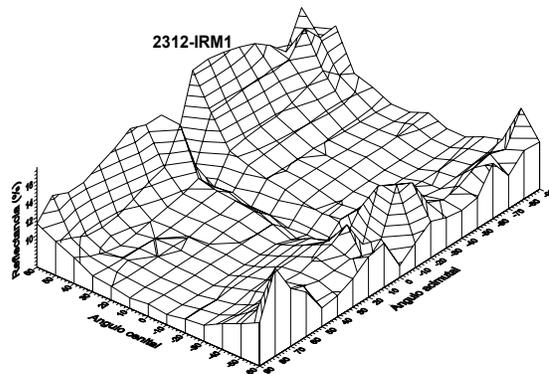
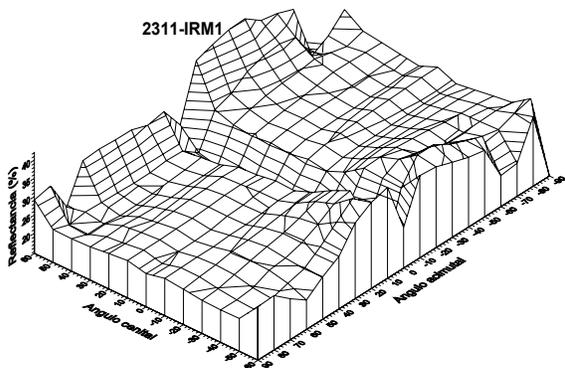
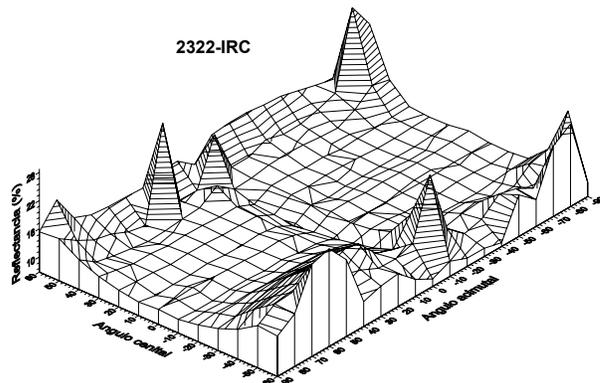
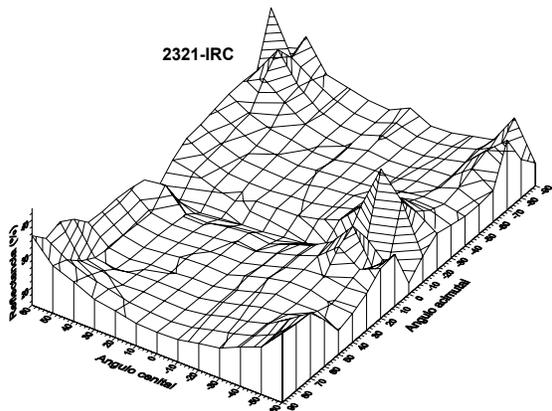
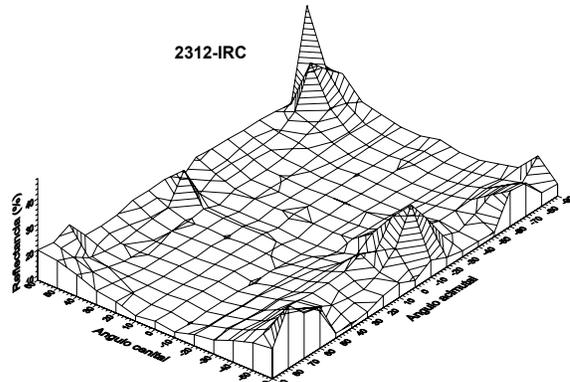
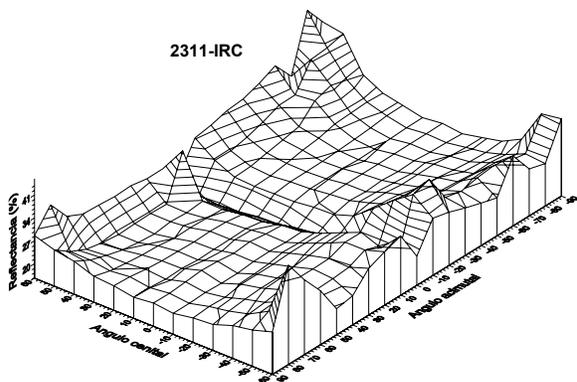


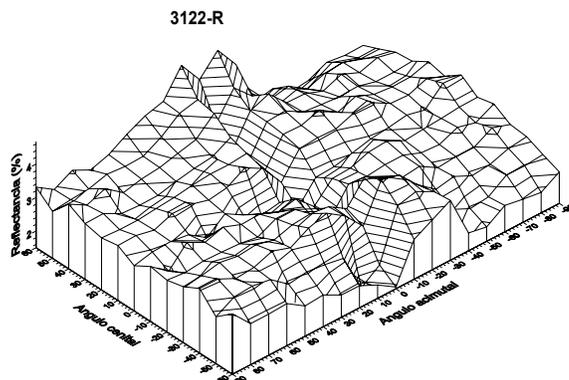
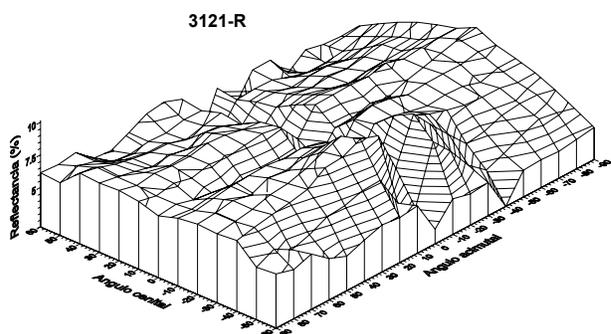
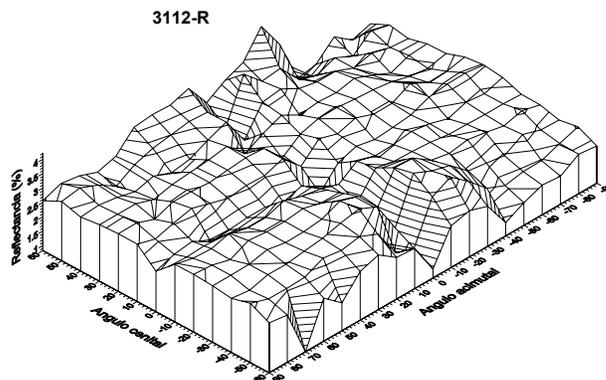
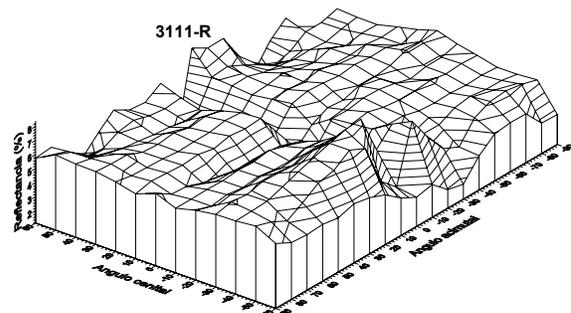
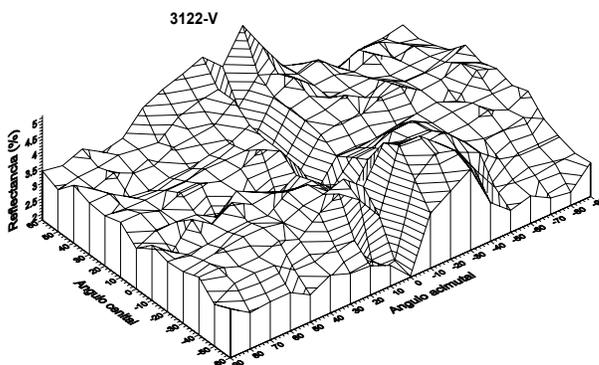
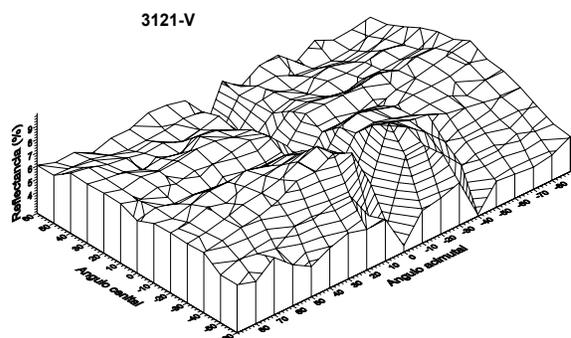
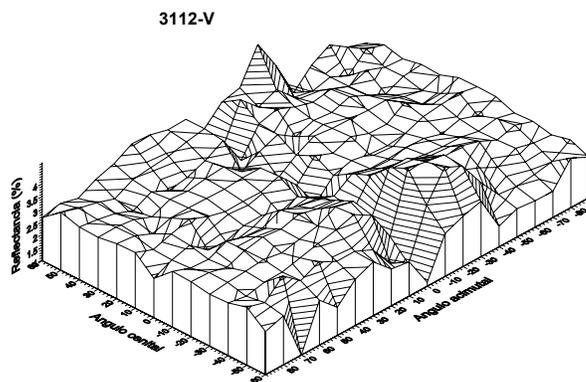
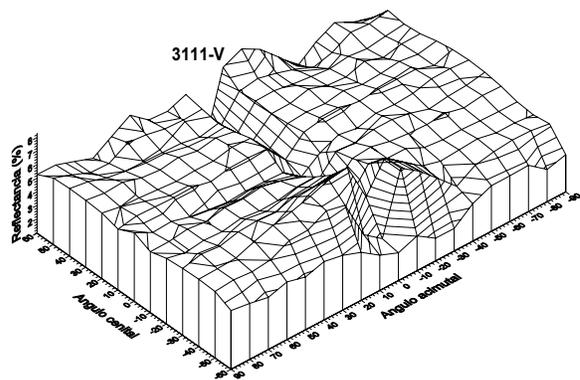
2321-R

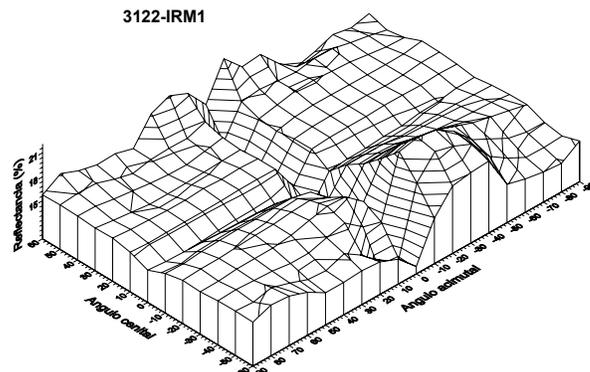
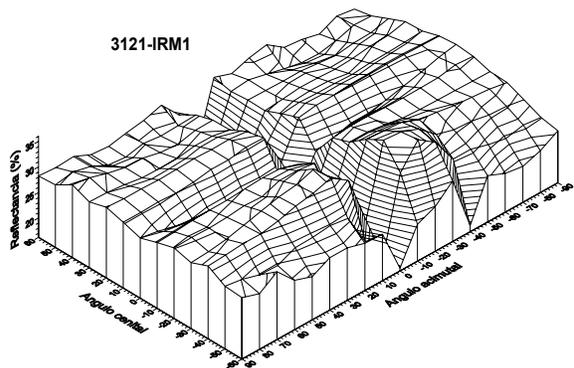
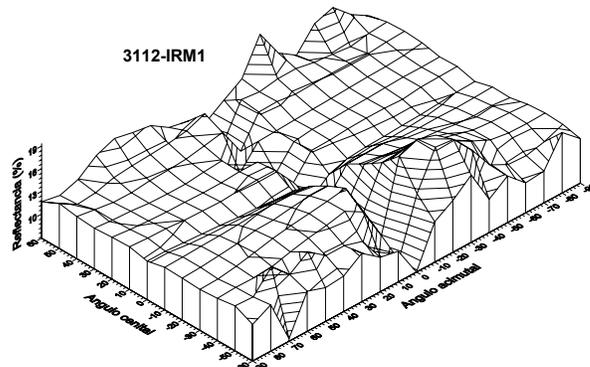
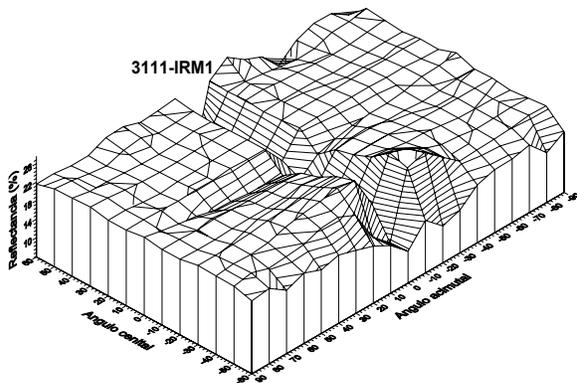
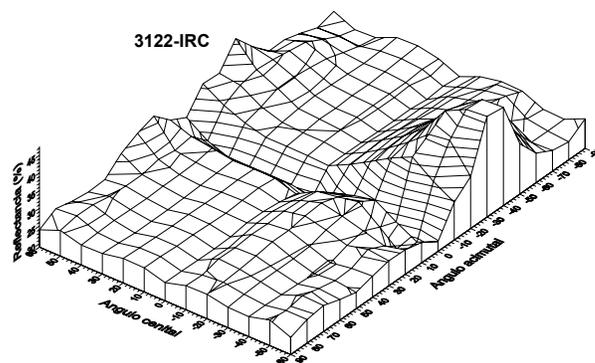
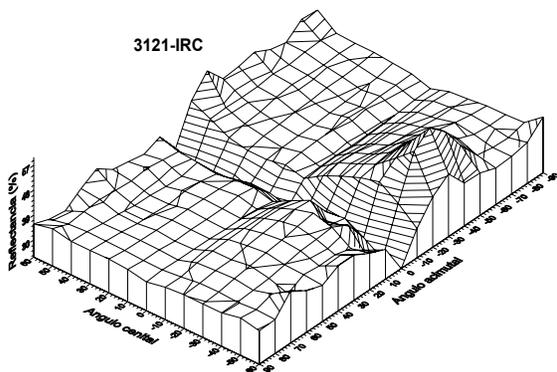
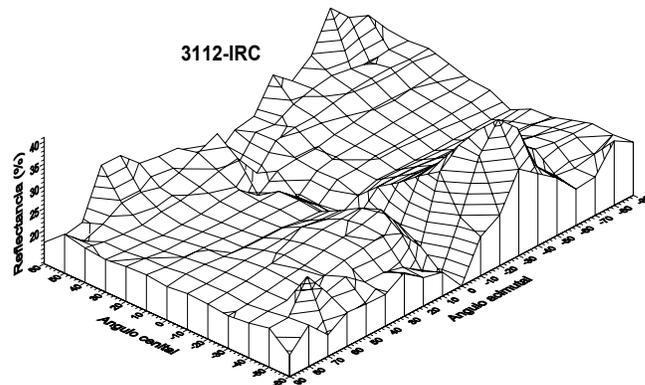
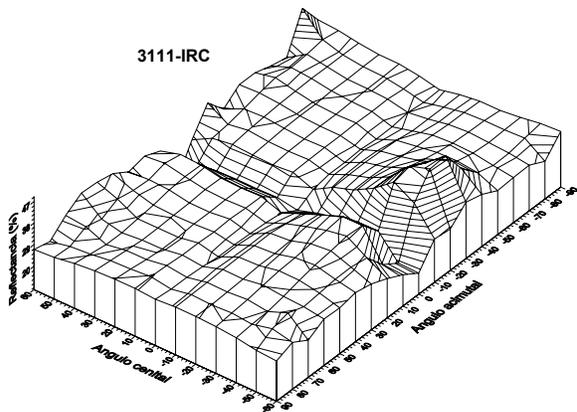


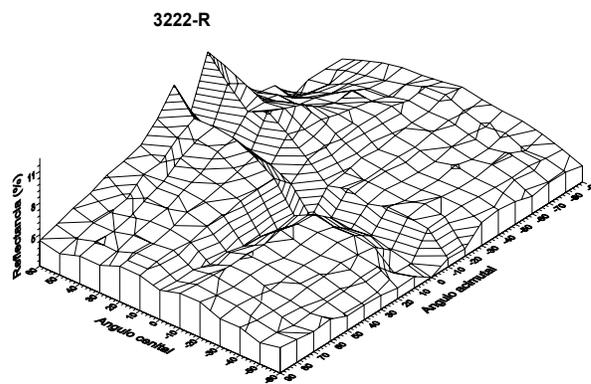
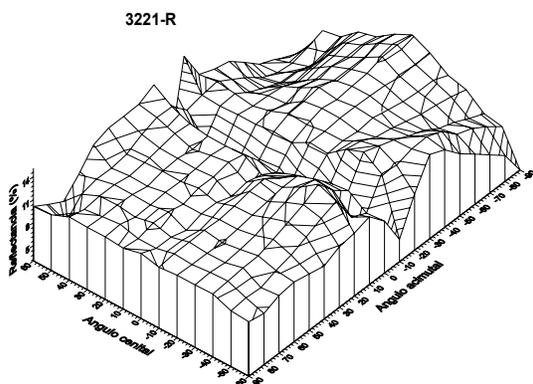
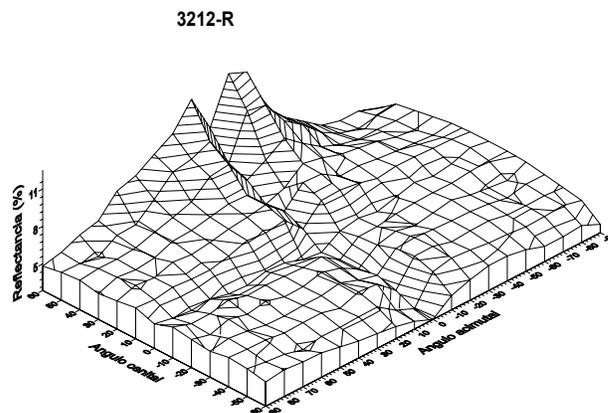
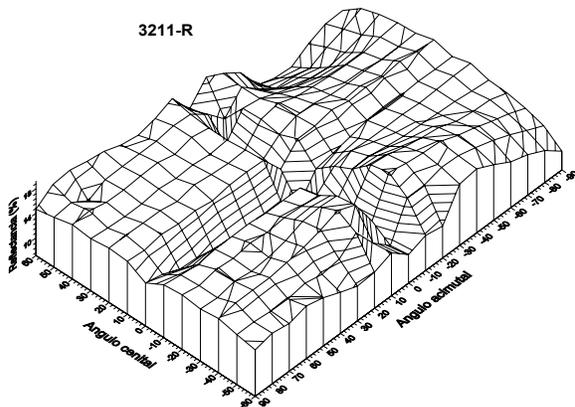
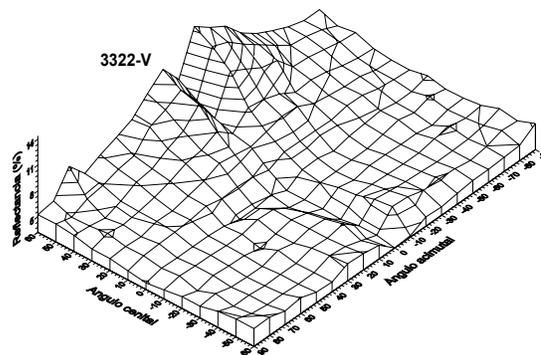
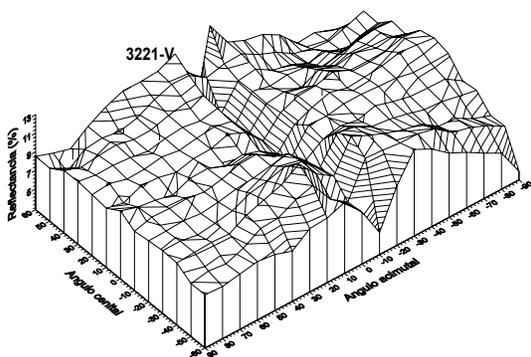
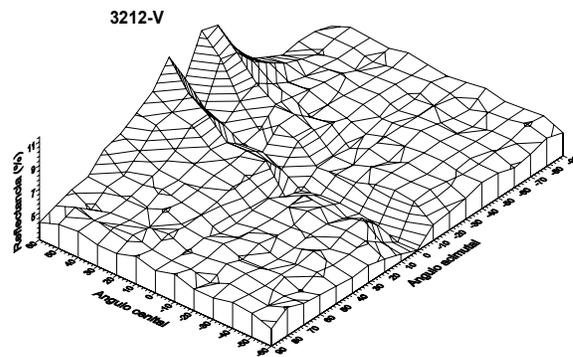
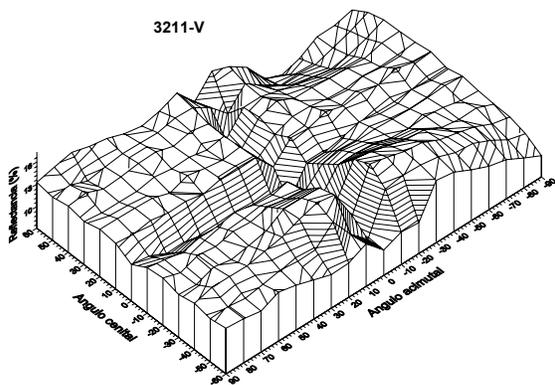
2322-R

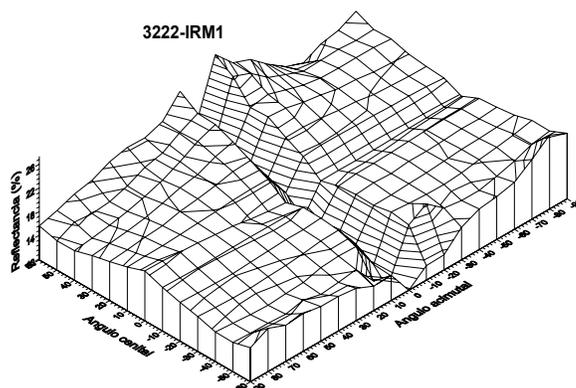
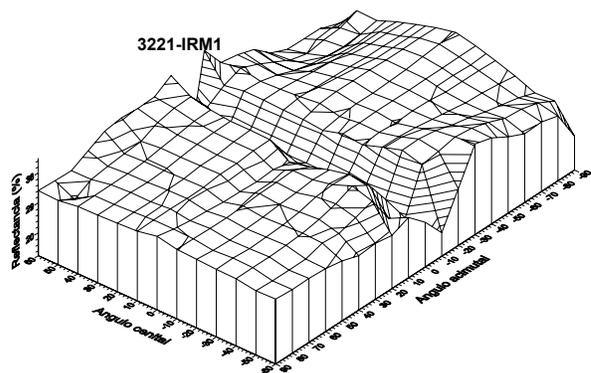
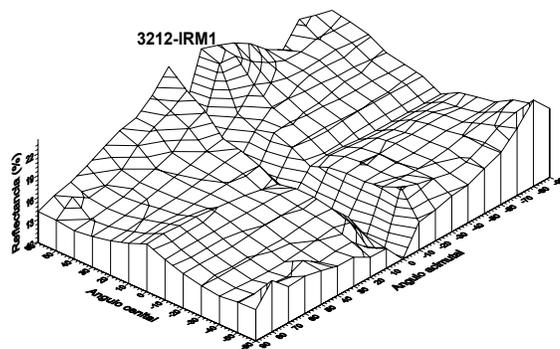
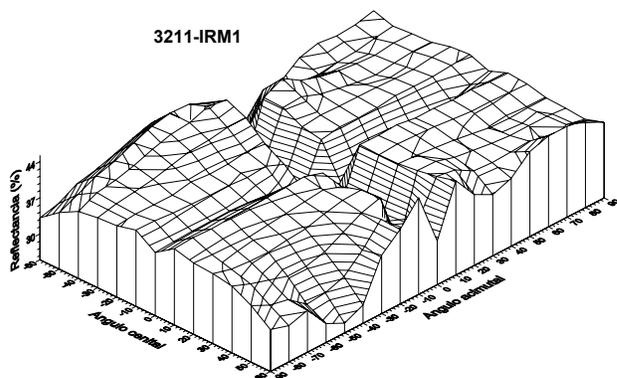
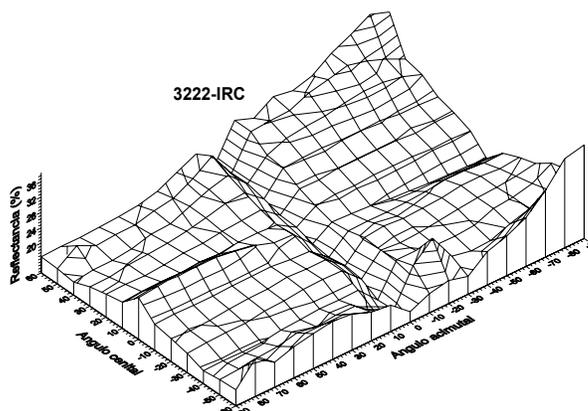
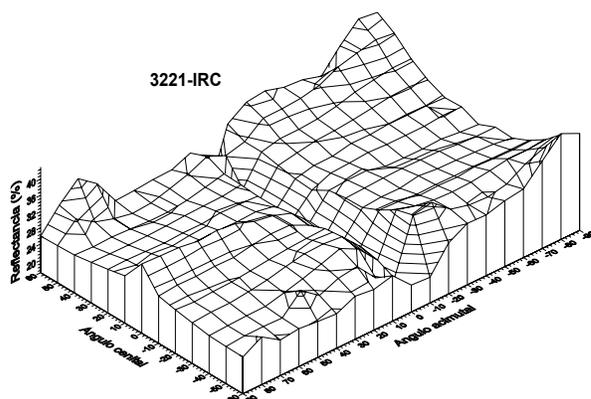
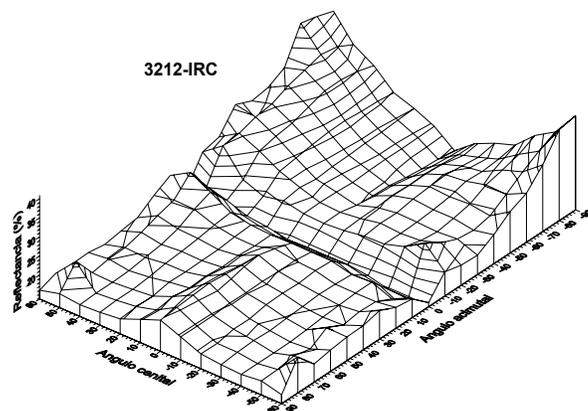
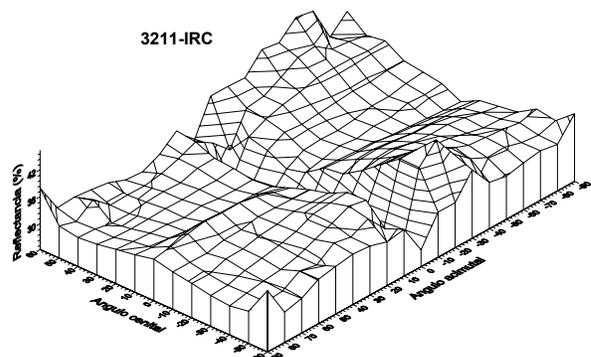


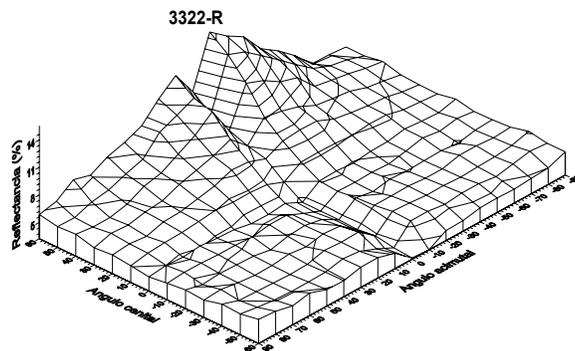
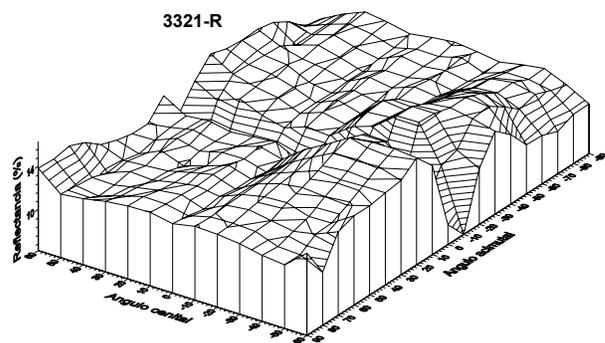
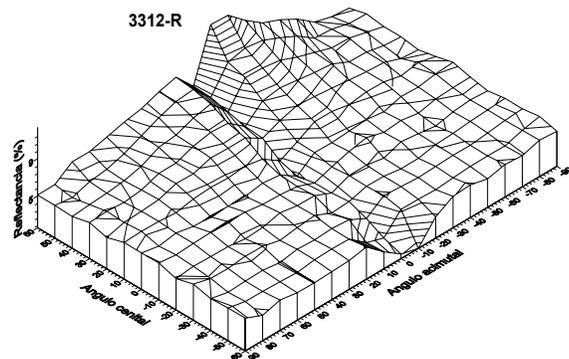
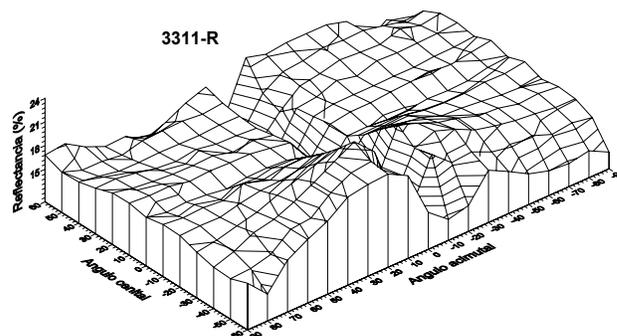
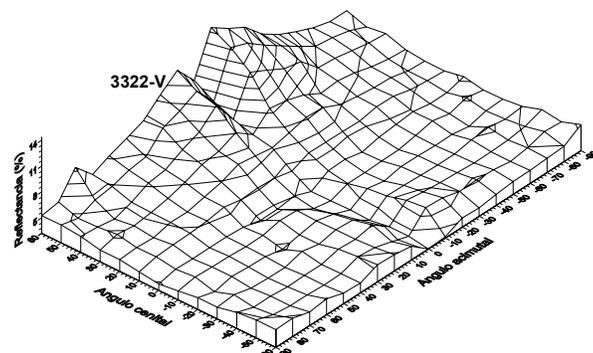
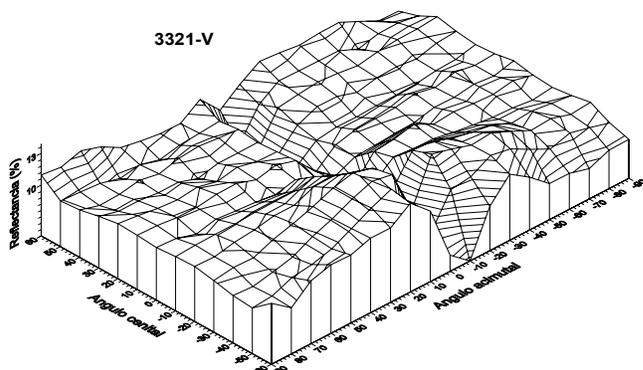
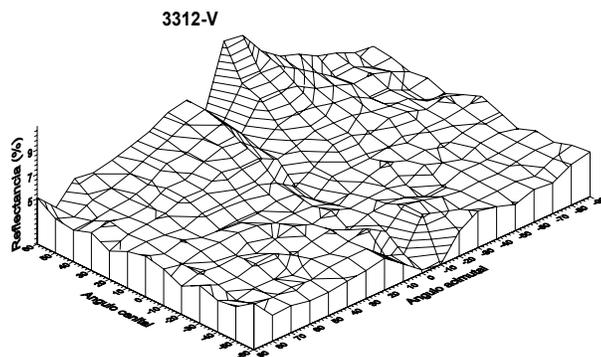
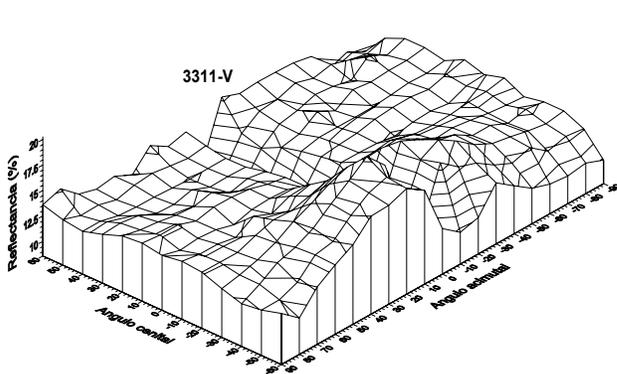


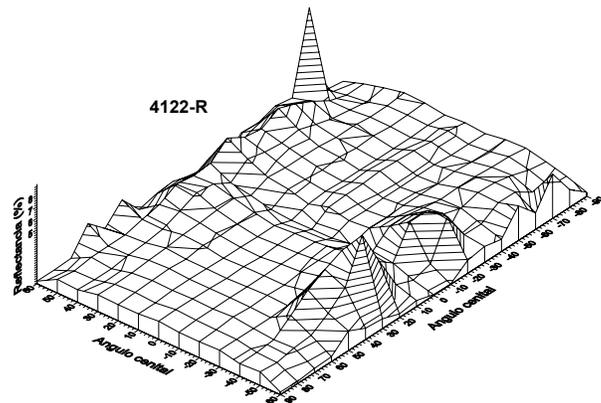
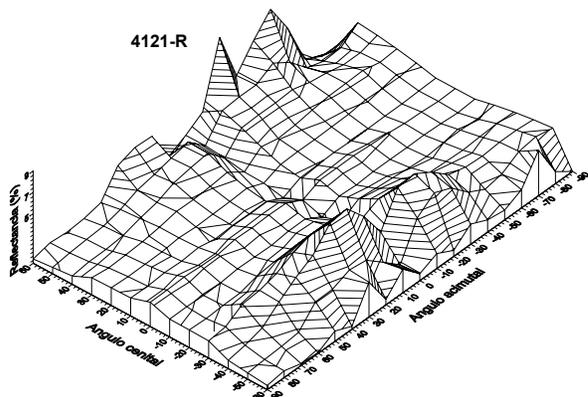
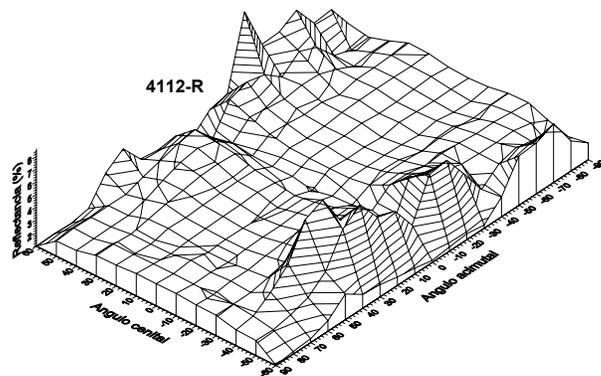
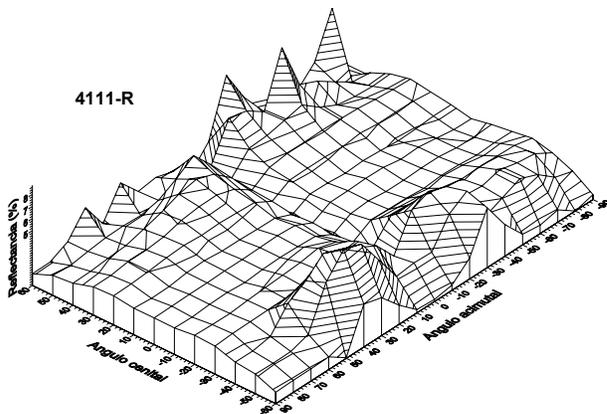
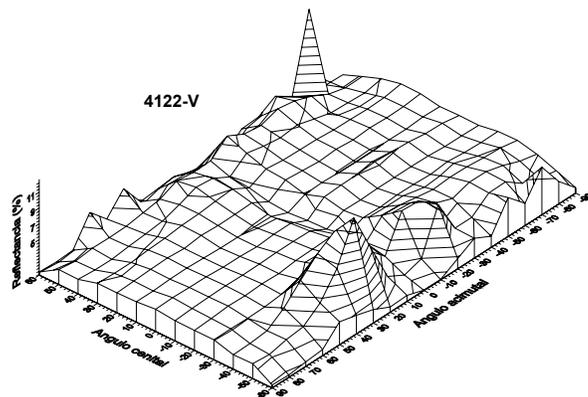
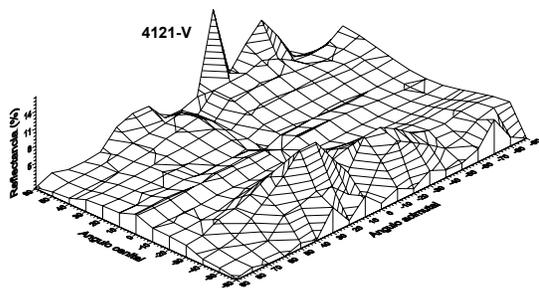
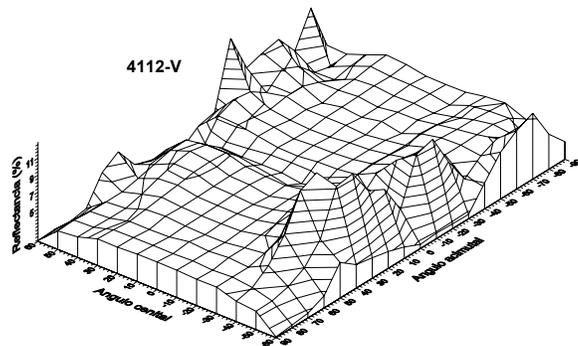
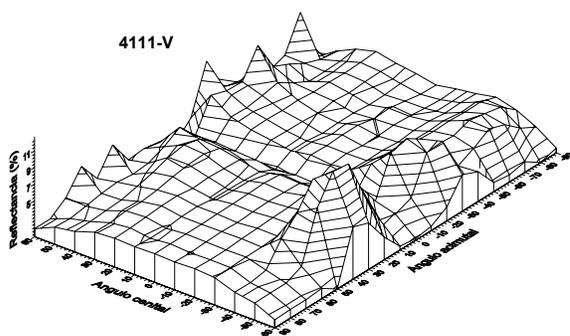


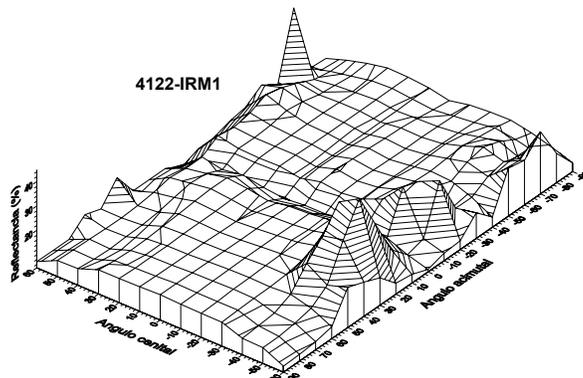
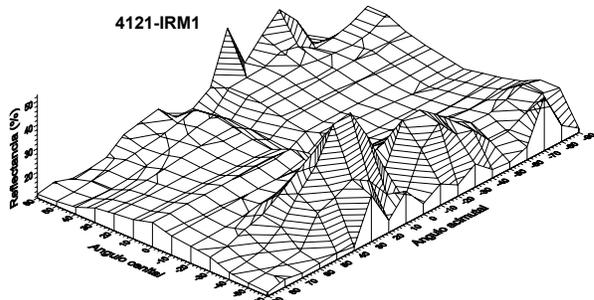
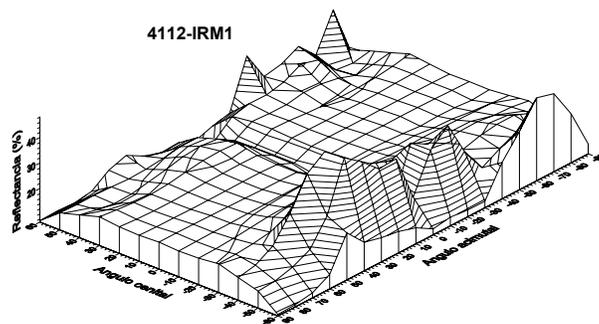
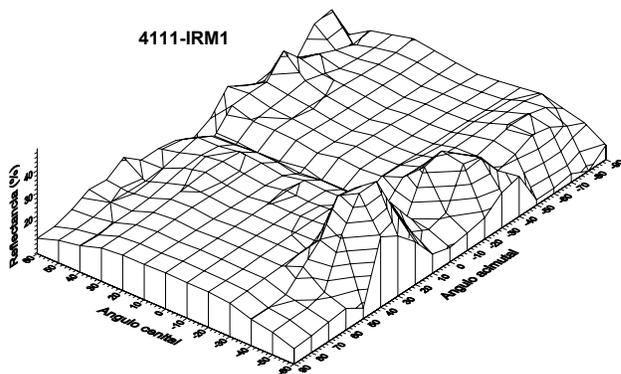
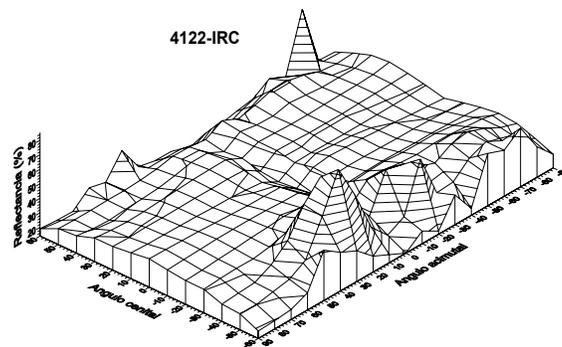
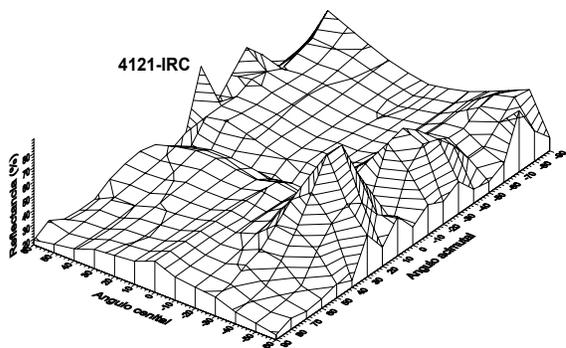
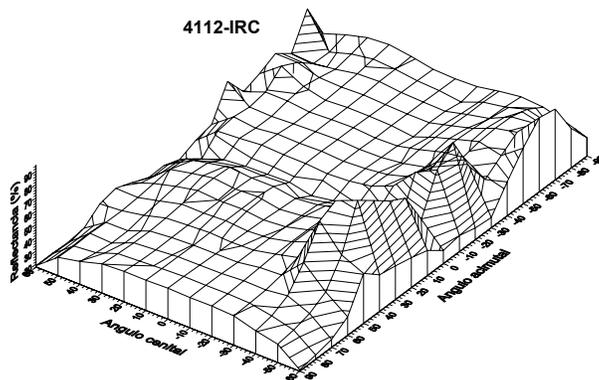
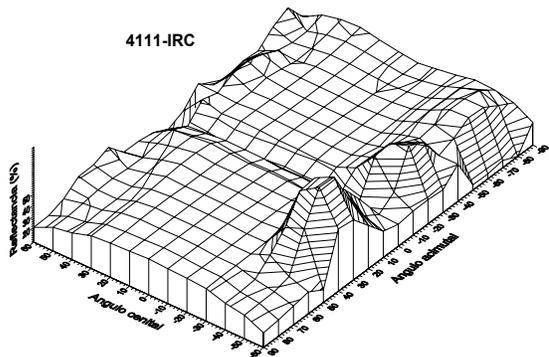


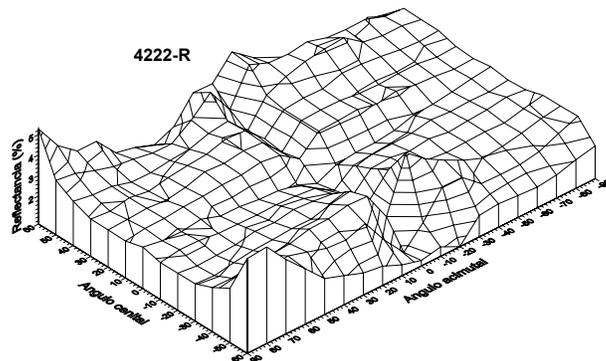
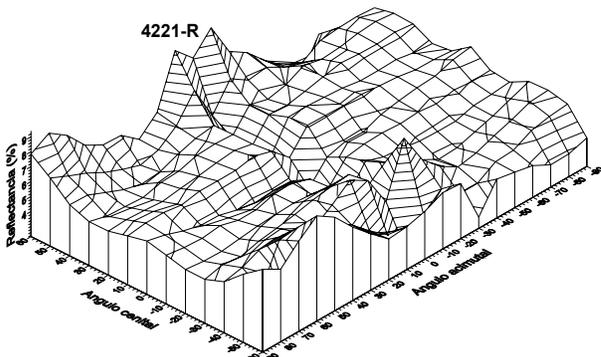
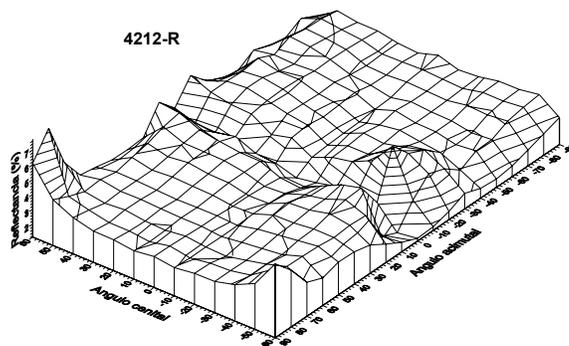
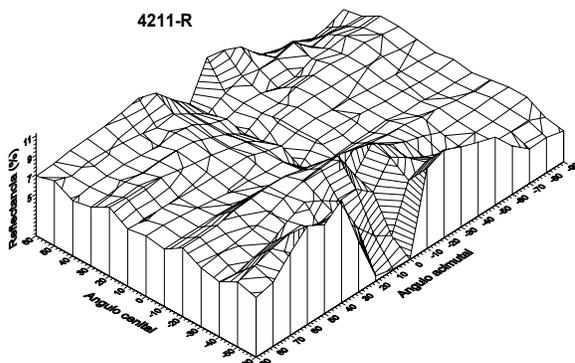
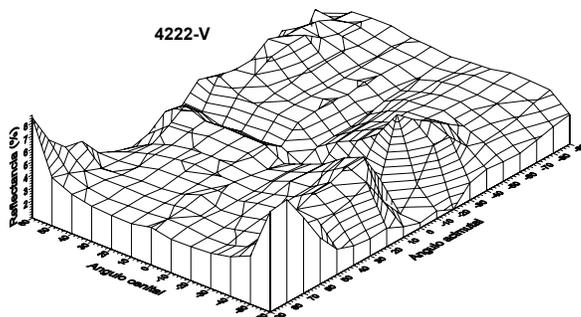
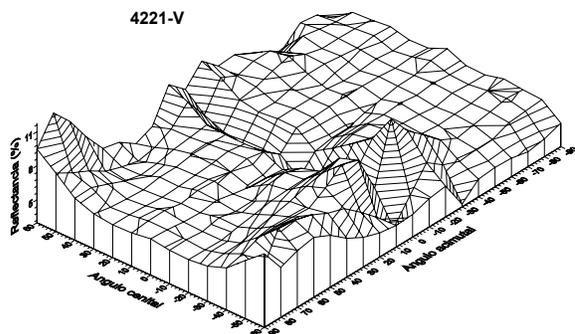
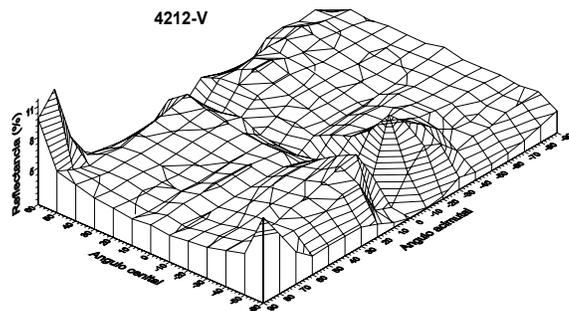
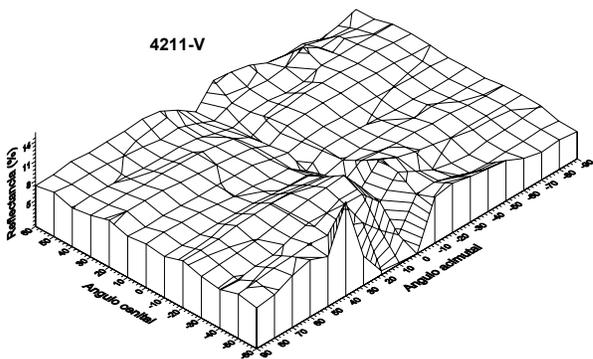


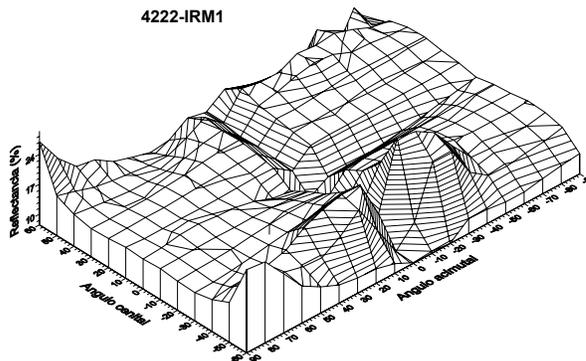
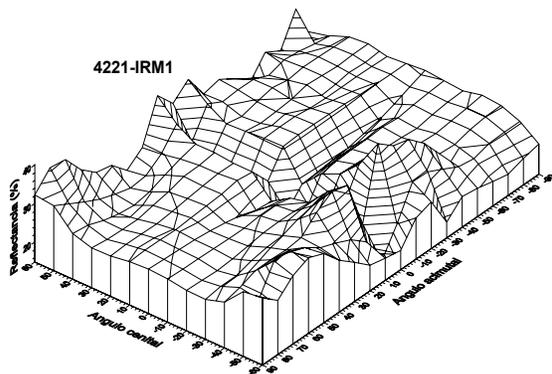
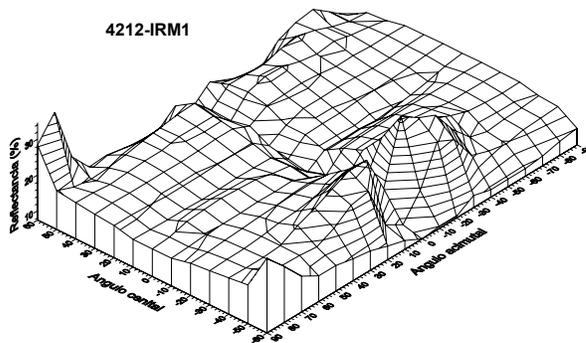
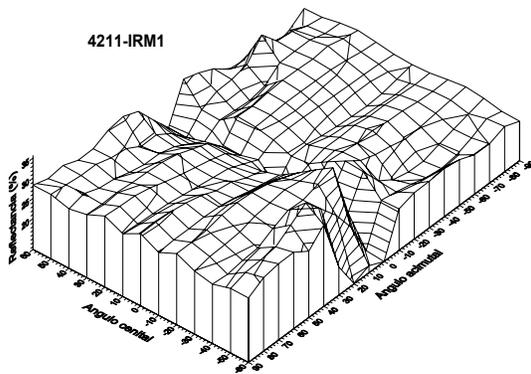
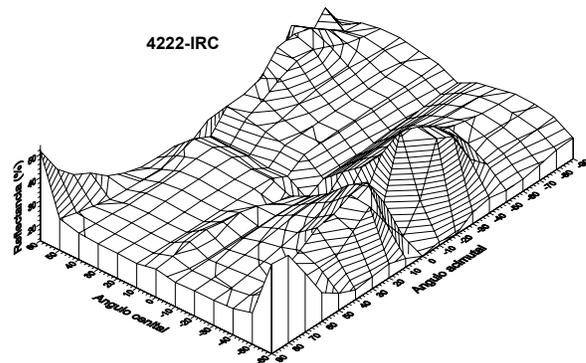
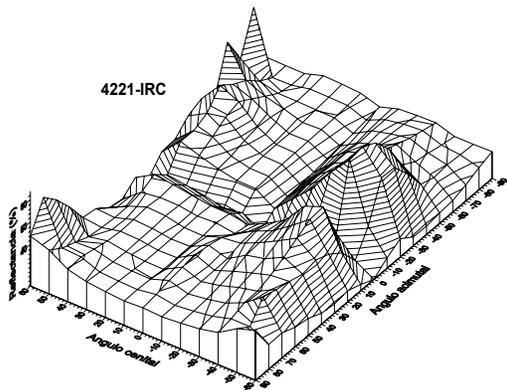
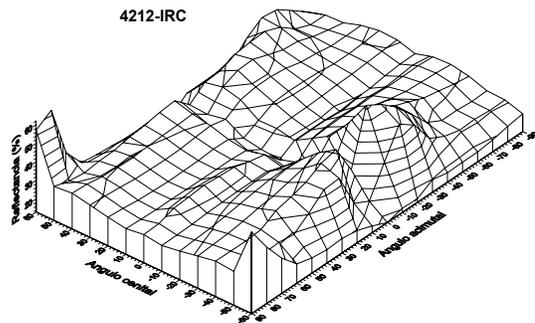
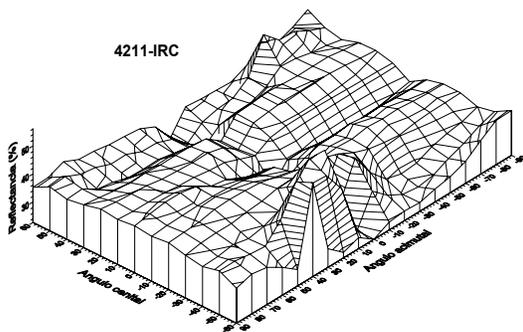




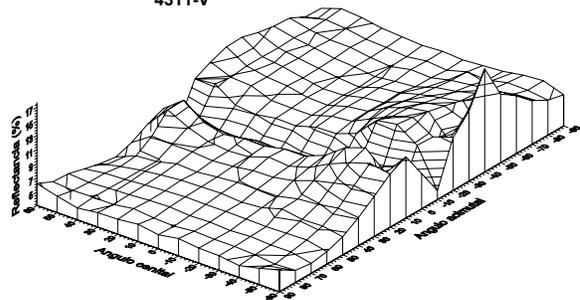




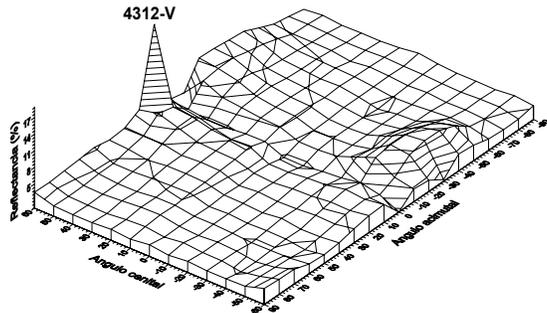




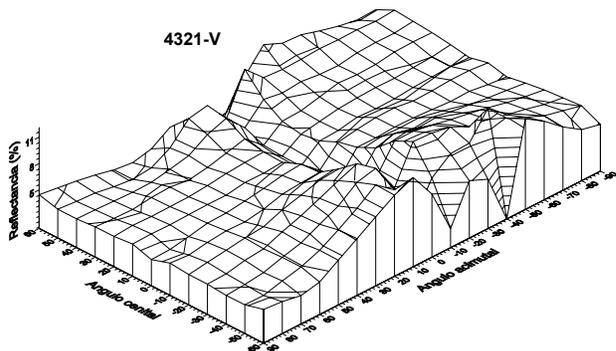
4311-V



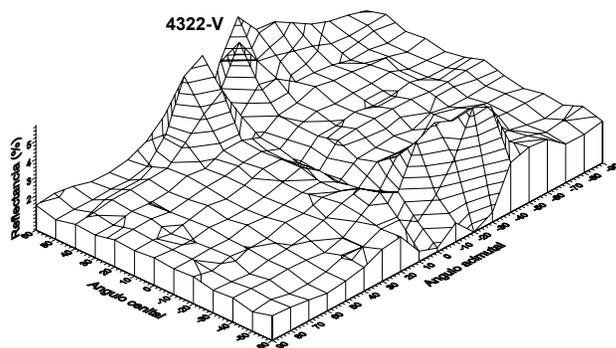
4312-V



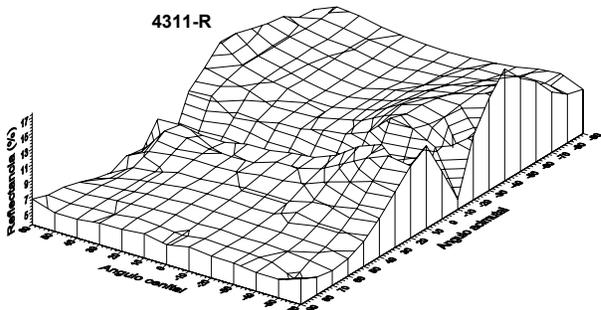
4321-V



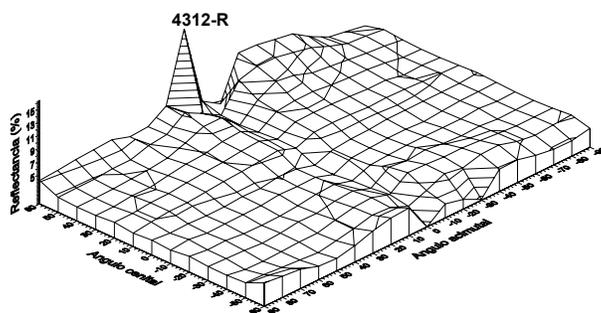
4322-V



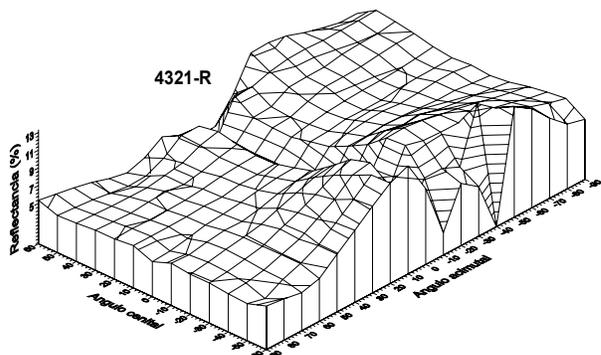
4311-R



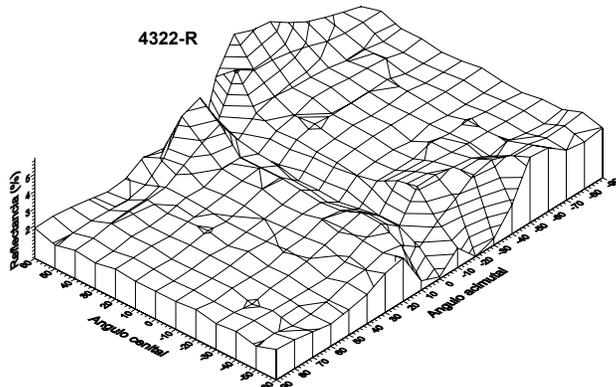
4312-R

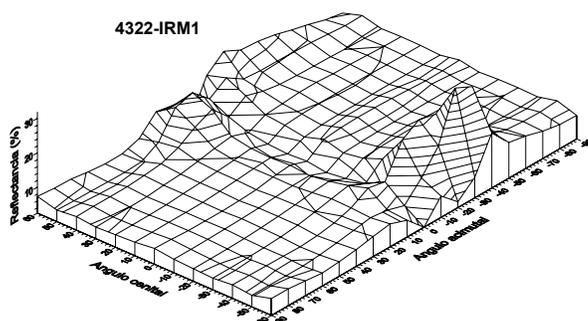
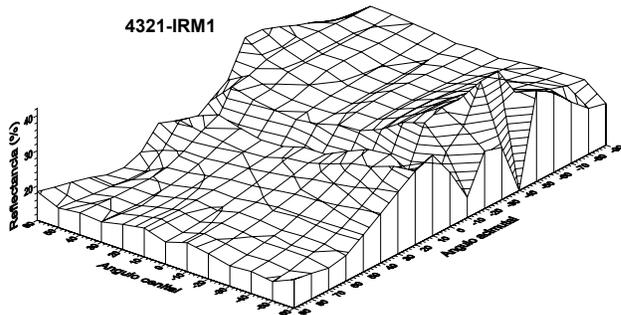
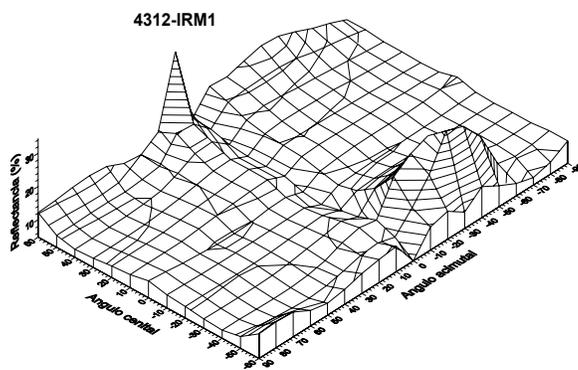
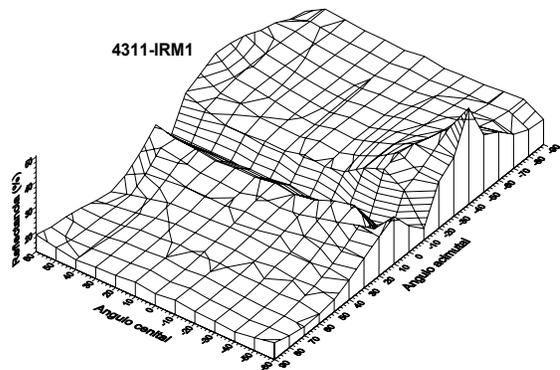
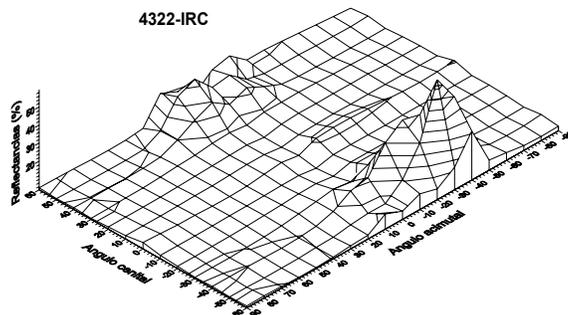
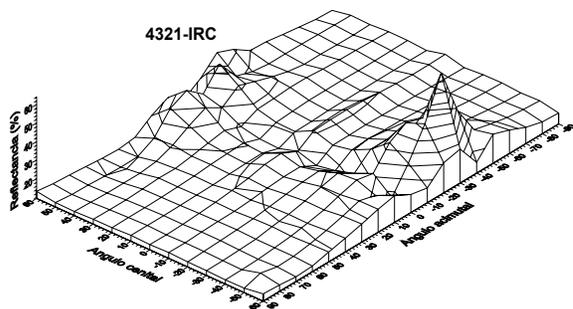
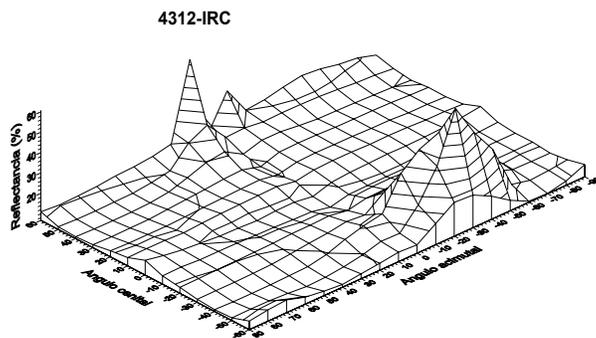
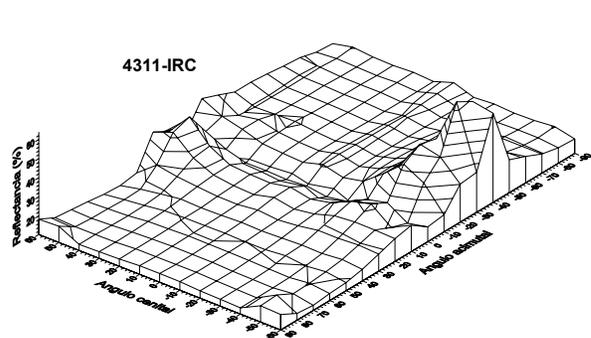


4321-R

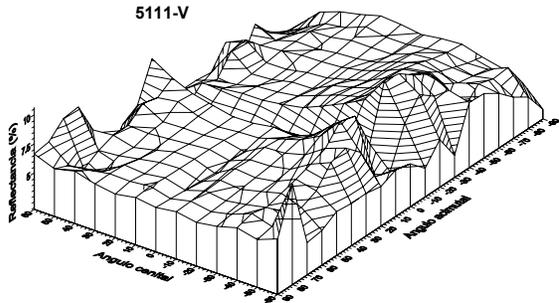


4322-R

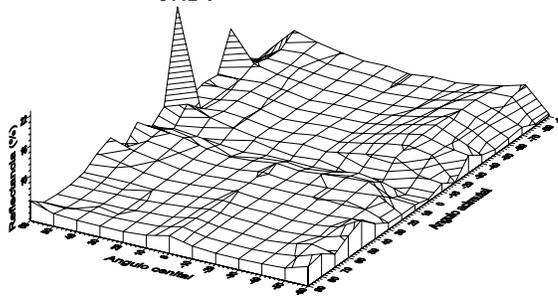




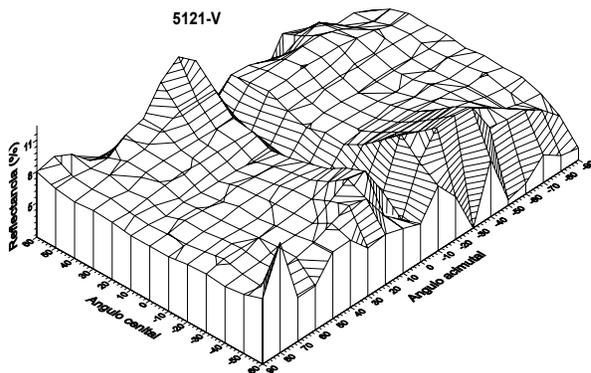
5111-V



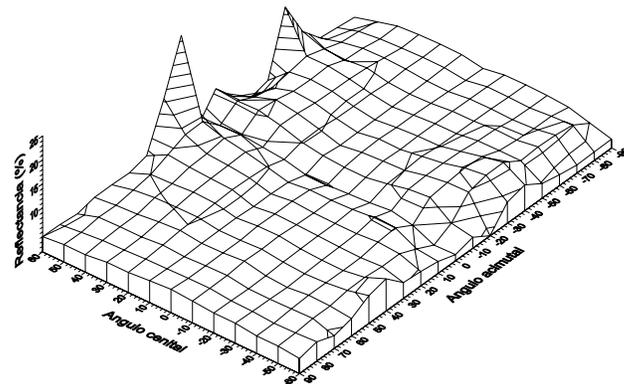
5112-V



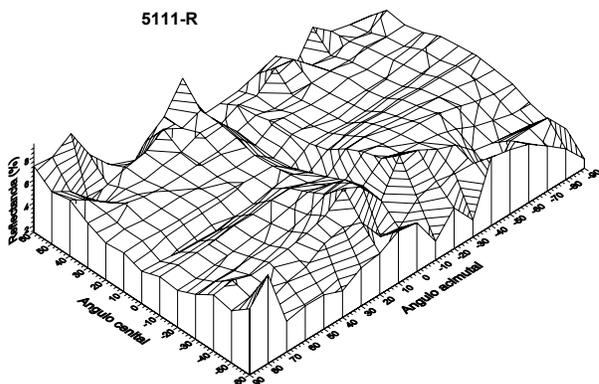
5121-V



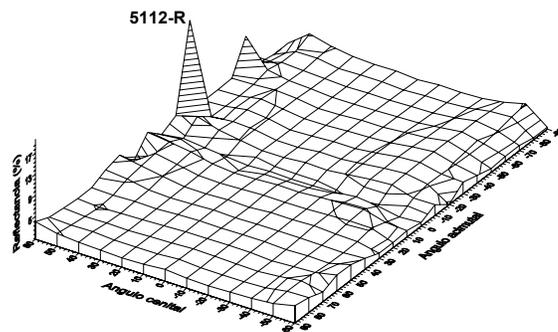
5122-V



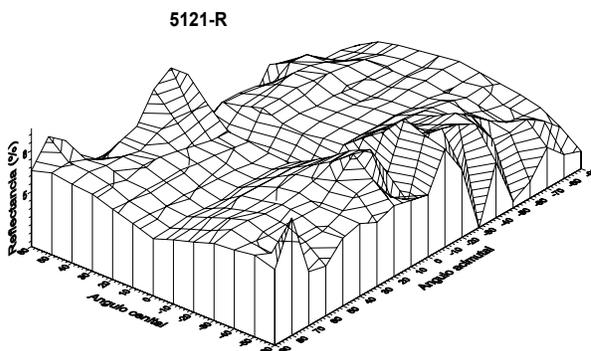
5111-R



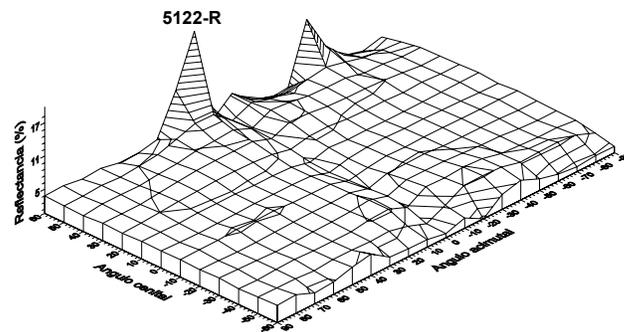
5112-R

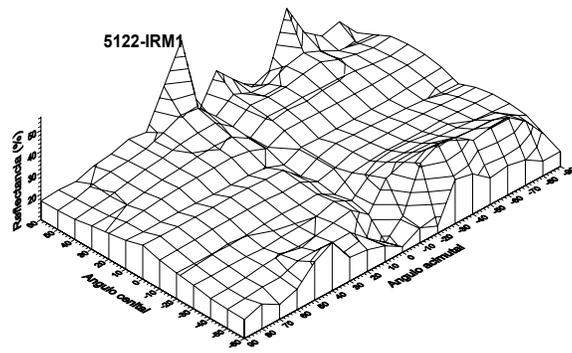
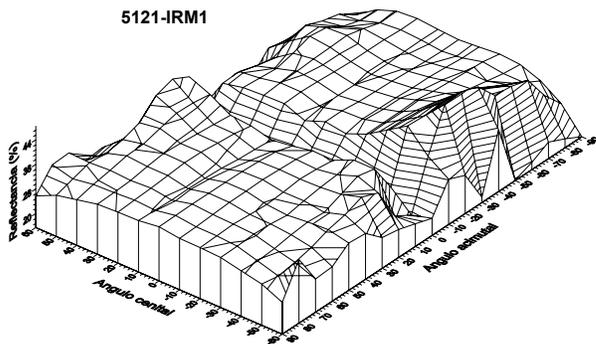
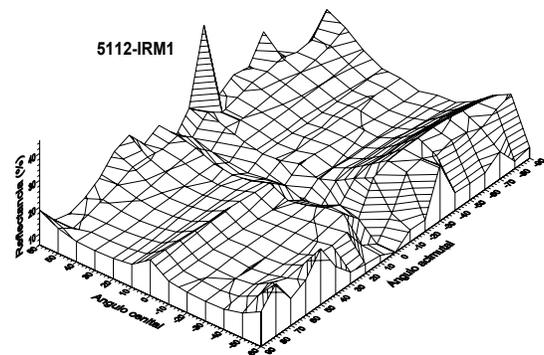
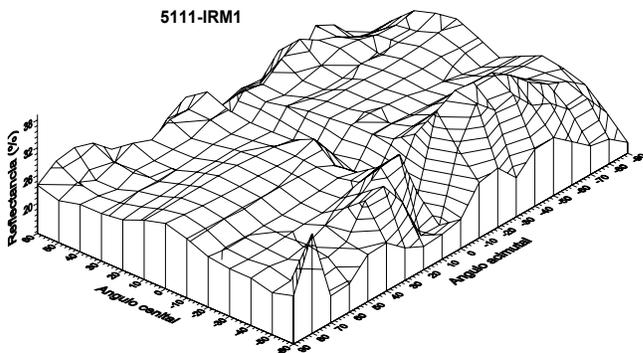
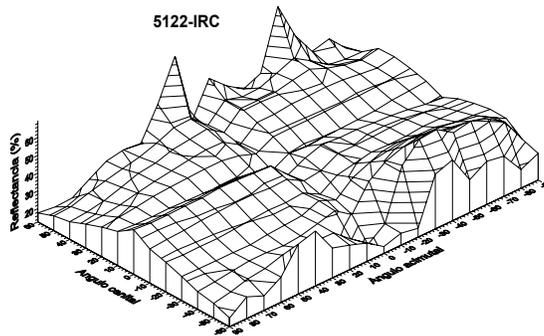
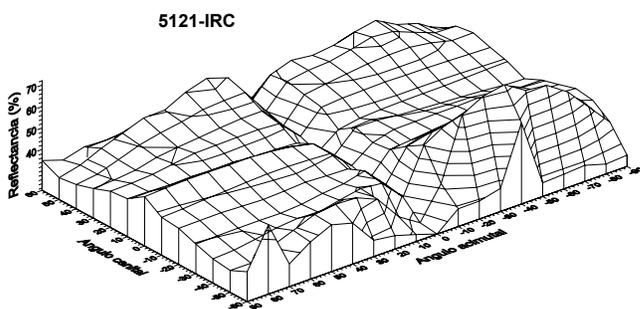
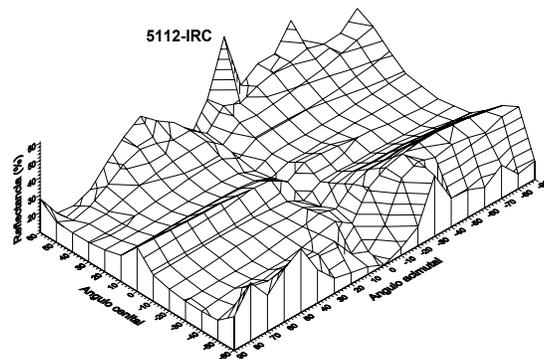
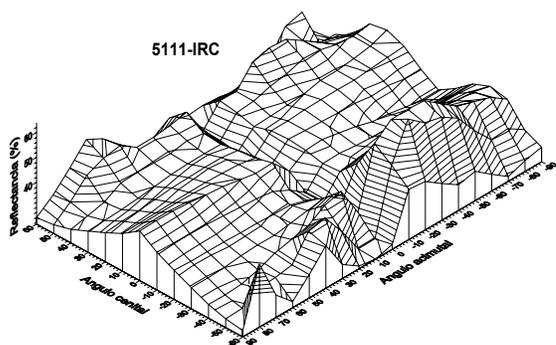


5121-R

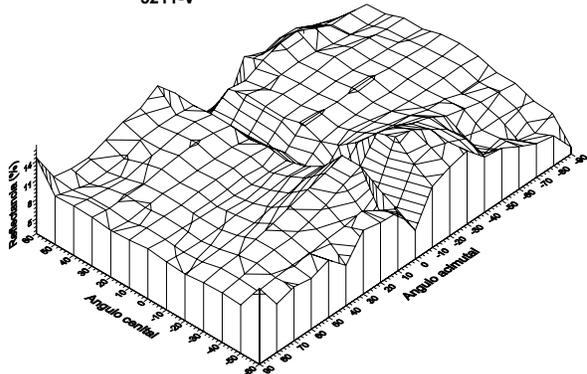


5122-R

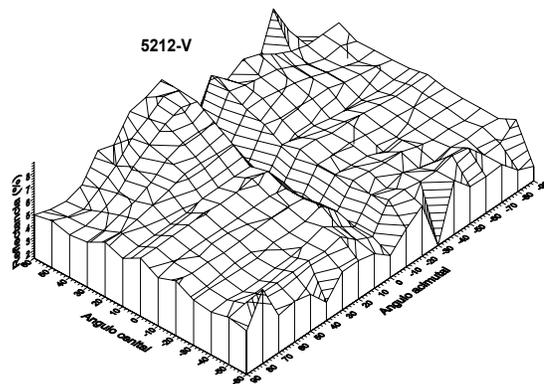




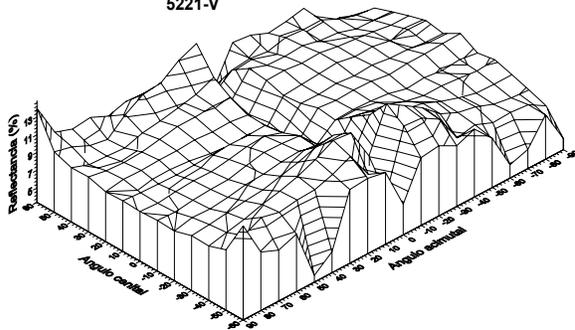
5211-V



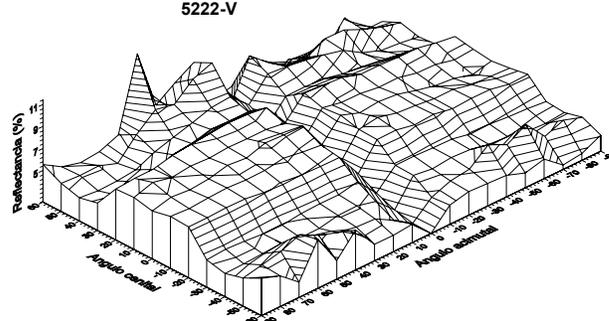
5212-V



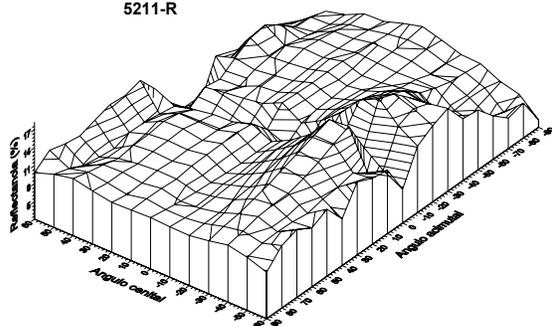
5221-V



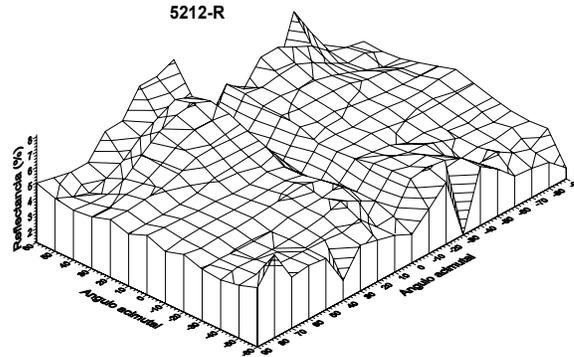
5222-V



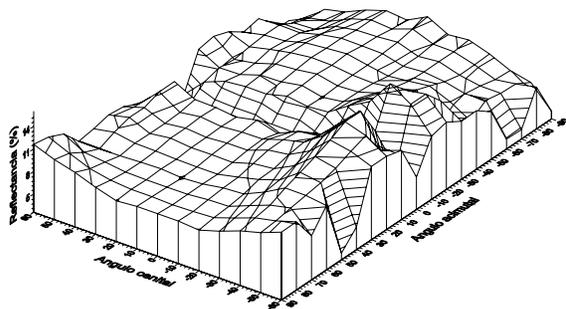
5211-R



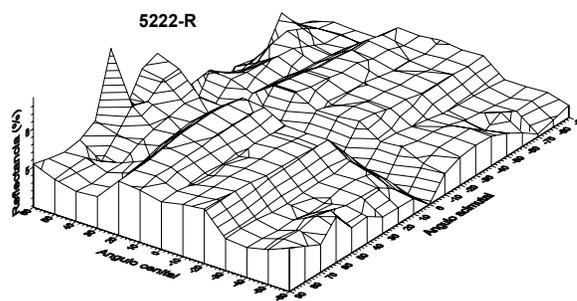
5212-R



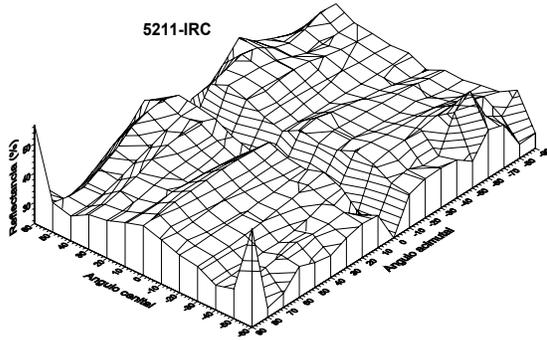
5221-R



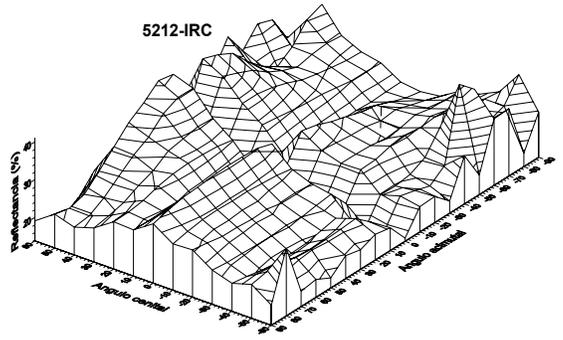
5222-R



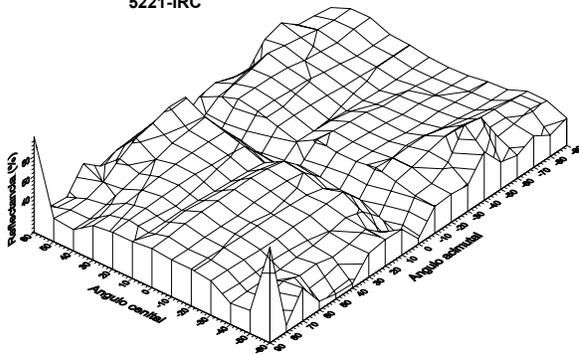
5211-IRC



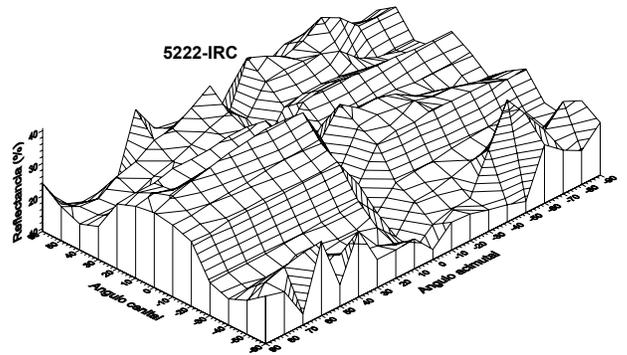
5212-IRC



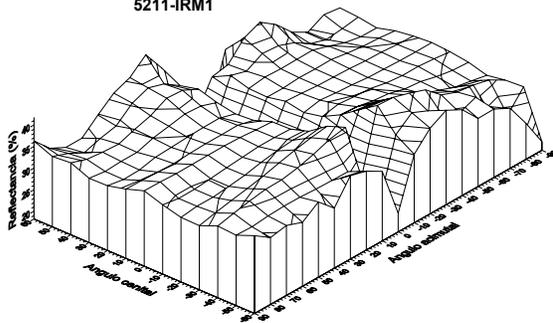
5221-IRC



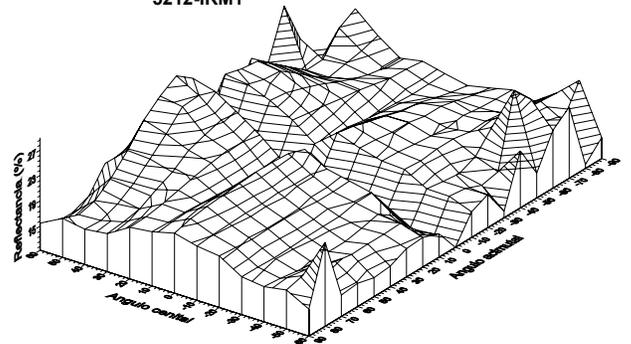
5222-IRC



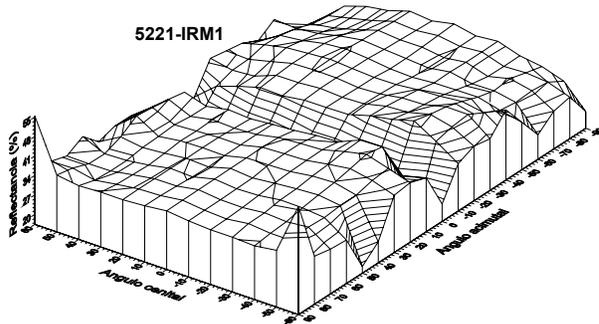
5211-IRM1



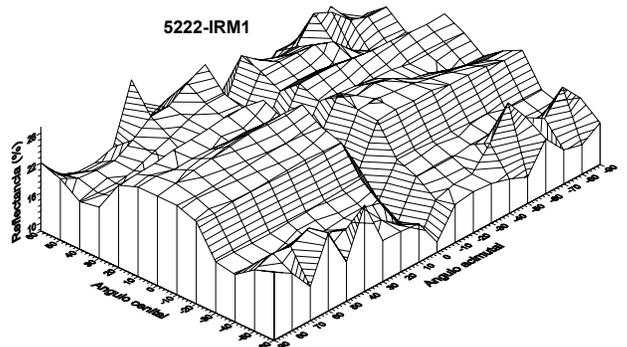
5212-IRM1



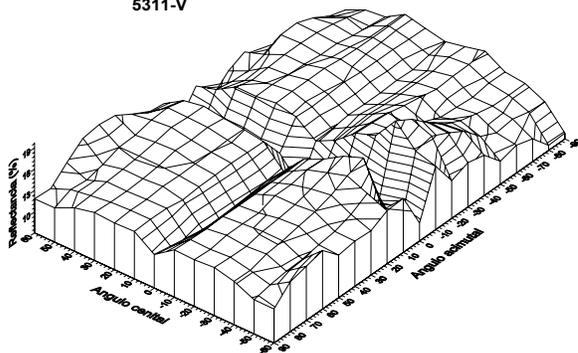
5221-IRM1



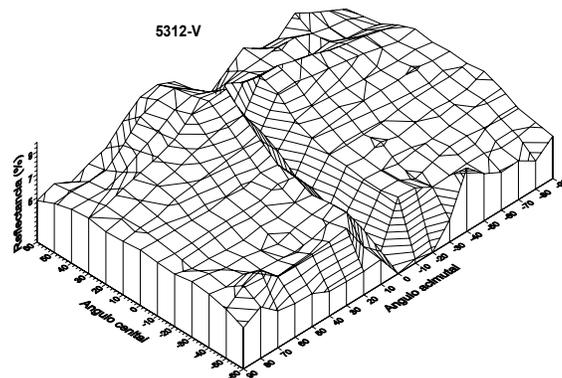
5222-IRM1



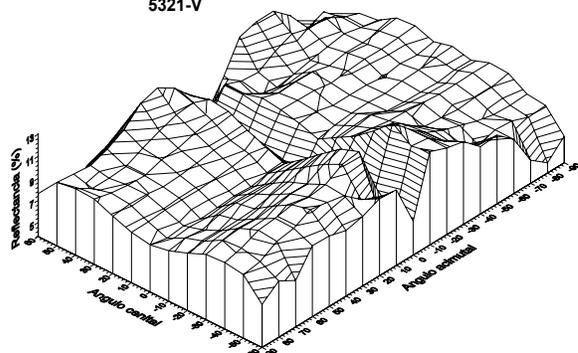
5311-V



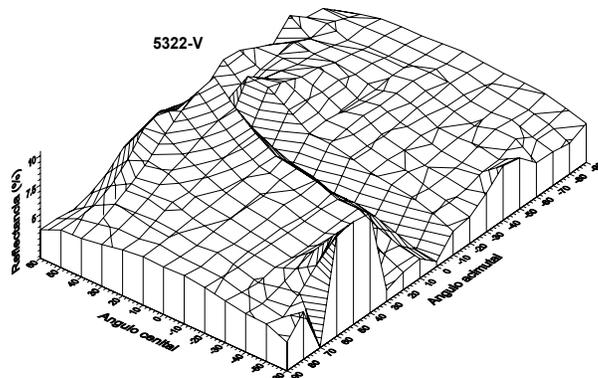
5312-V



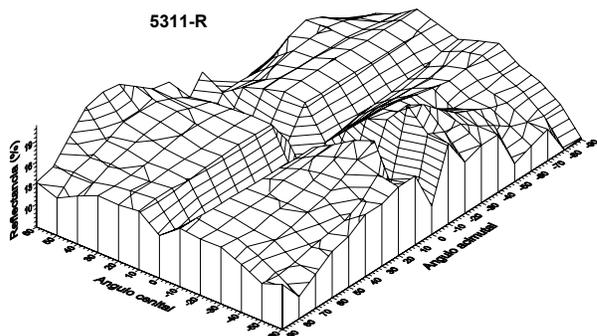
5321-V



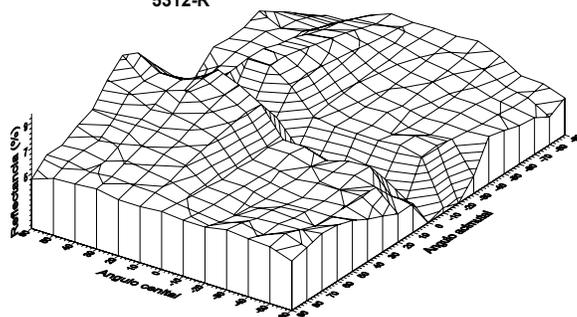
5322-V



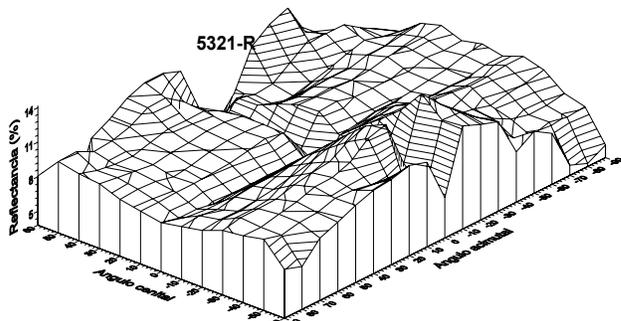
5311-R



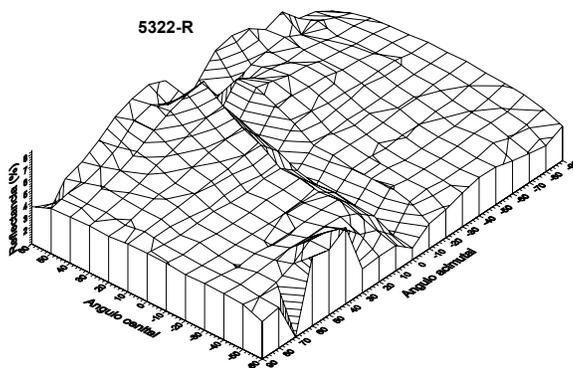
5312-R

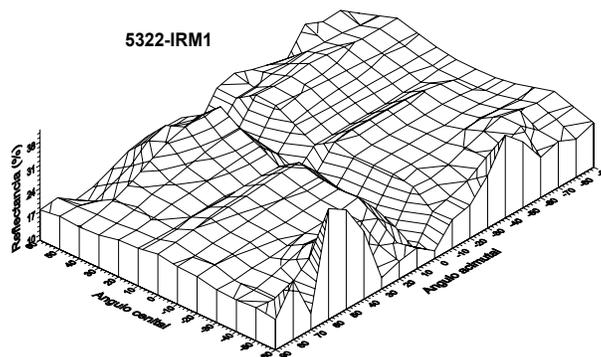
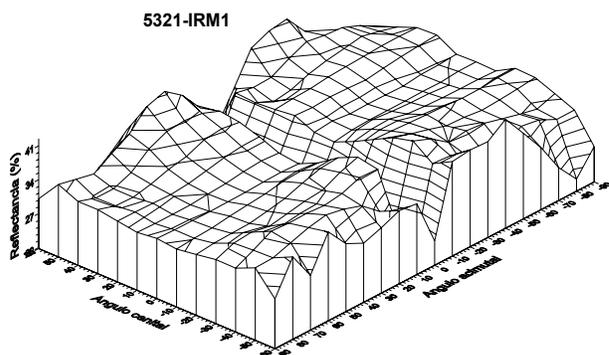
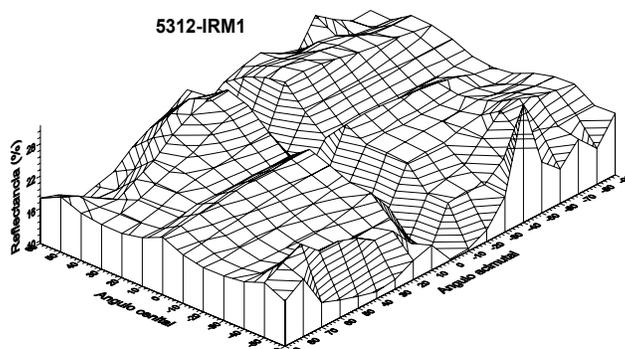
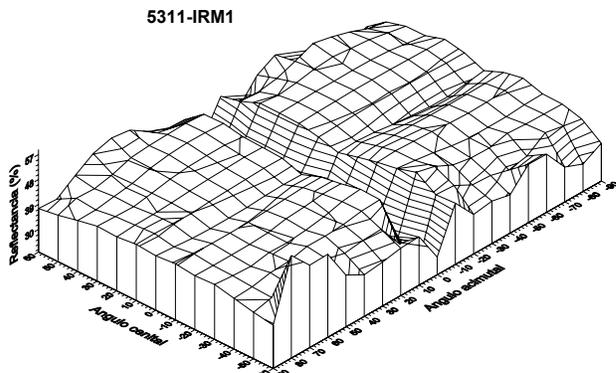
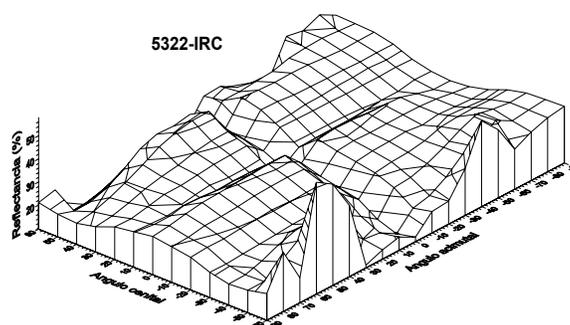
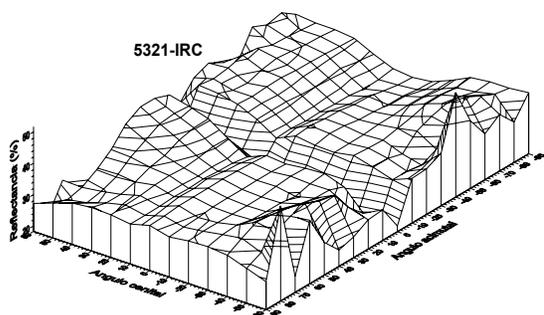
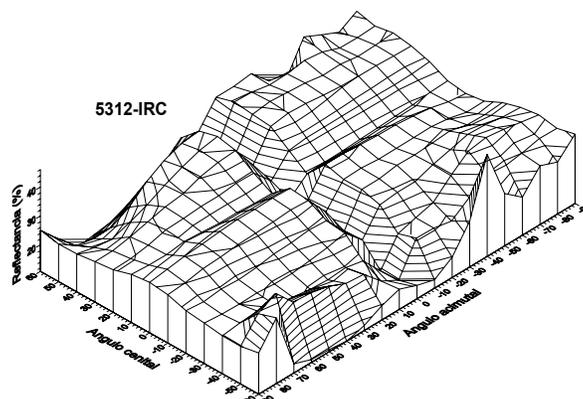
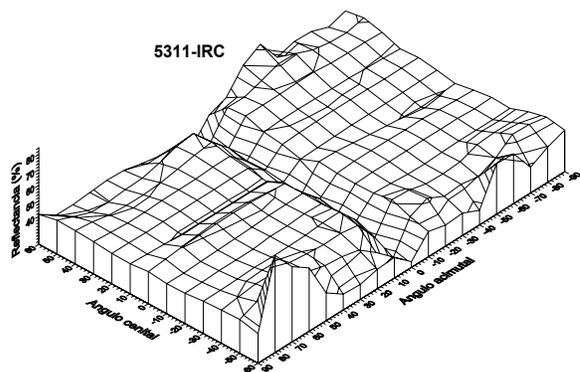


5321-R

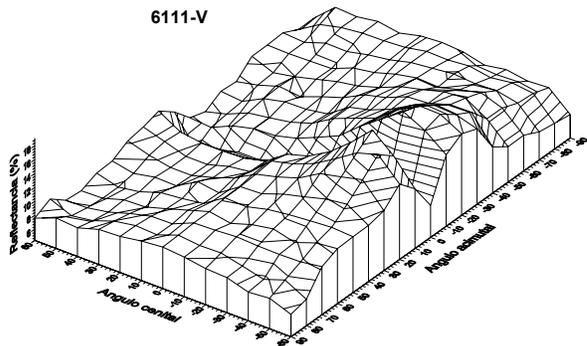


5322-R

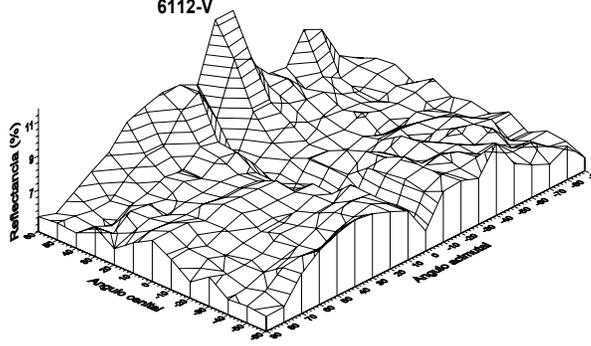




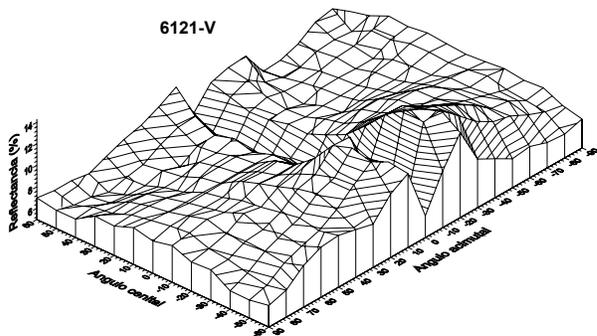
6111-V



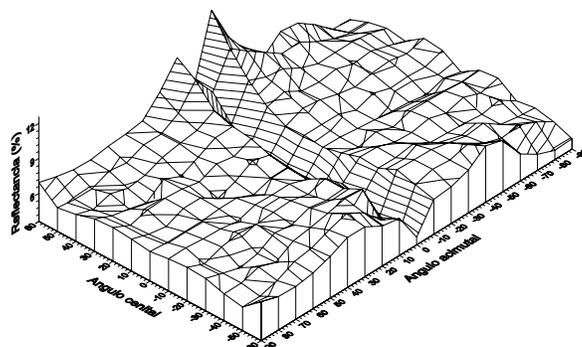
6112-V



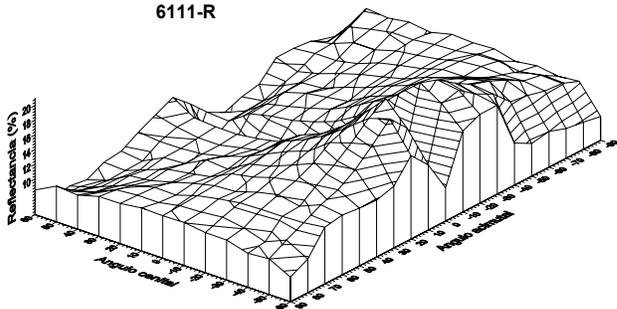
6121-V



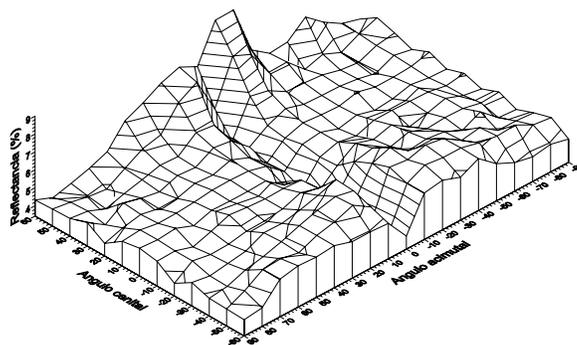
6122-V



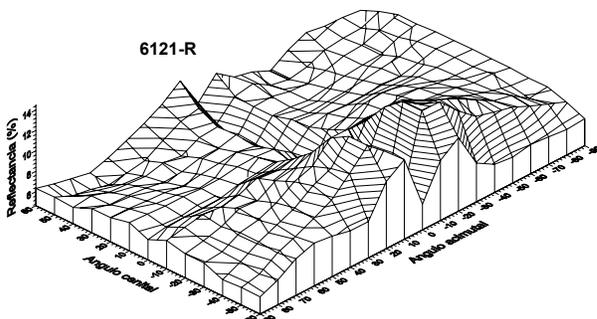
6111-R



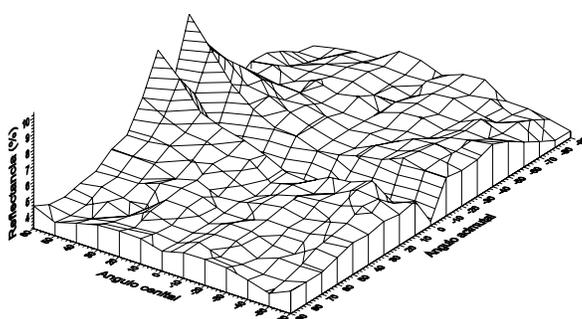
6112-R



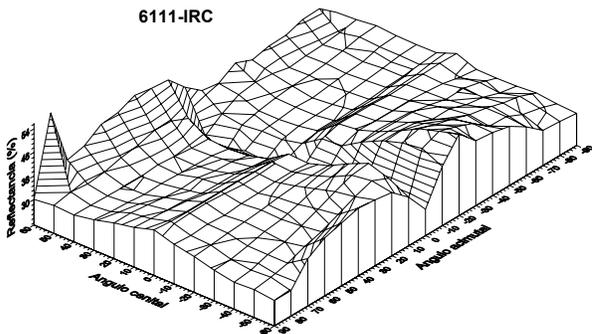
6121-R



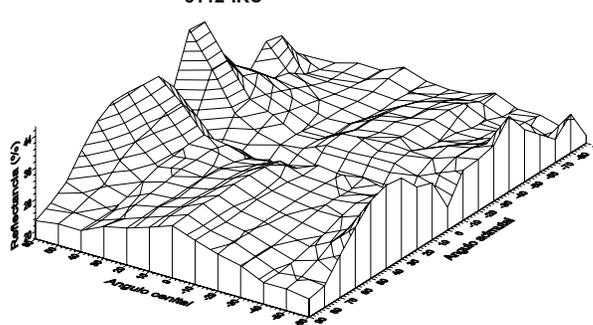
6122-R



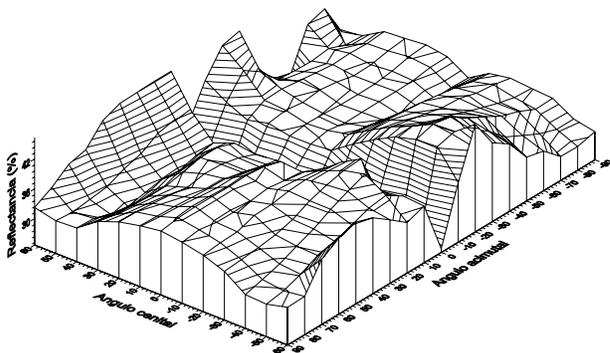
6111-IRC



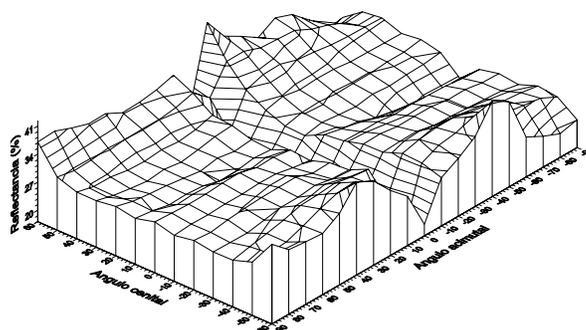
6112-IRC



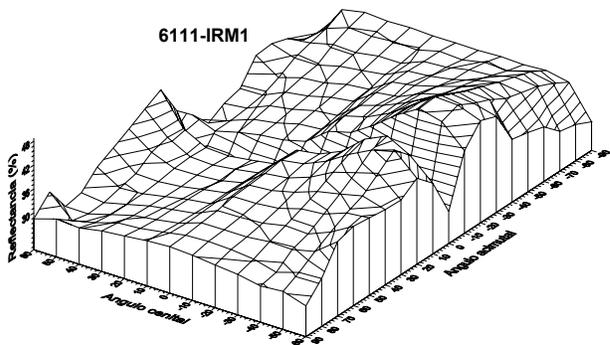
6121-IRC



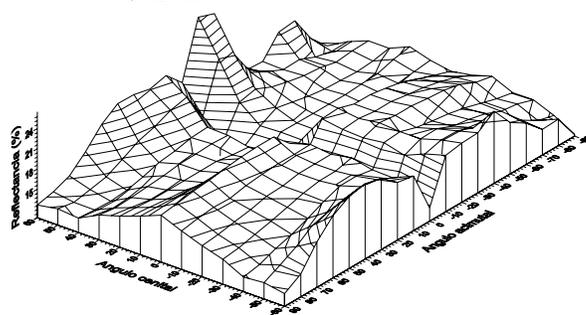
6122-IRC



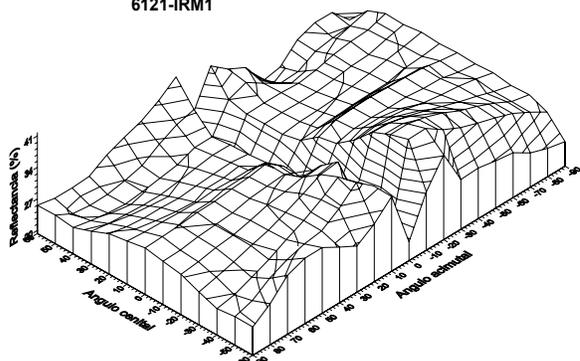
6111-IRM1



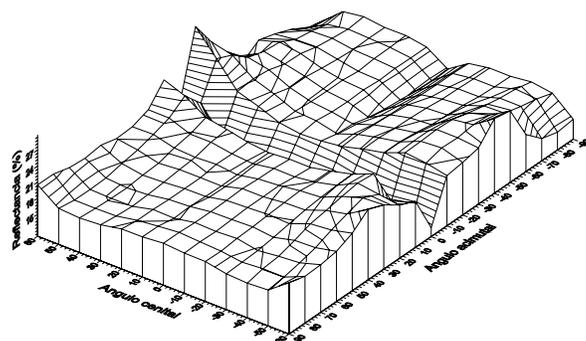
6112-IRM1



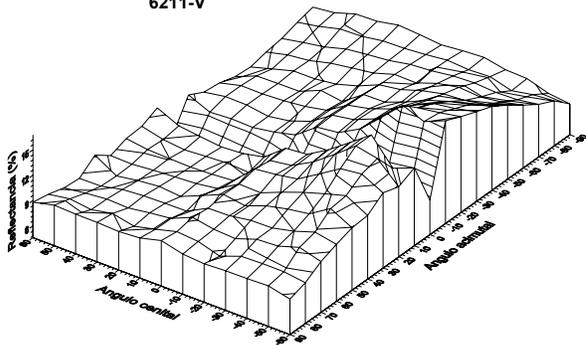
6121-IRM1



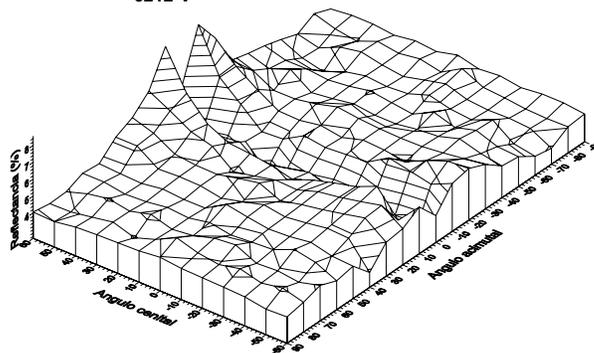
6122-IRM1



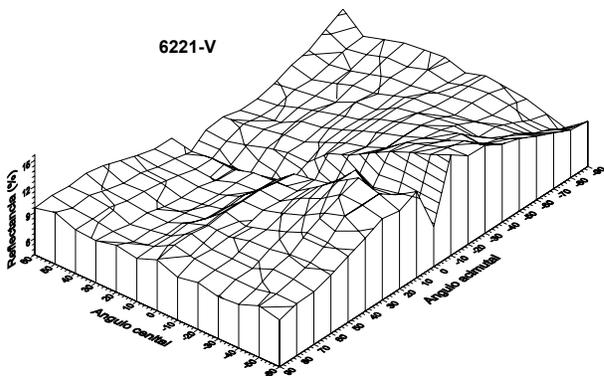
6211-V



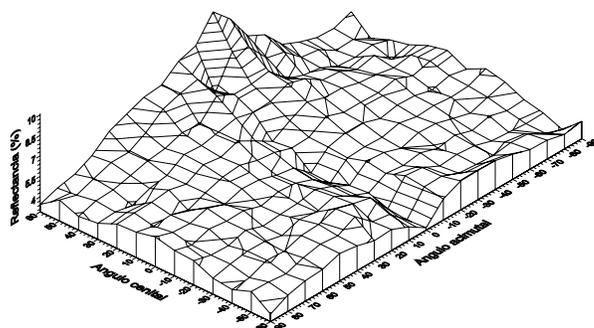
6212-V



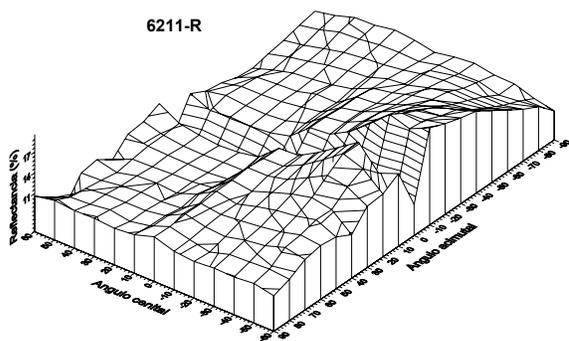
6221-V



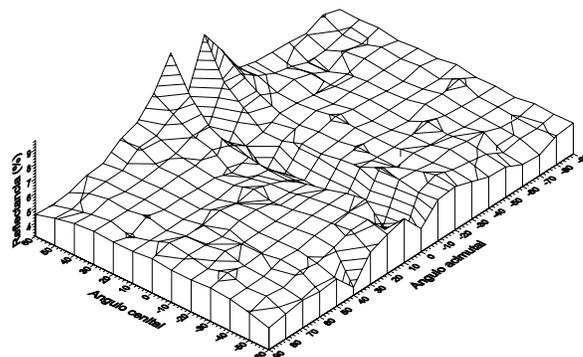
6222-V



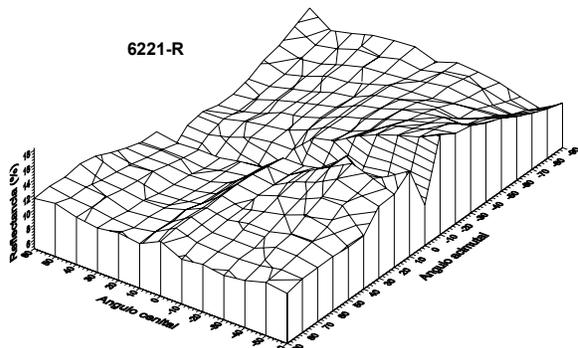
6211-R



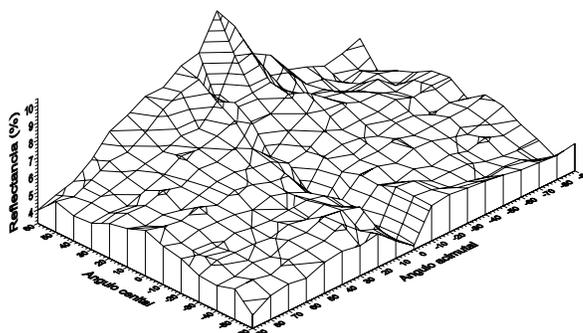
6212-R



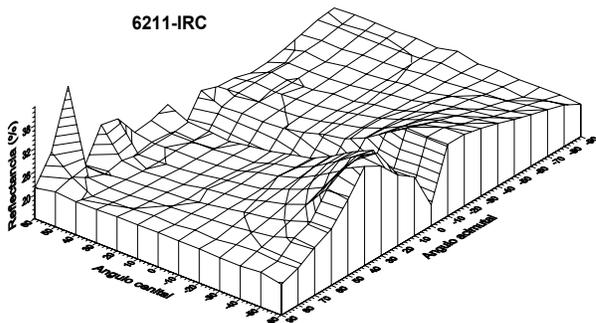
6221-R



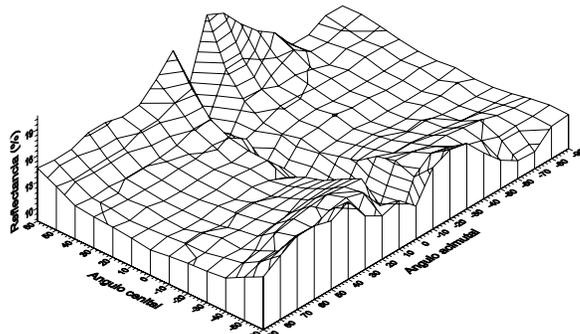
6222-R



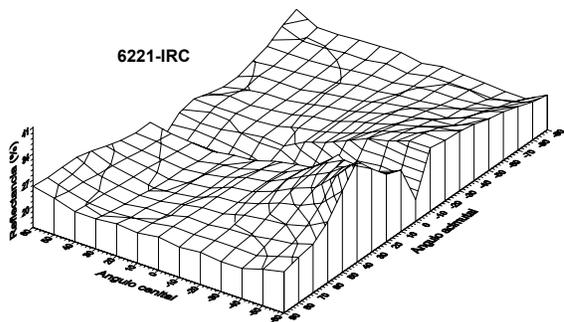
6211-IRC



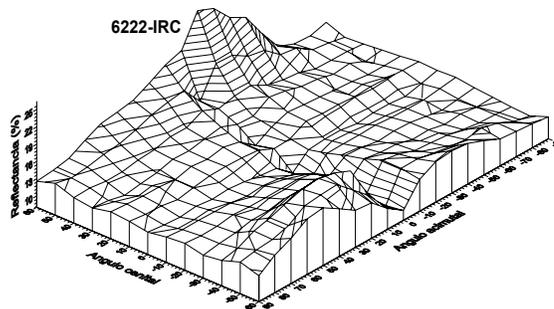
6212-IRC



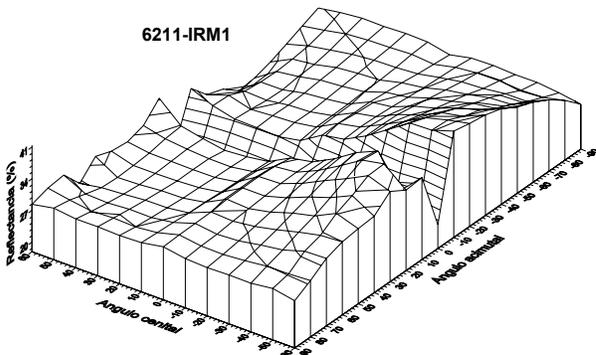
6221-IRC



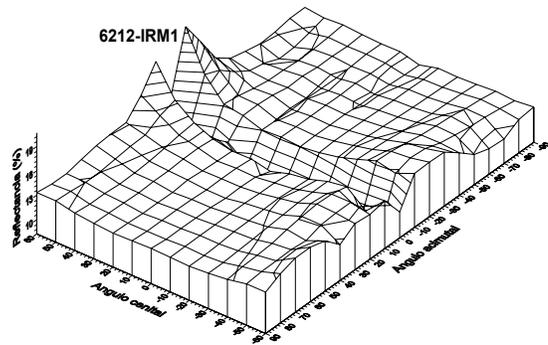
6222-IRC



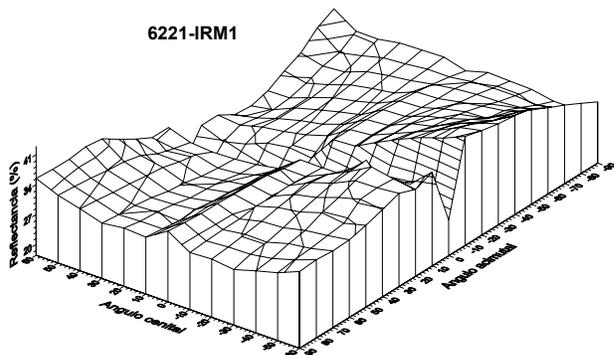
6211-IRM1



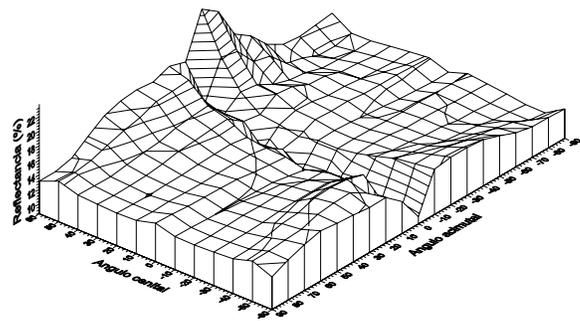
6212-IRM1

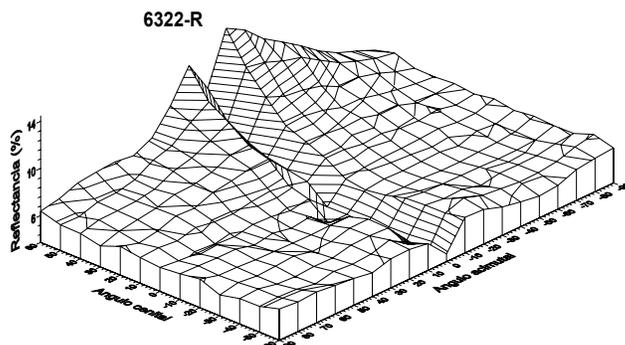
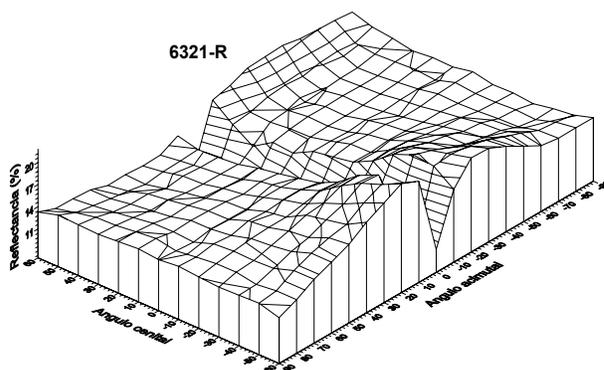
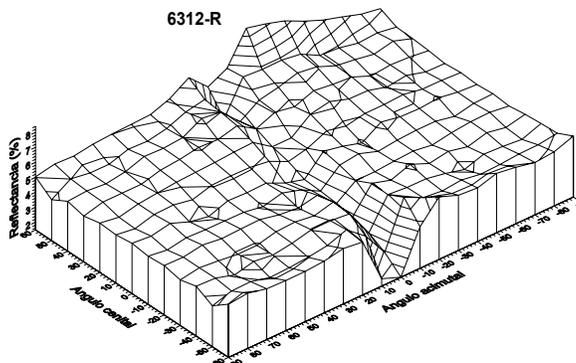
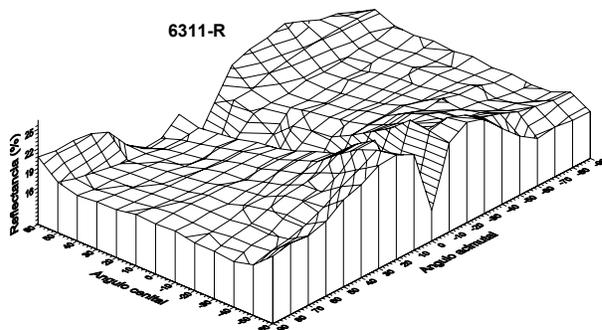
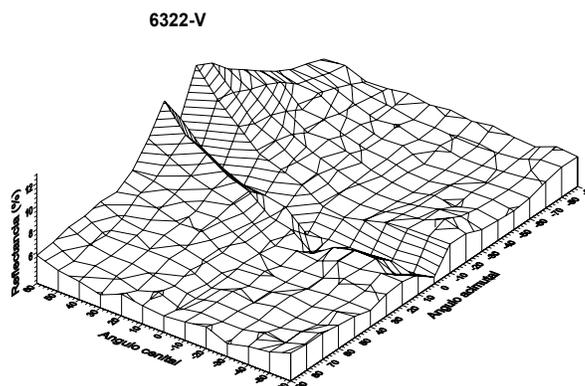
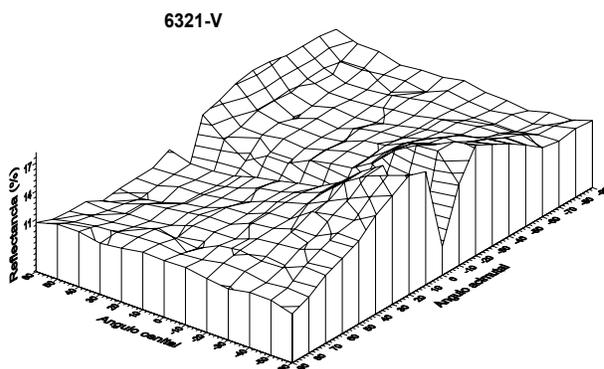
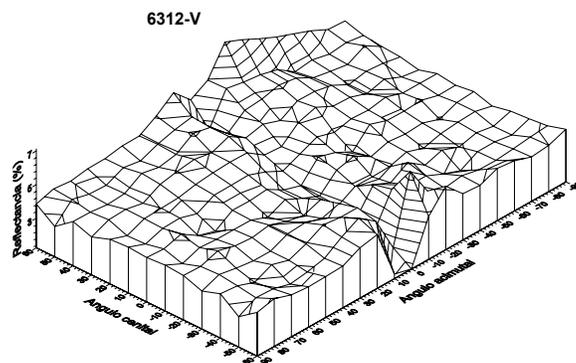
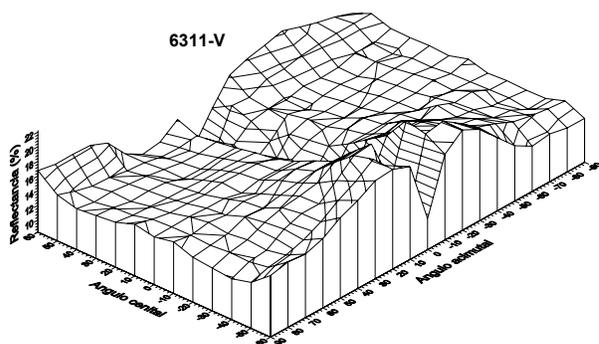


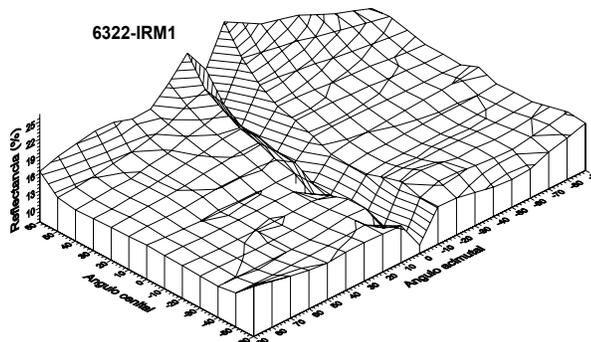
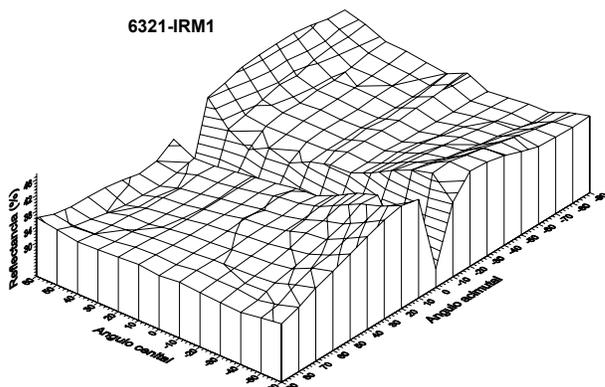
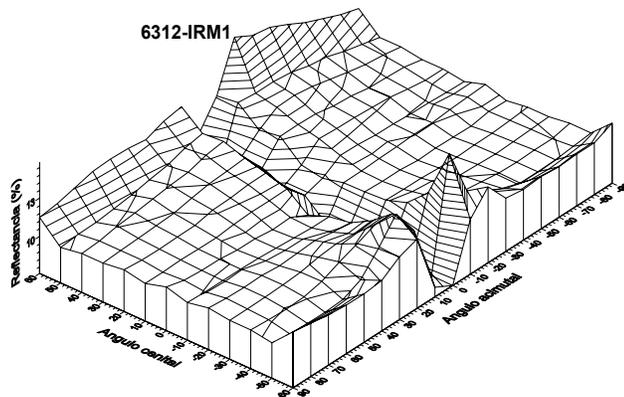
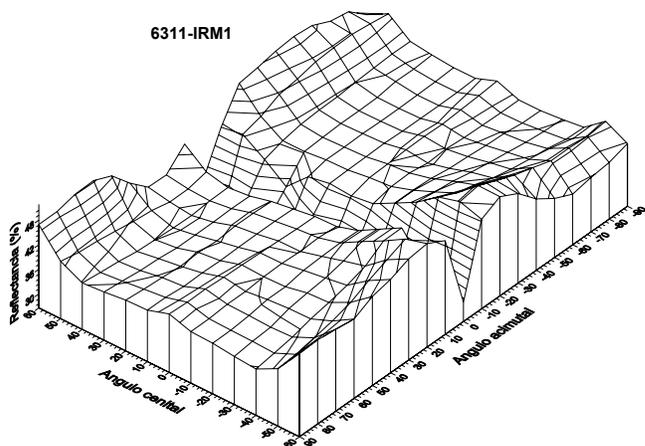
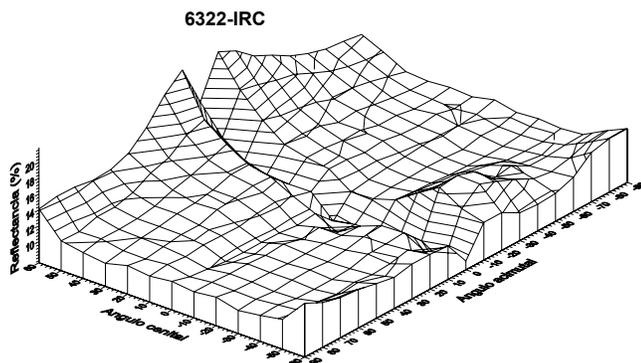
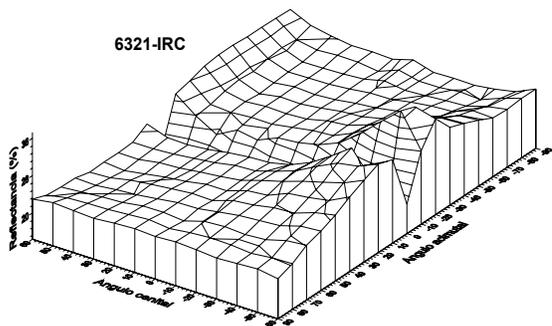
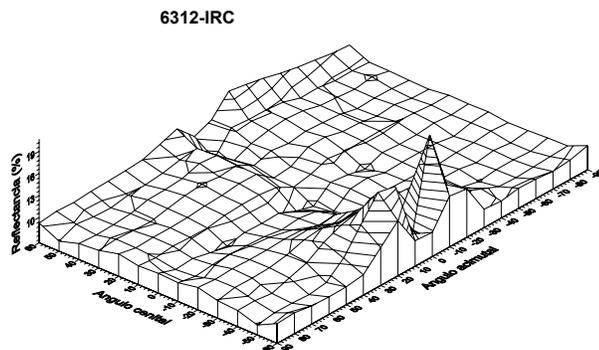
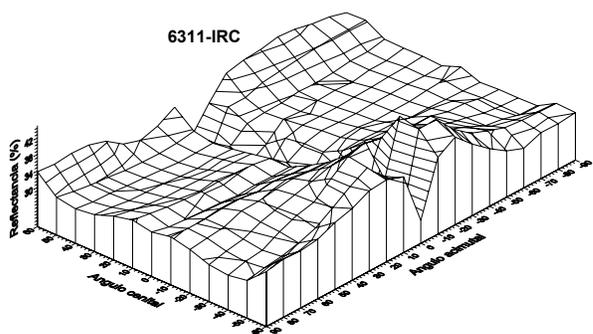
6221-IRM1



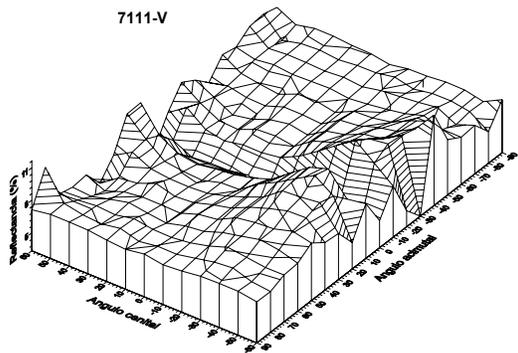
6222-IRM1



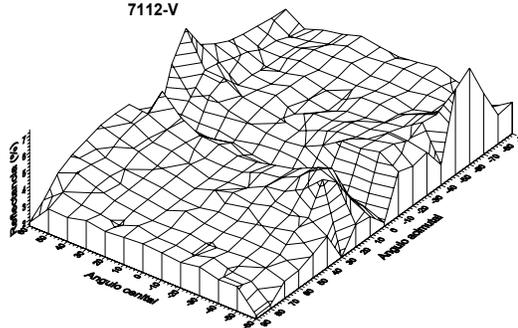




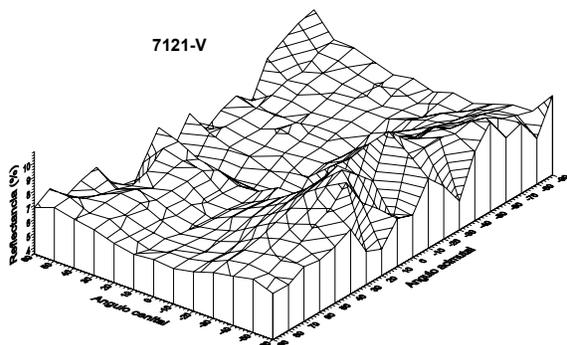
7111-V



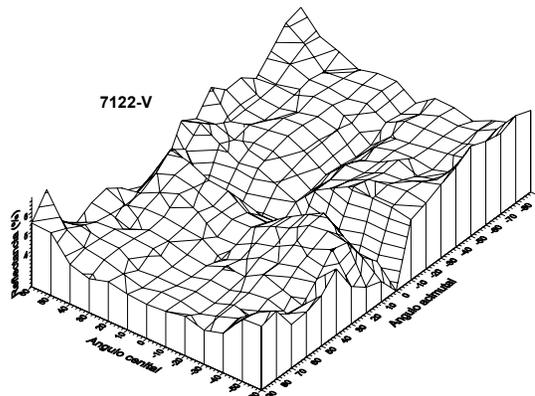
7112-V



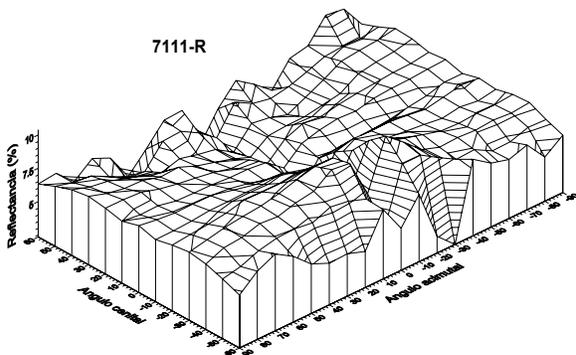
7121-V



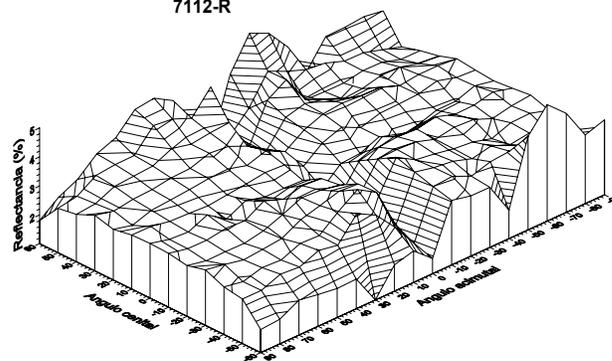
7122-V



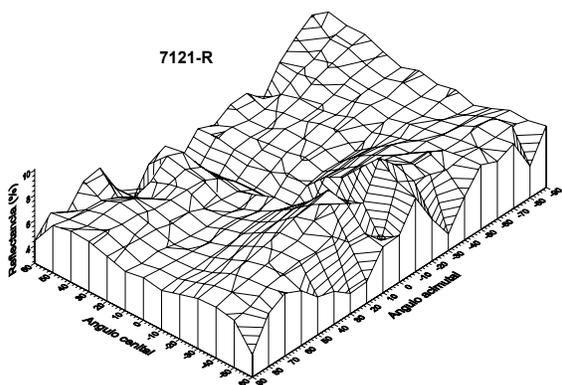
7111-R



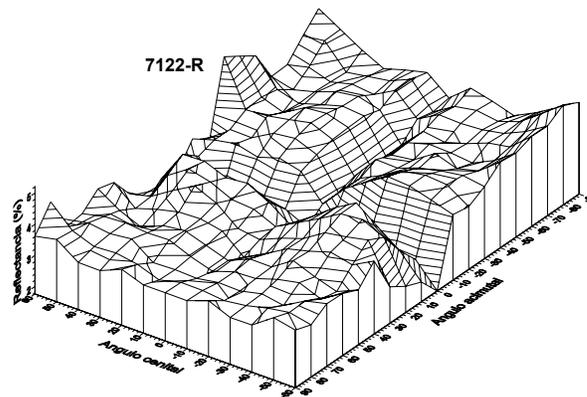
7112-R

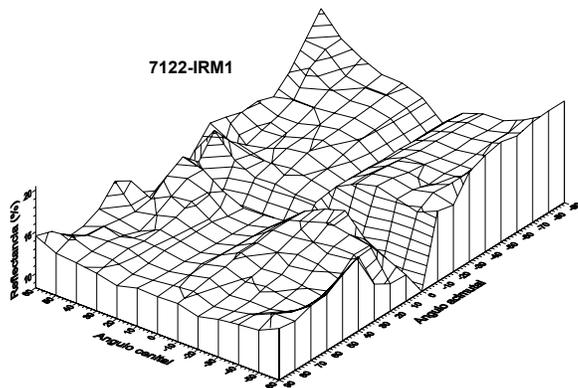
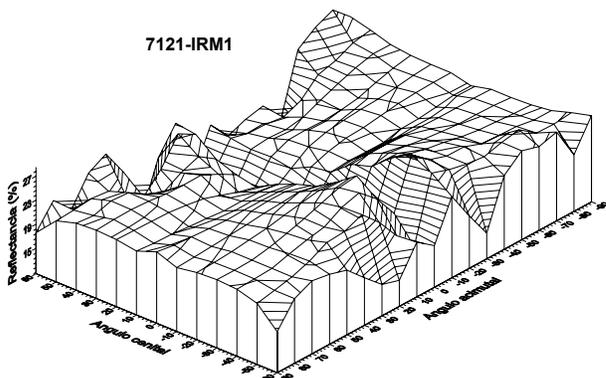
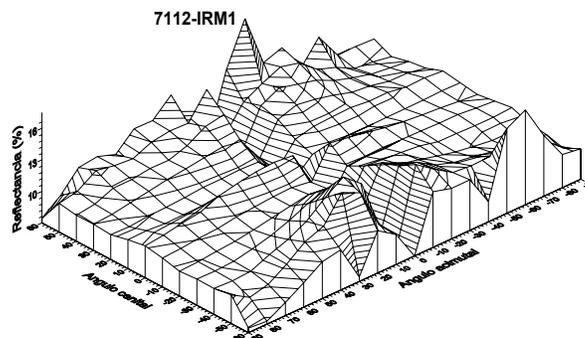
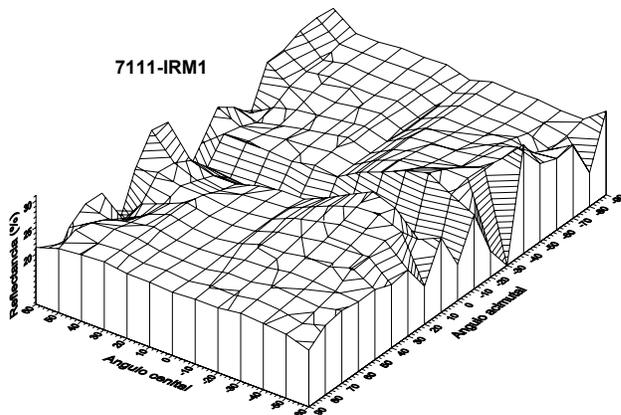
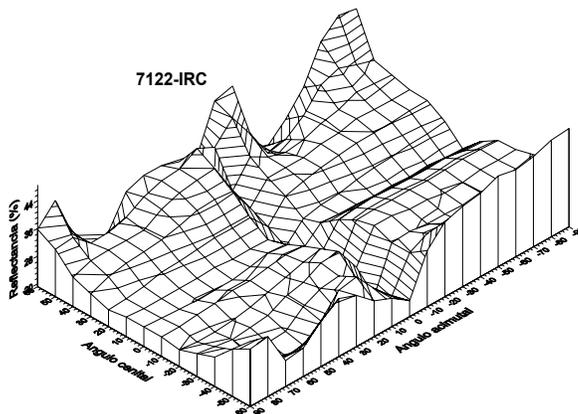
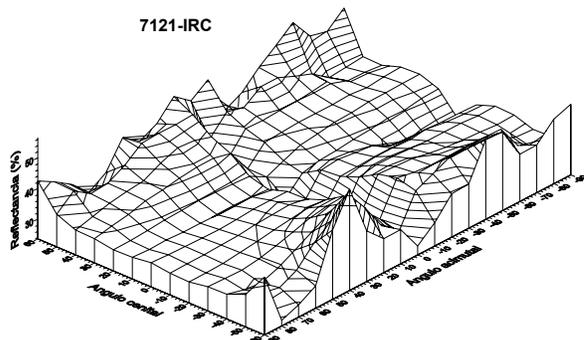
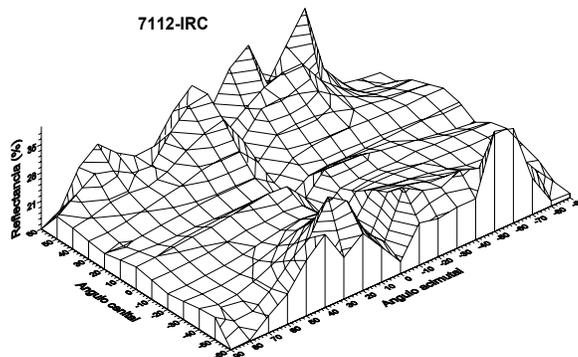
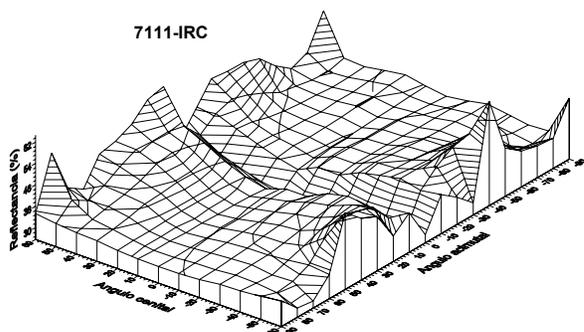


7121-R

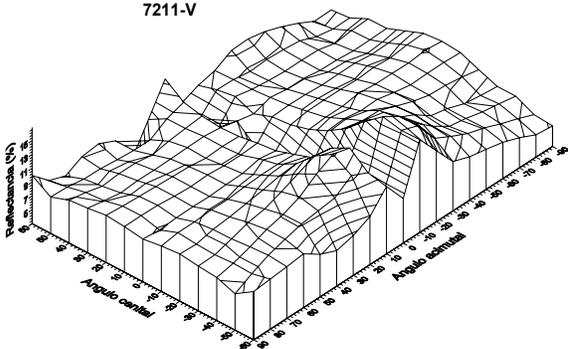


7122-R

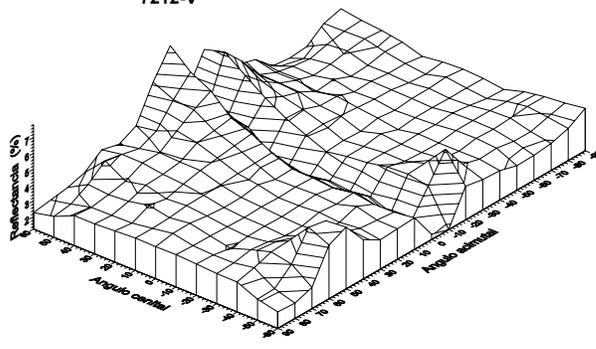




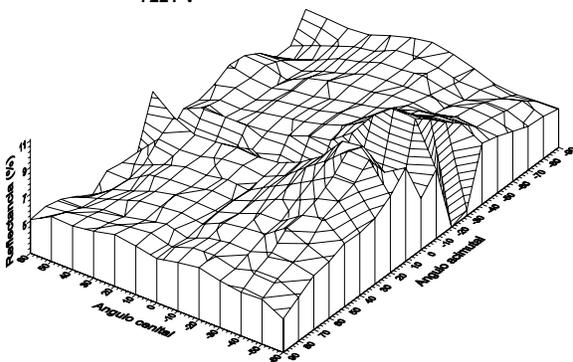
7211-V



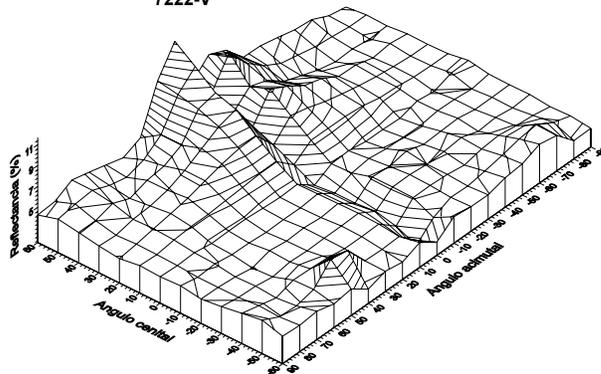
7212-V



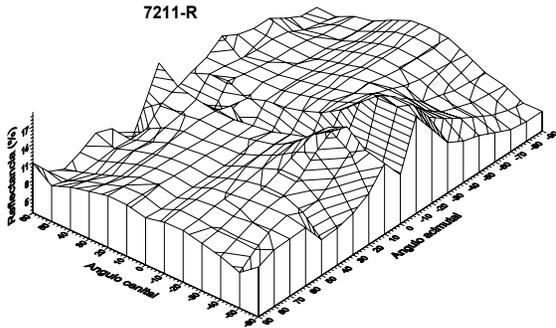
7221-V



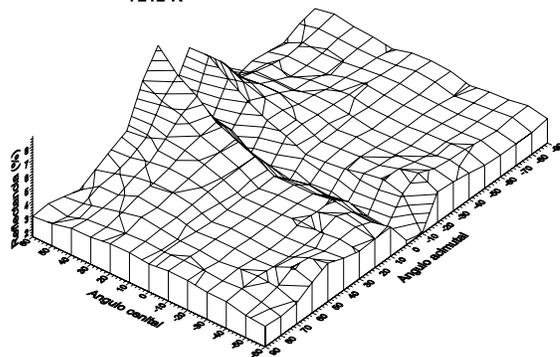
7222-V



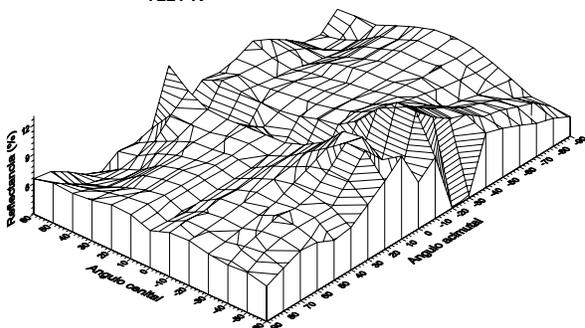
7211-R



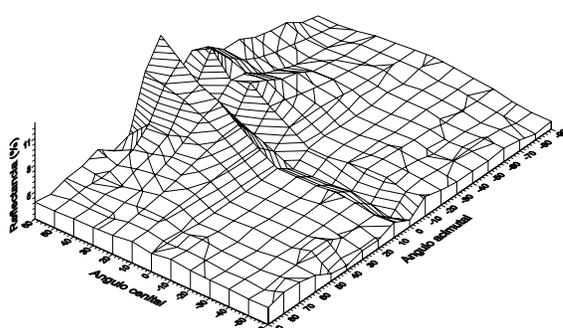
7212-R

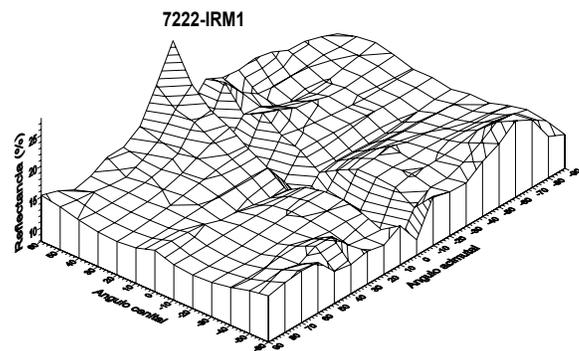
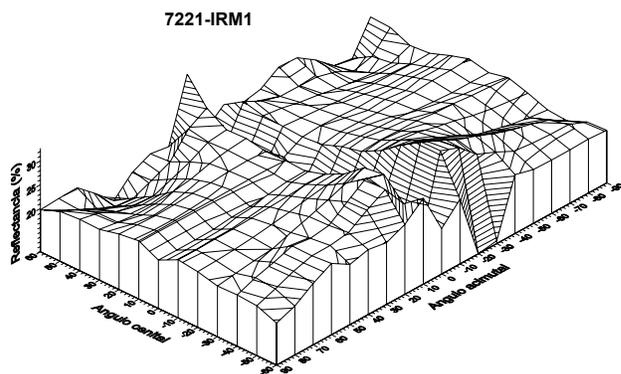
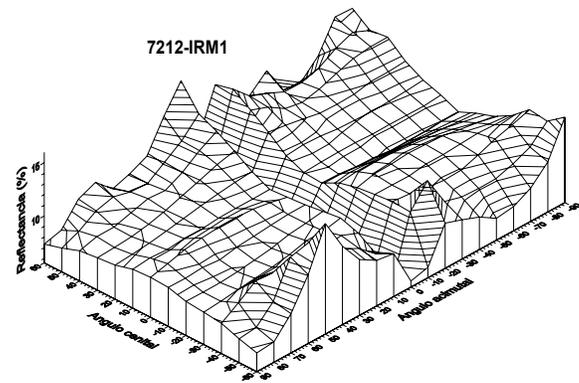
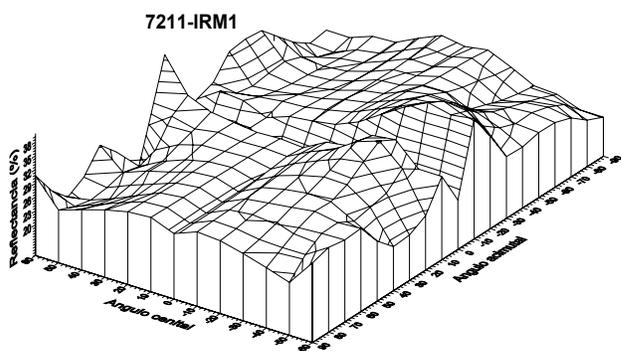
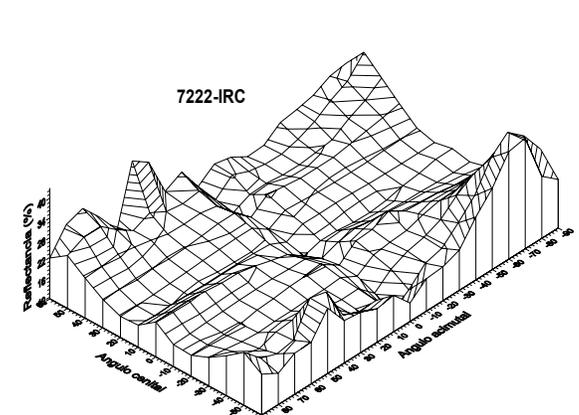
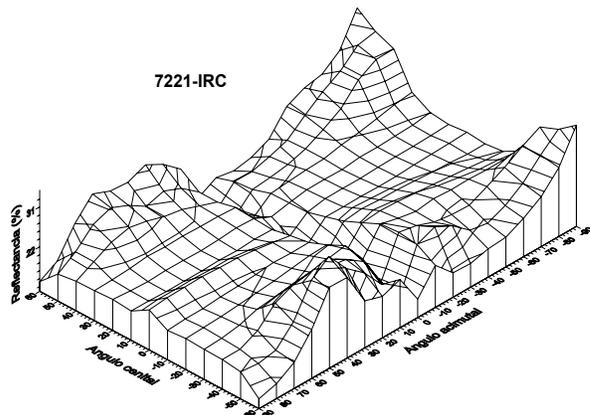
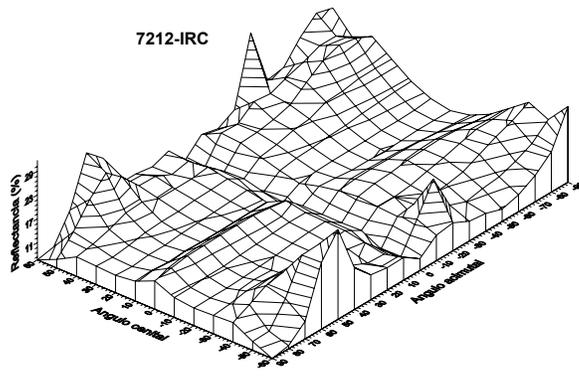
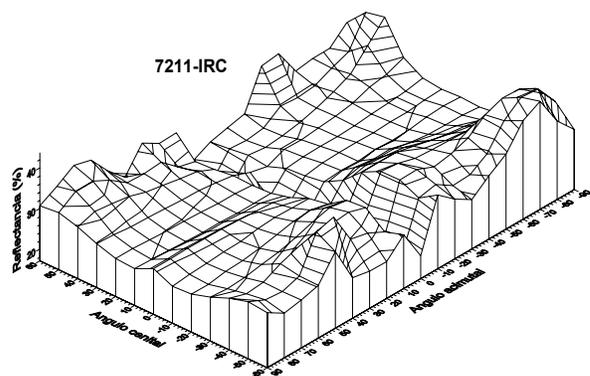


7221-R

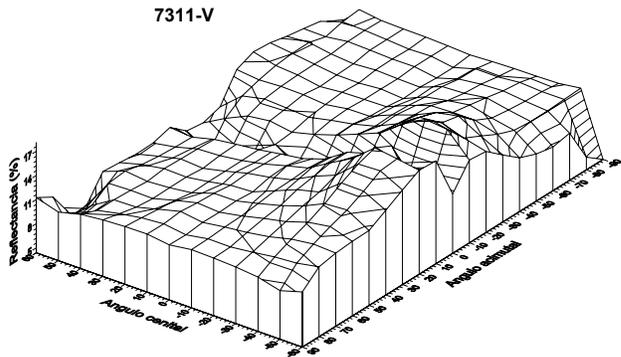


7222-R

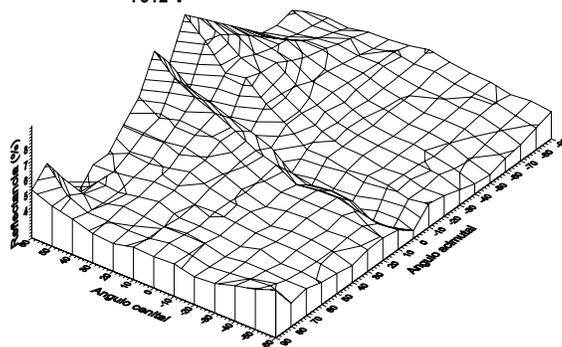




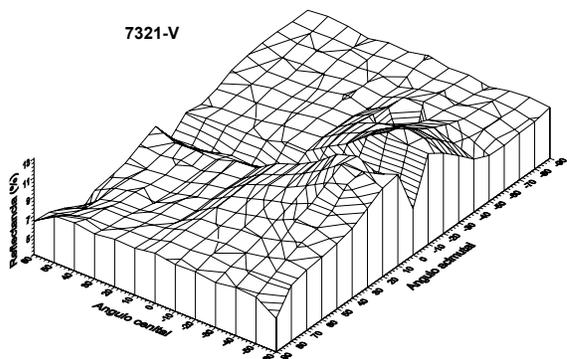
7311-V



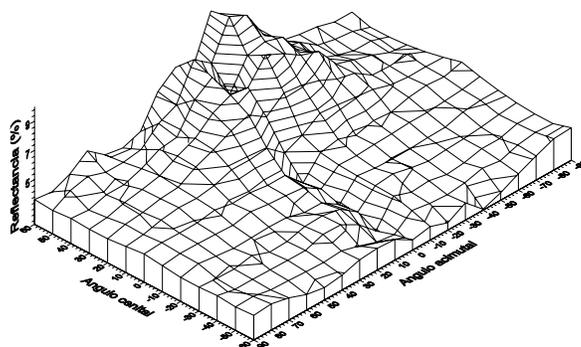
7312-V



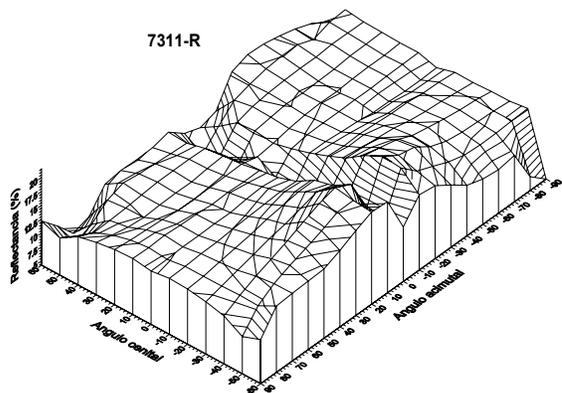
7321-V



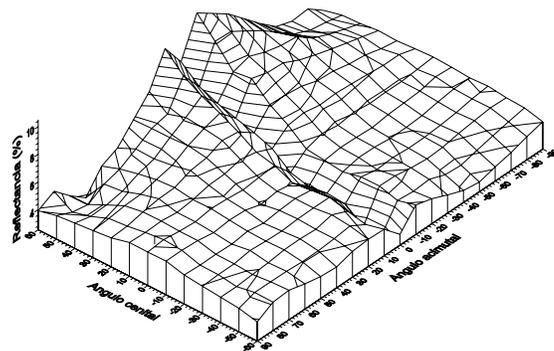
7322-V



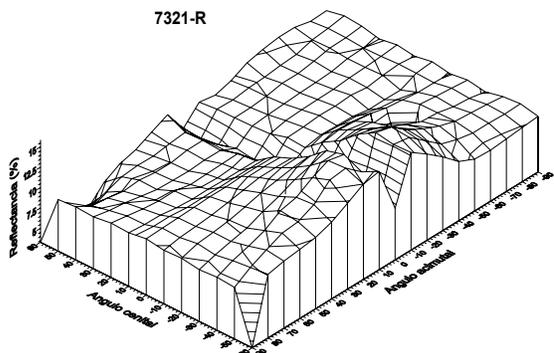
7311-R



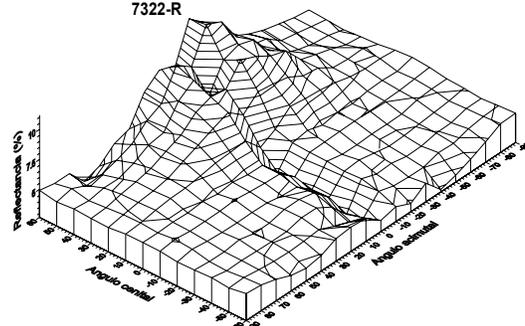
7312-R



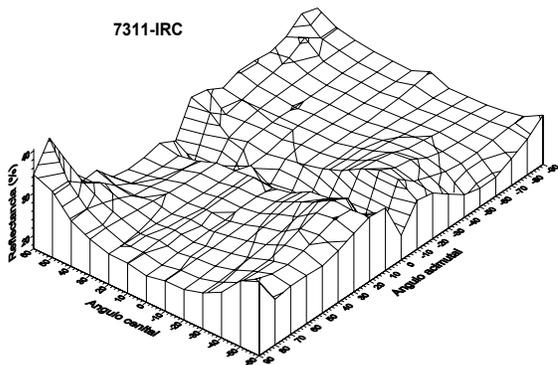
7321-R



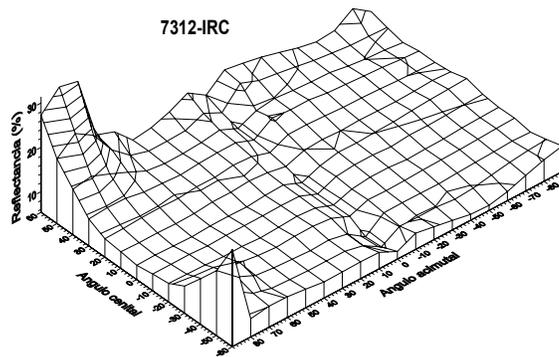
7322-R



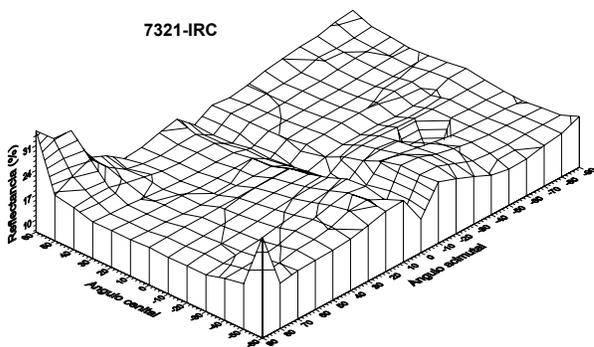
7311-IRC



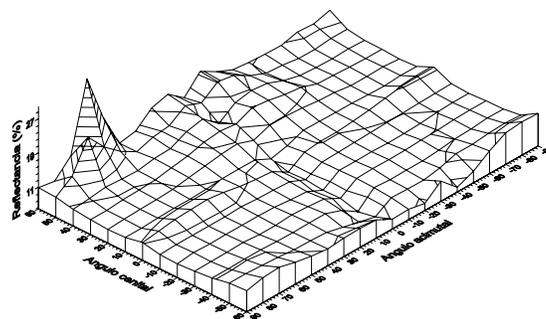
7312-IRC



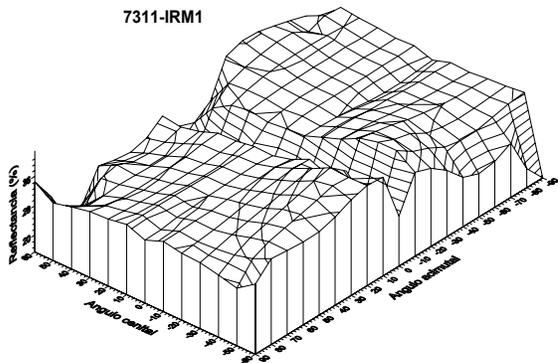
7321-IRC



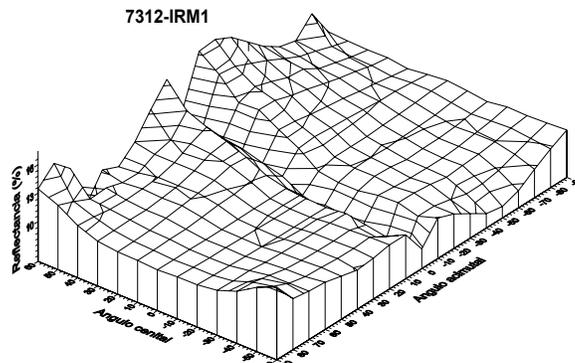
7322-IRC



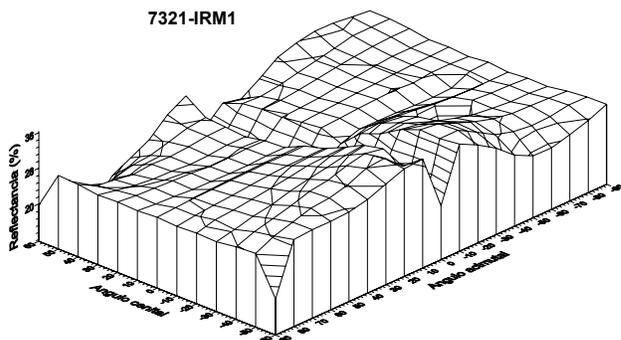
7311-IRM1



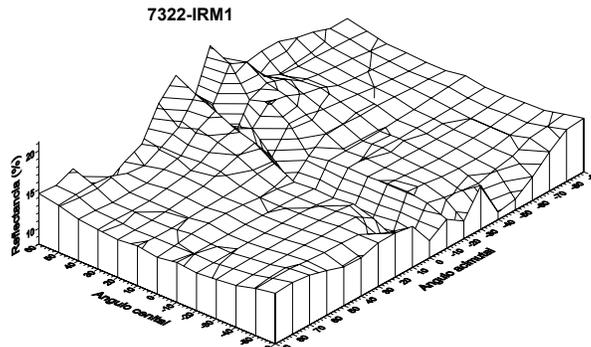
7312-IRM1



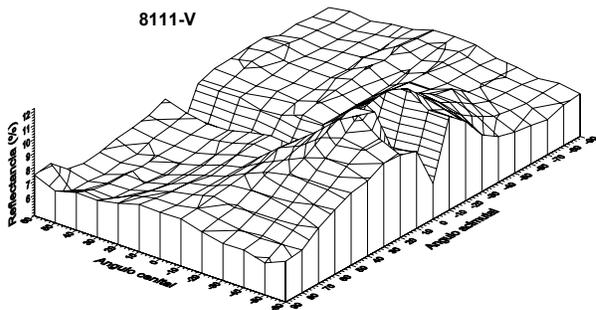
7321-IRM1



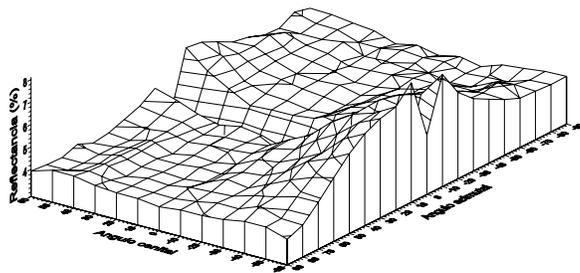
7322-IRM1



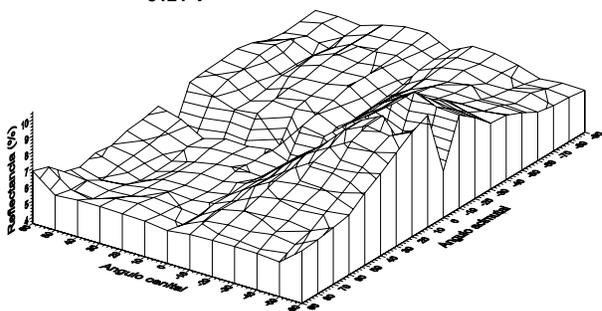
8111-V



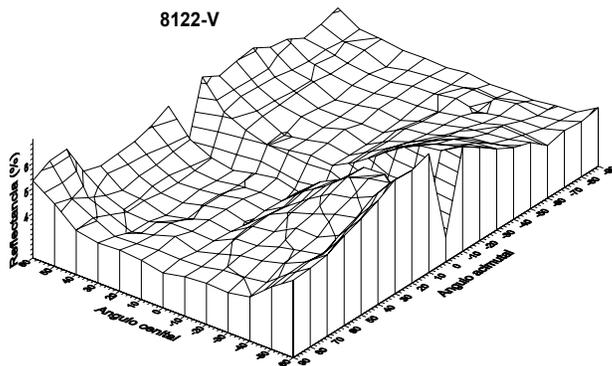
8112-V



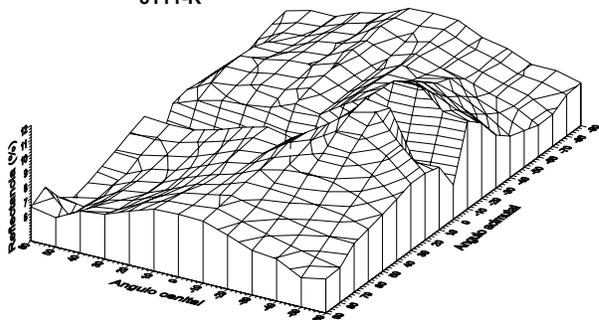
8121-V



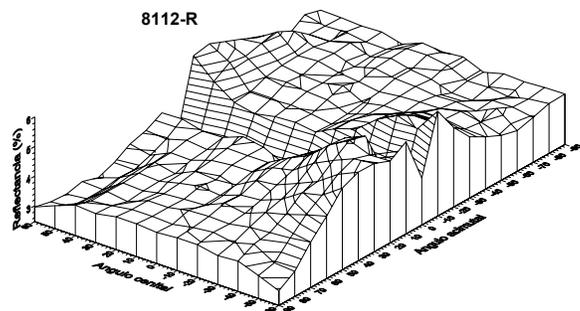
8122-V



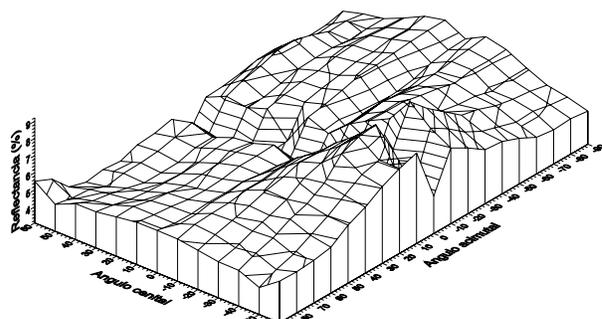
8111-R



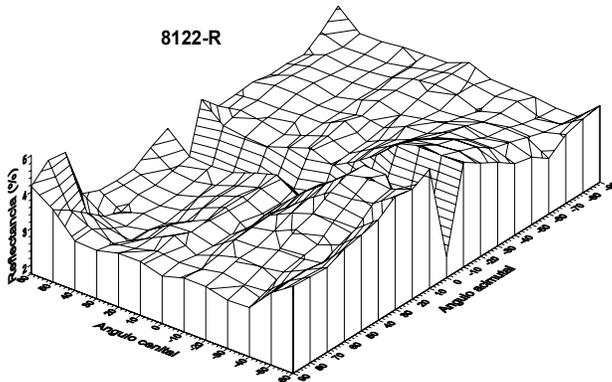
8112-R

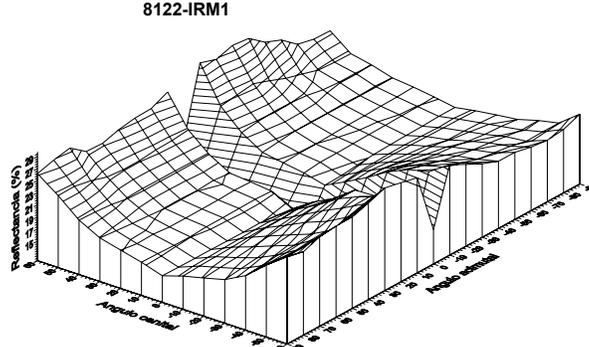
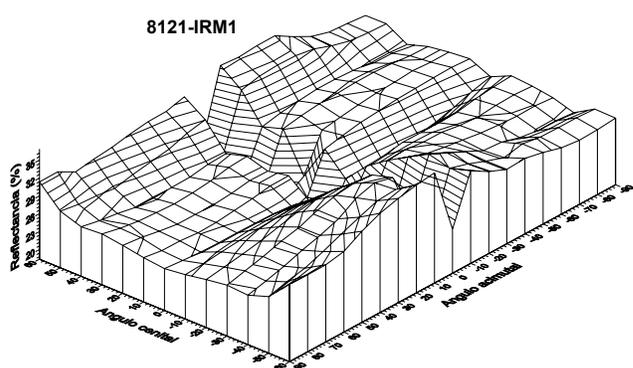
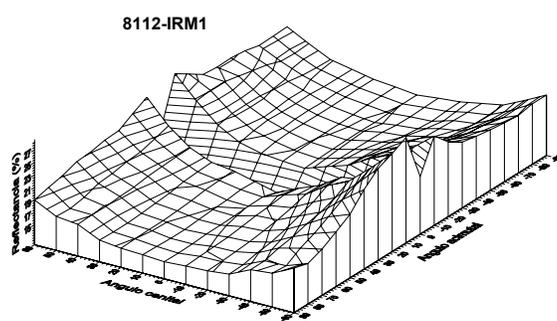
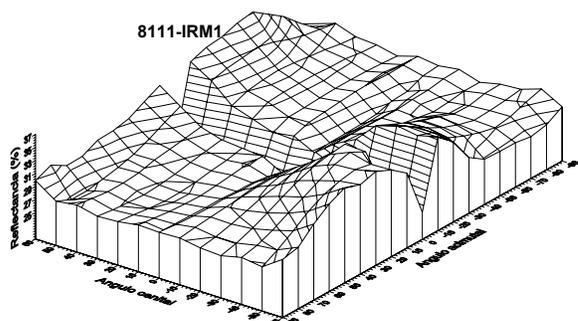
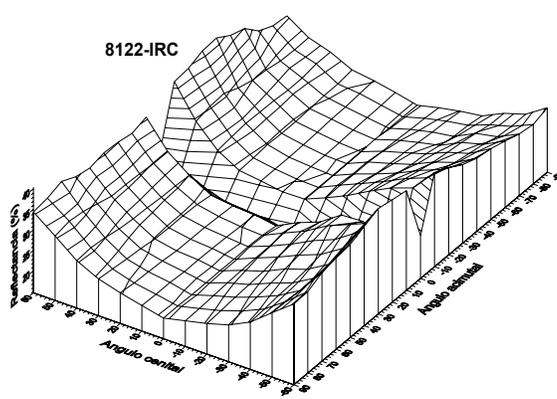
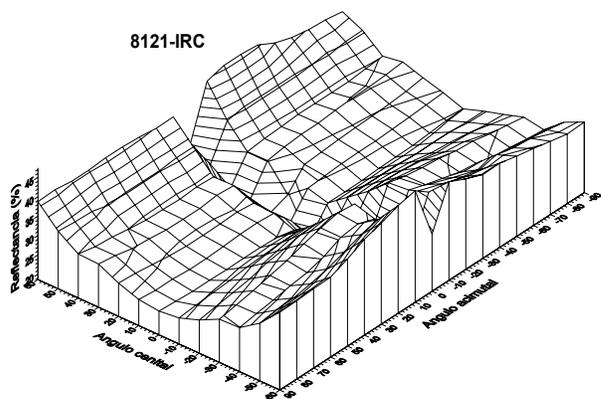
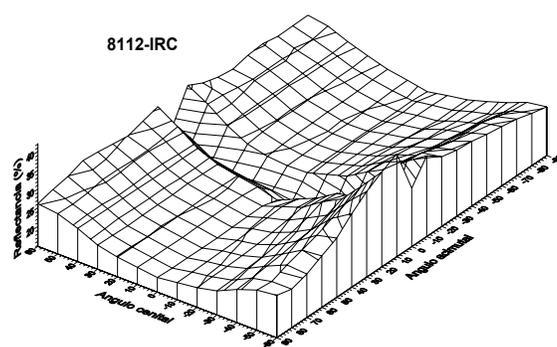
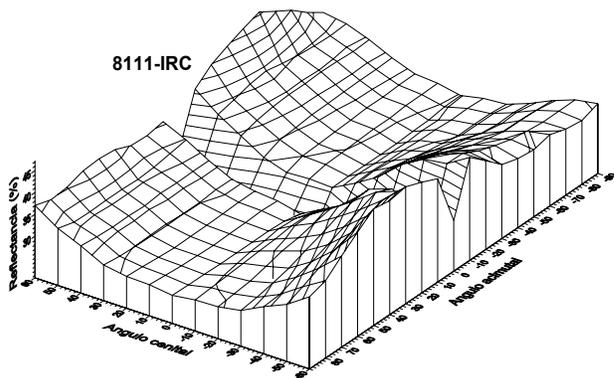


8121-R

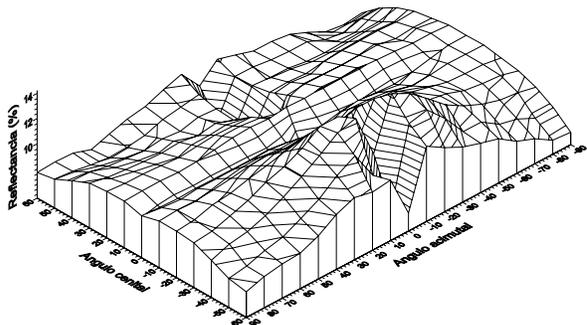


8122-R

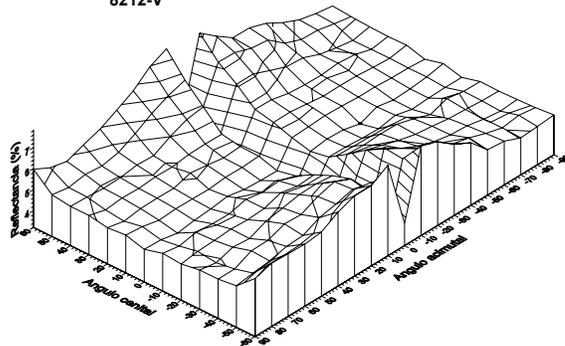




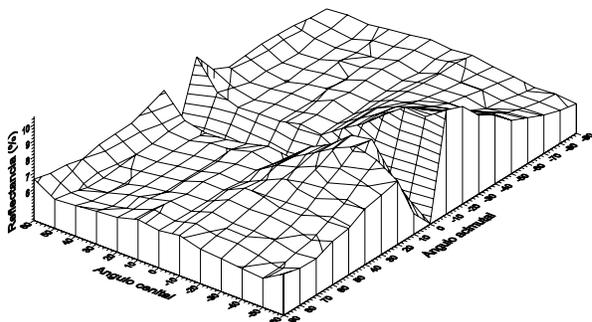
8211-V



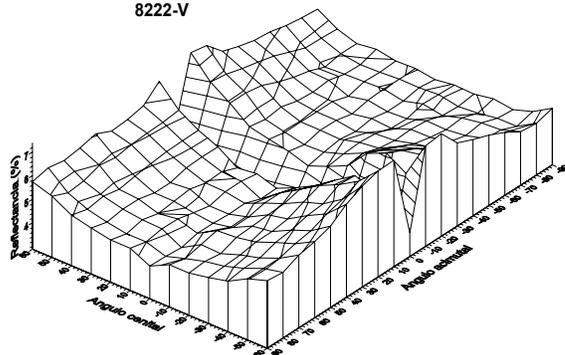
8212-V



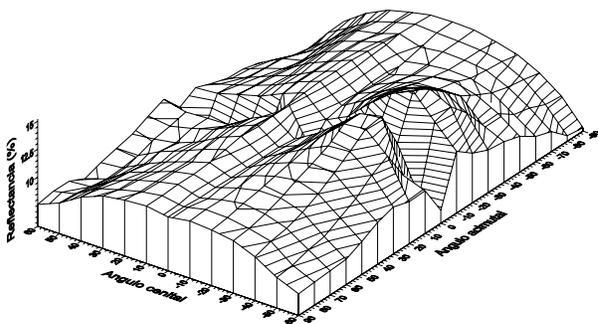
8221-V



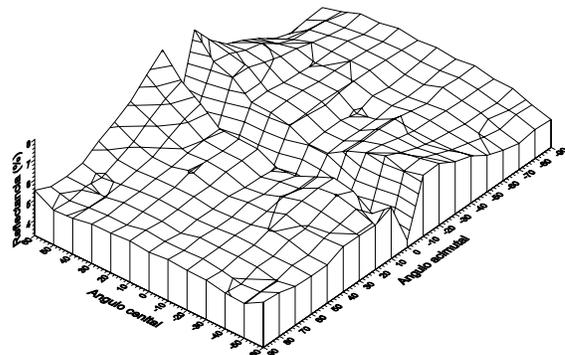
8222-V



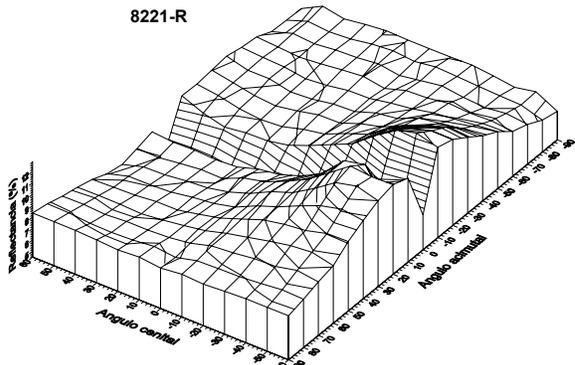
8211-R



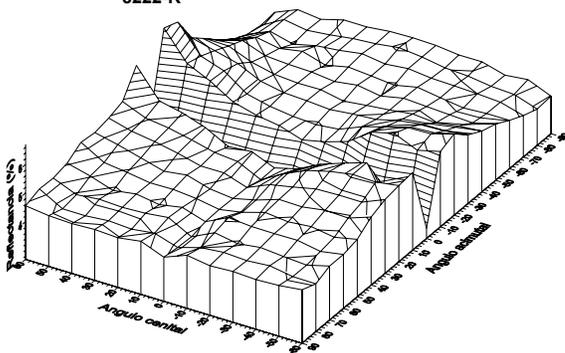
8212-R



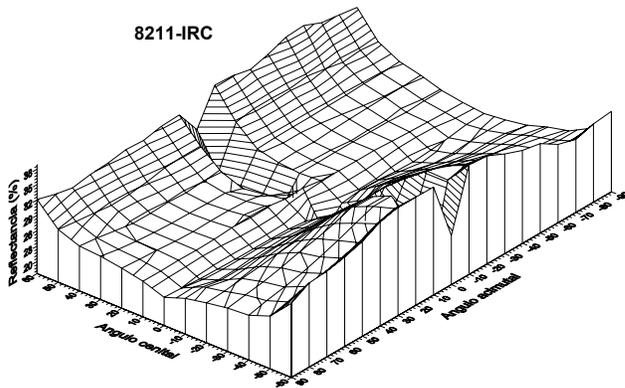
8221-R



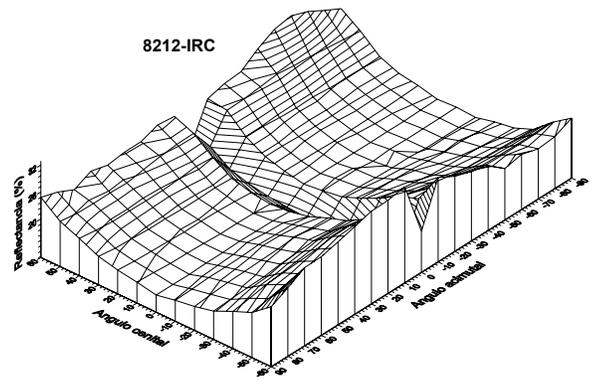
8222-R



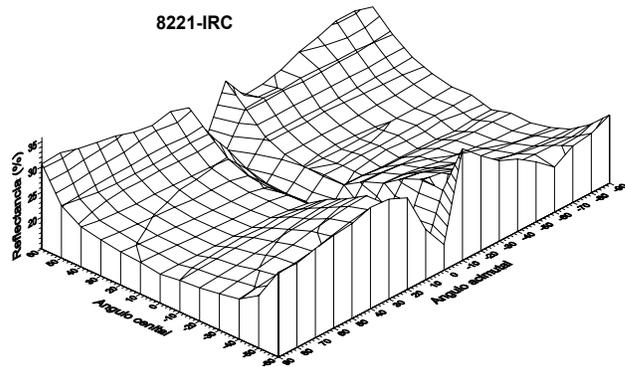
8211-IRC



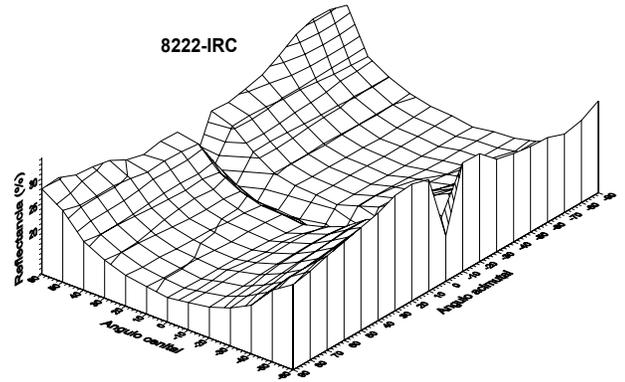
8212-IRC



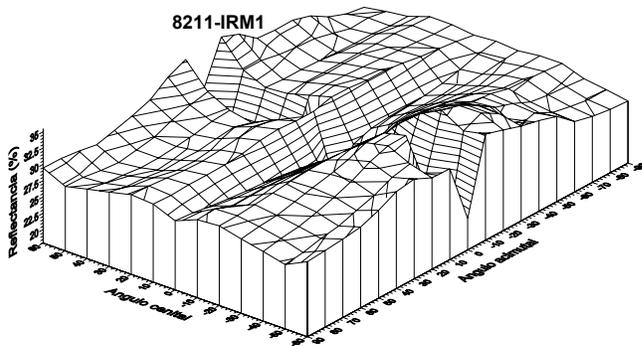
8221-IRC



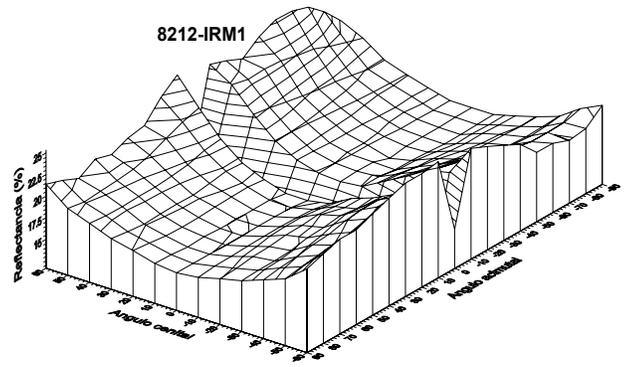
8222-IRC



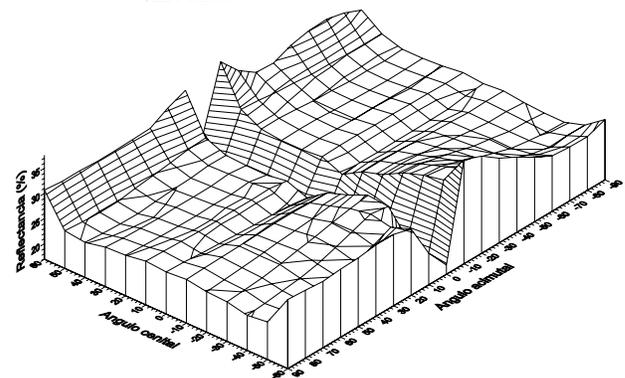
8211-IRM1



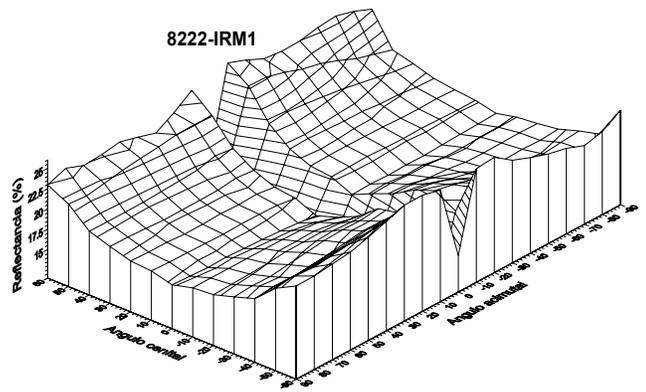
8212-IRM1



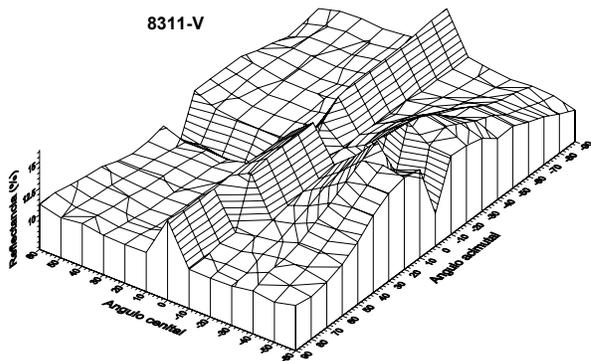
8221-IRM1



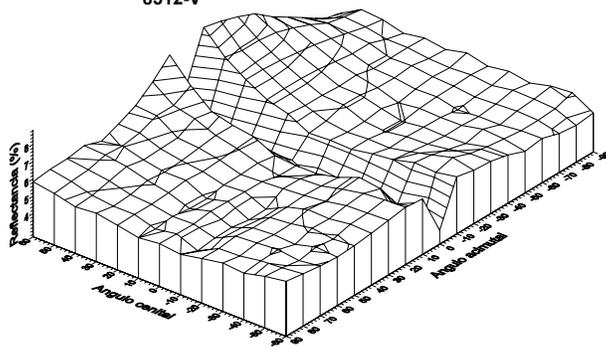
8222-IRM1



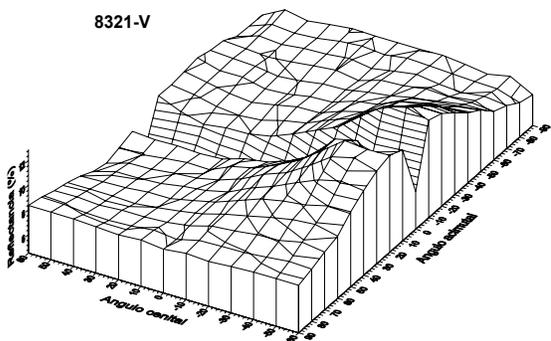
8311-V



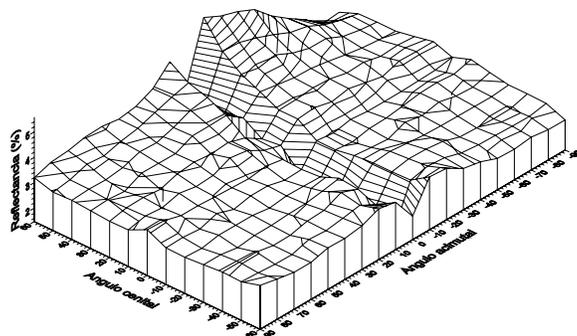
8312-V



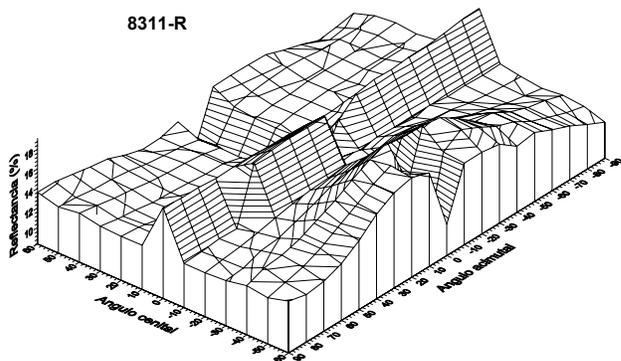
8321-V



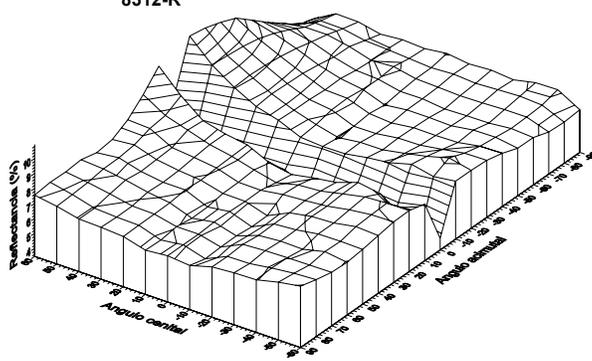
8322-V



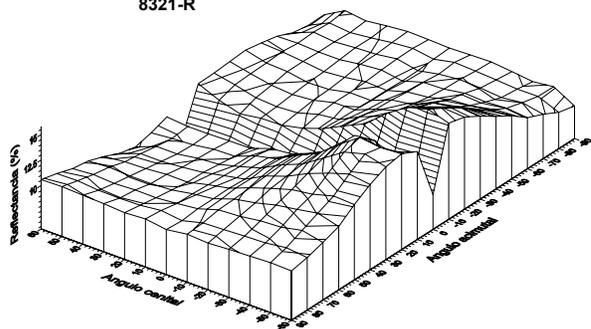
8311-R



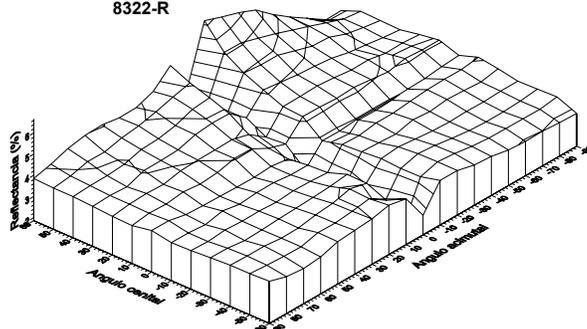
8312-R



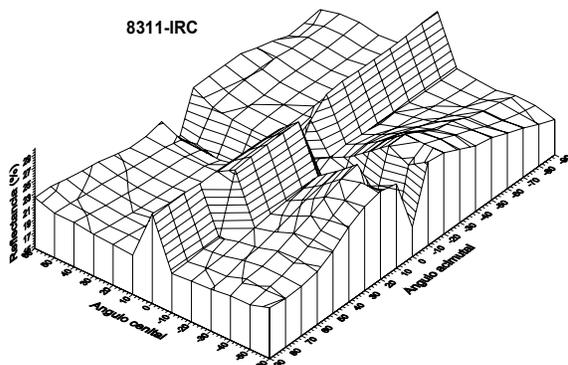
8321-R



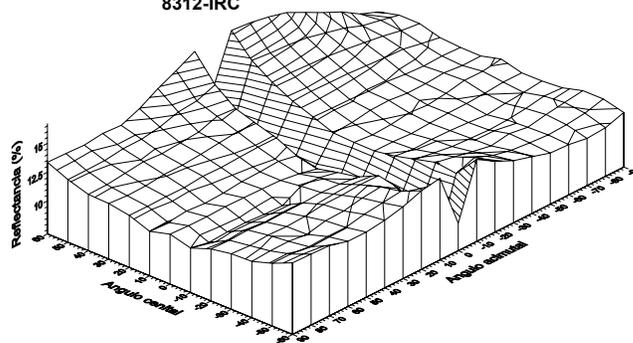
8322-R



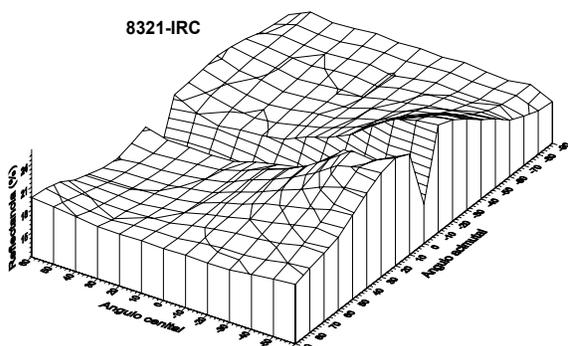
8311-IRC



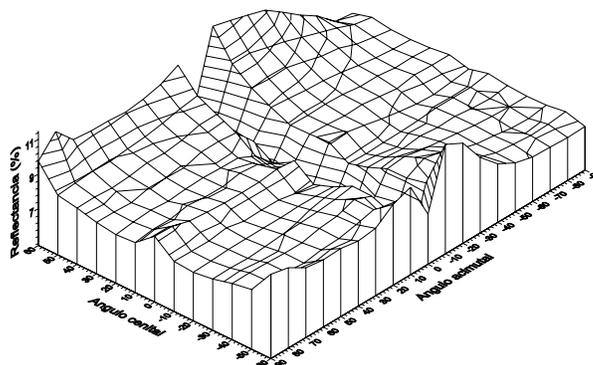
8312-IRC



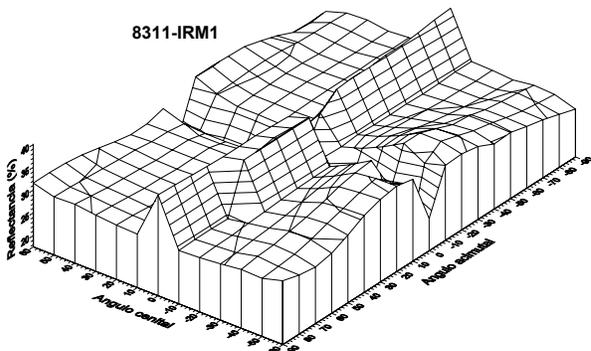
8321-IRC



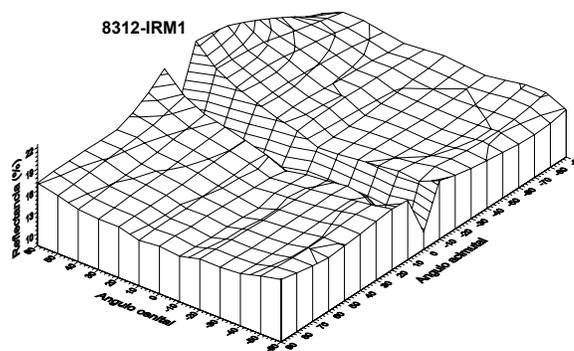
8322-IRC



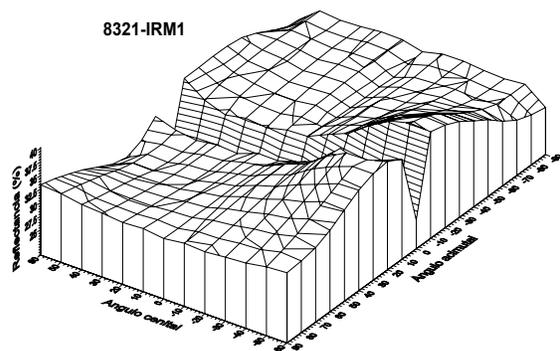
8311-IRM1



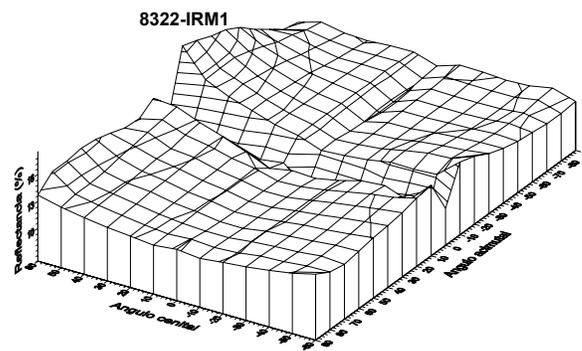
8312-IRM1



8321-IRM1



8322-IRM1



**ANEXO D. GRAFICAS POLARES DEL PARAMETRO B**

En el presente anexo se muestran las gráficas polares del parámetro B para cada una de las bandas utilizadas del satélite Landsat TM. La codificación puede ser consultada en el cuadro C-1 del anexo C.

Para cada especie y según la banda del satélite se agruparon las tres densidades medidas (alta, media, baja, respectivamente).

**Figura D-1. SUELO**

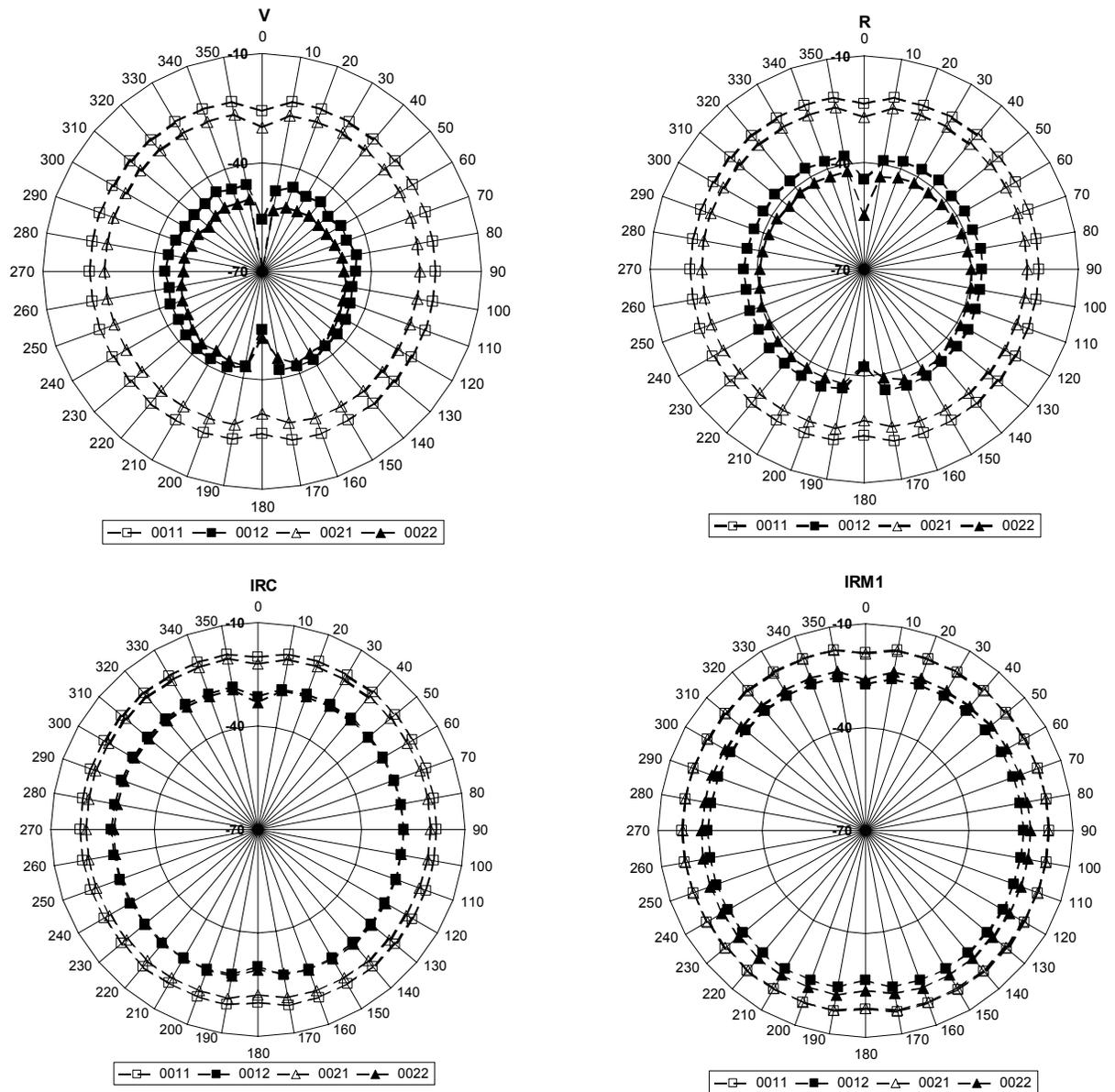
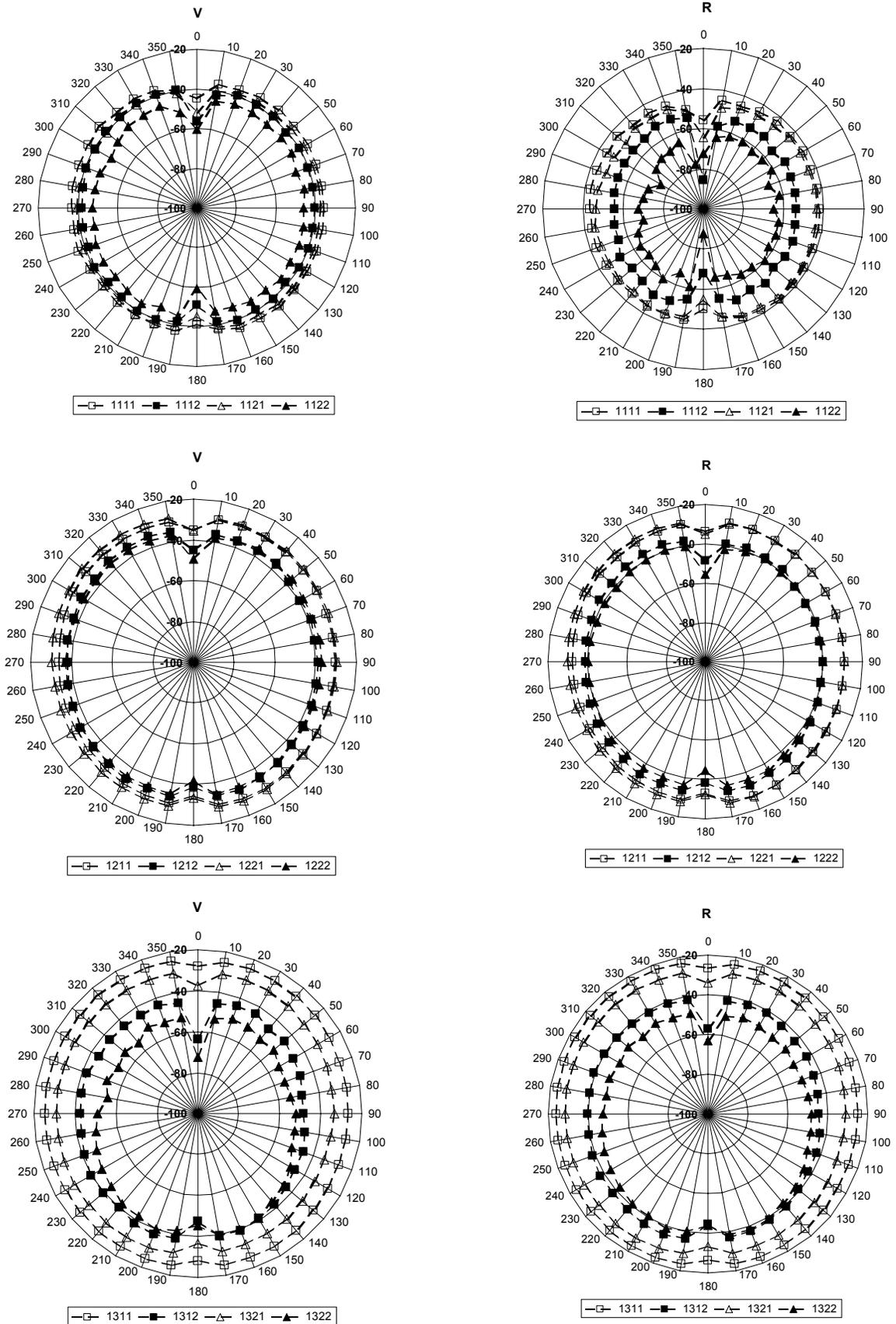


Figura D-2. Abies



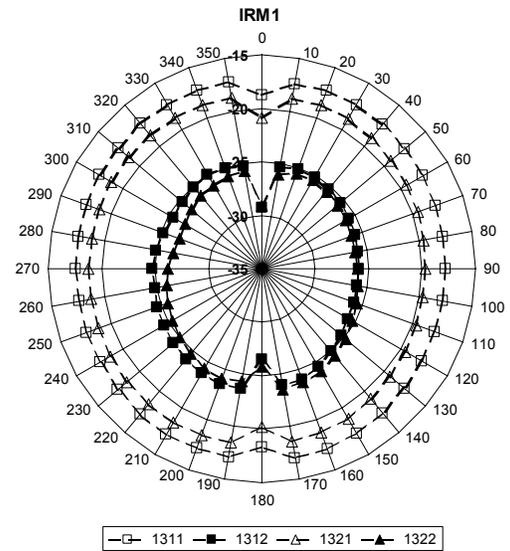
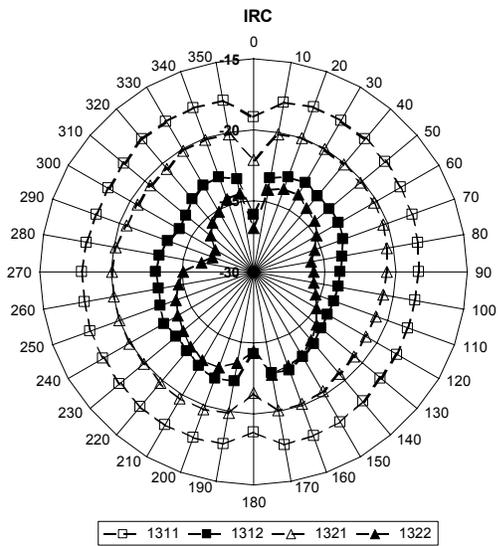
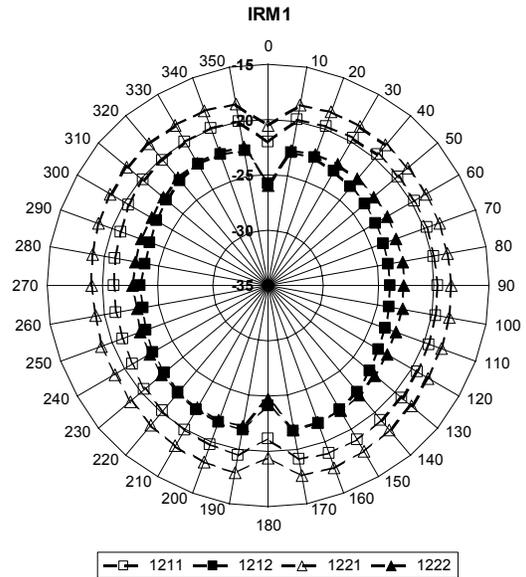
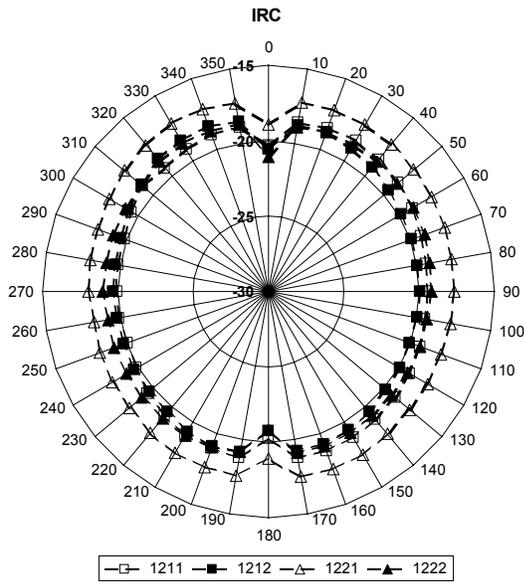
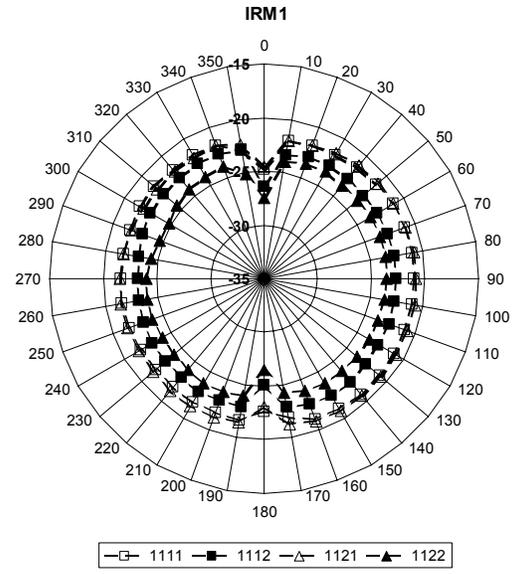
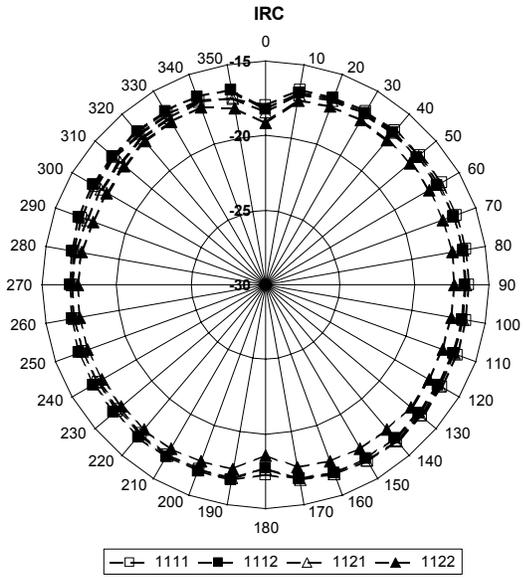
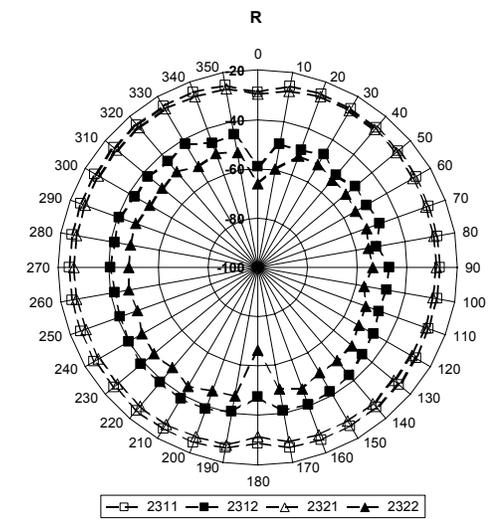
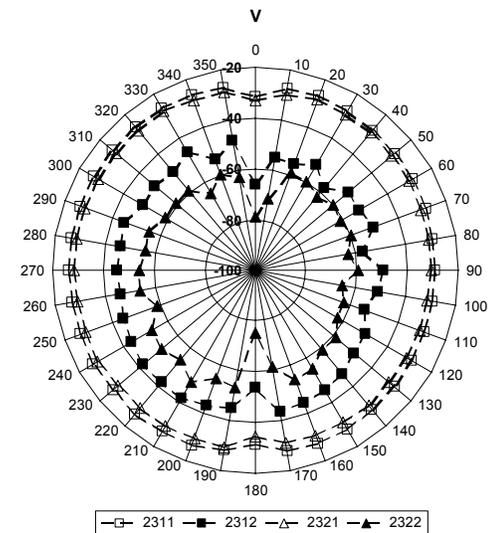
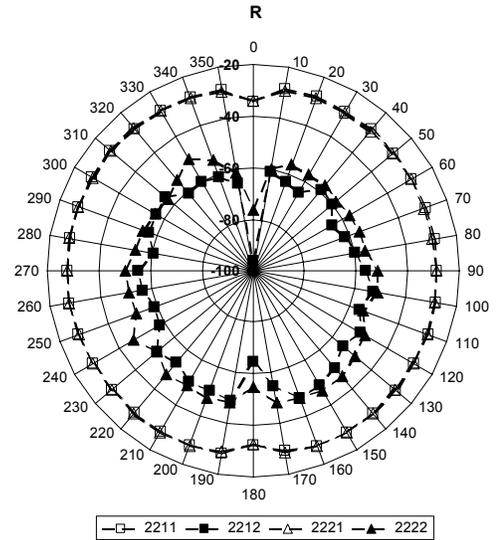
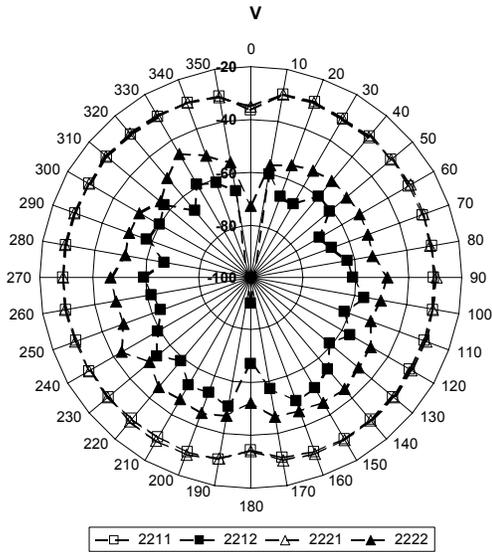
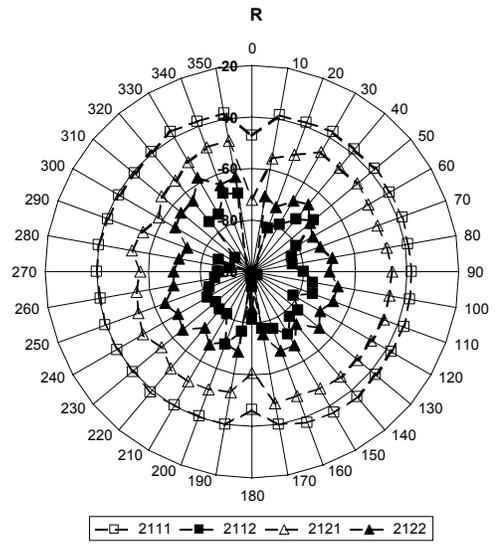
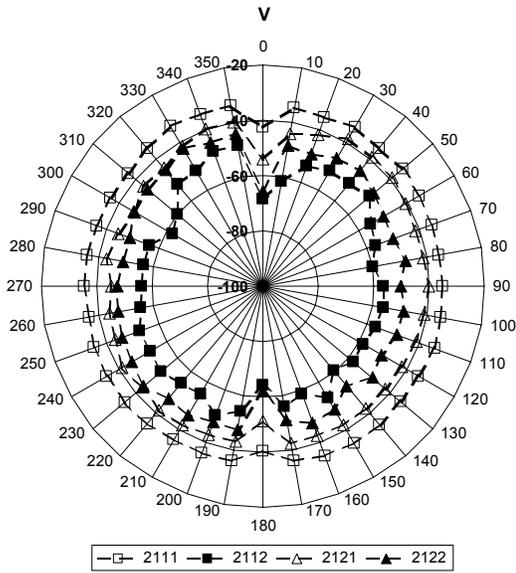


Figura D-3. Acacia



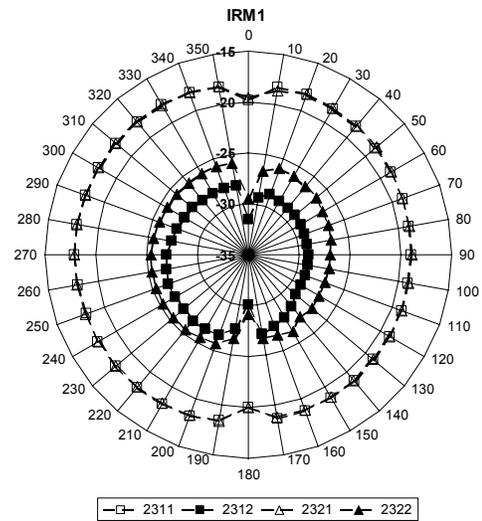
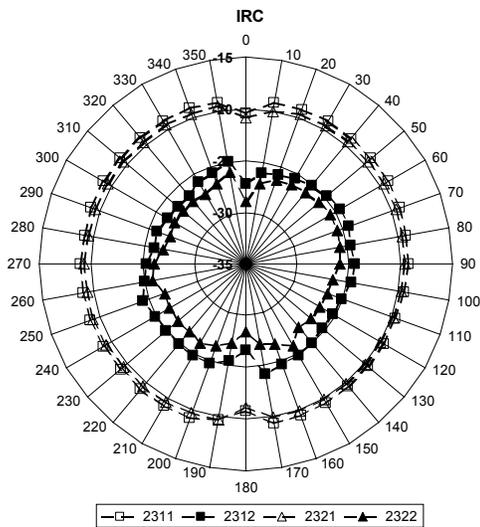
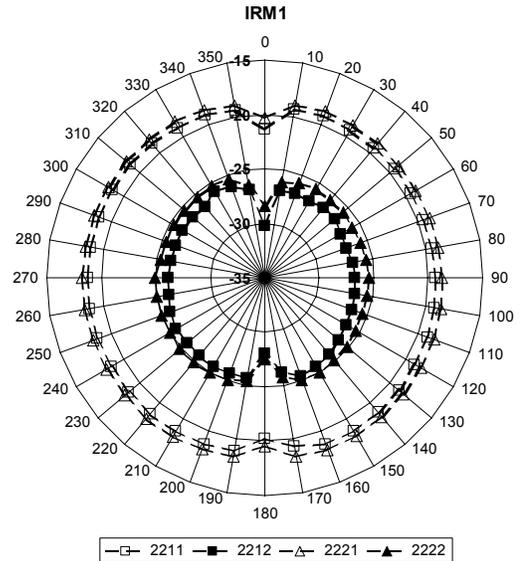
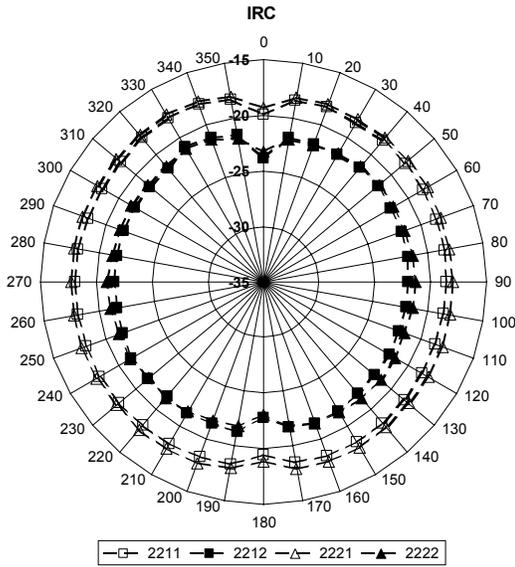
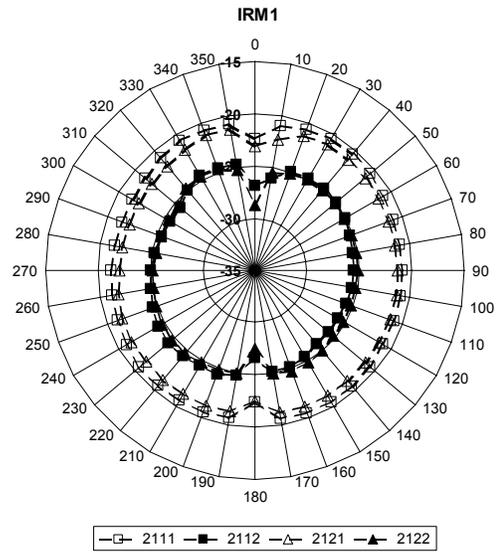
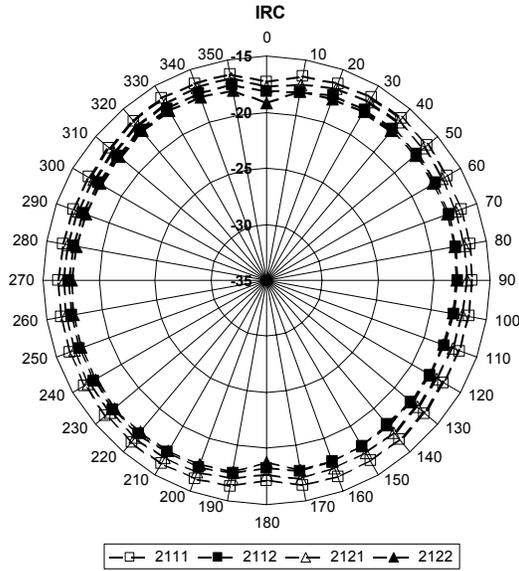
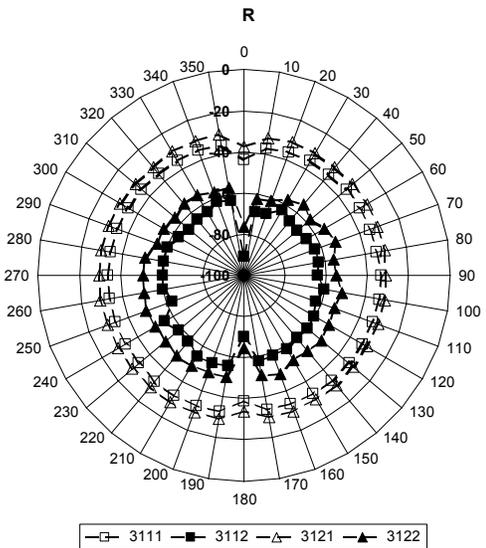
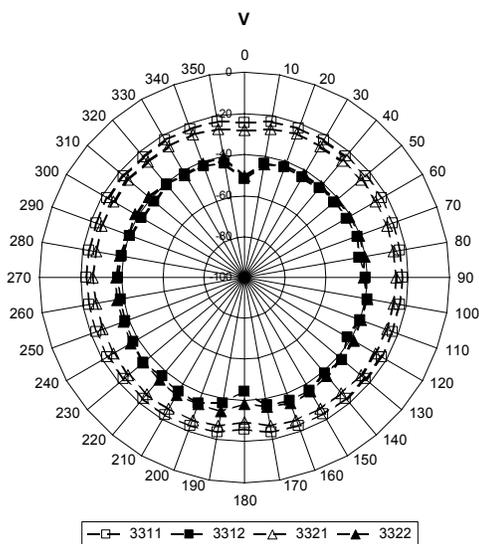
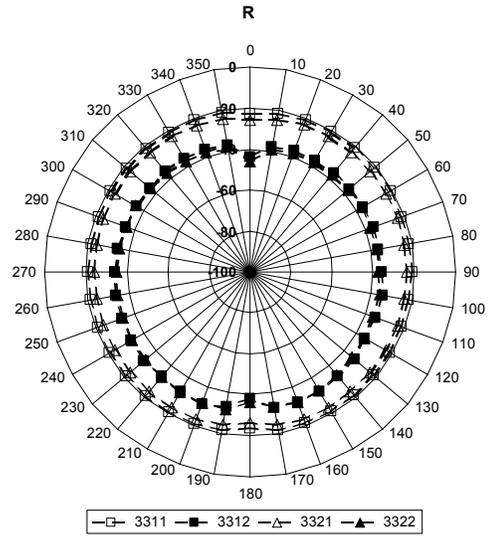
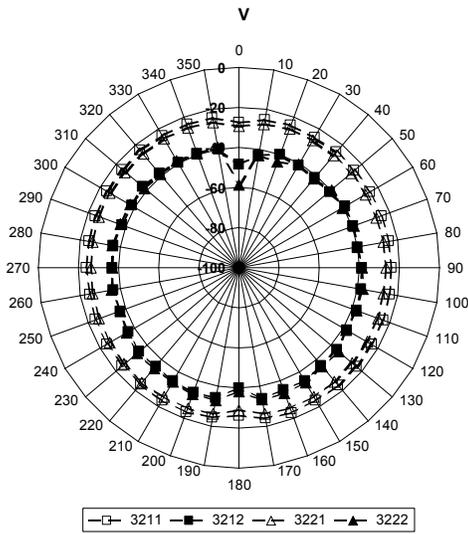
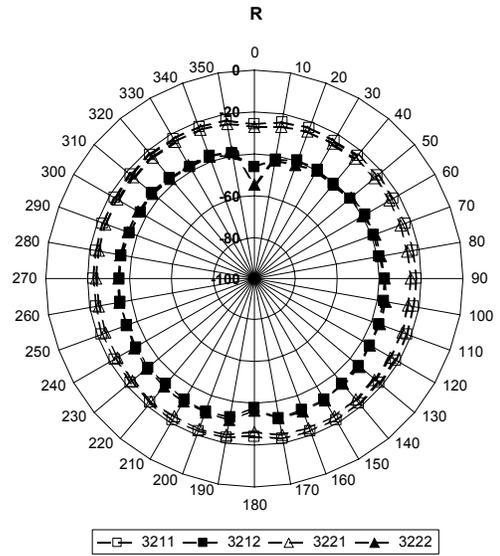
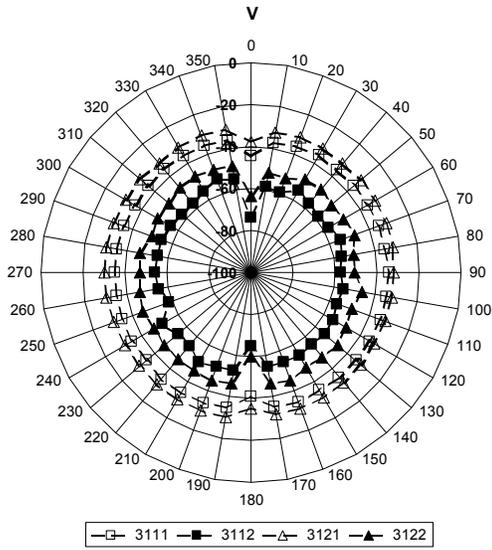


Figura D-4. Casuarina



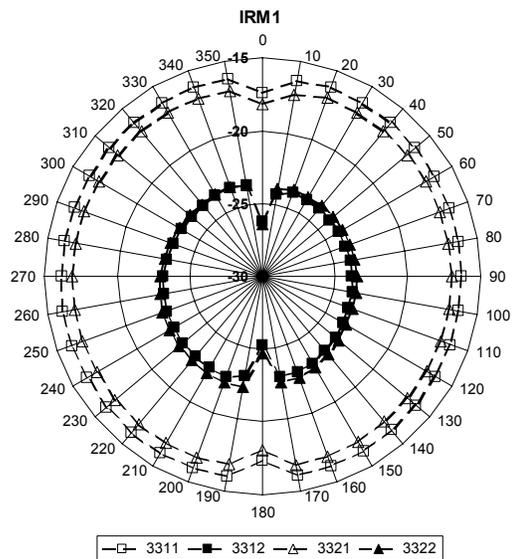
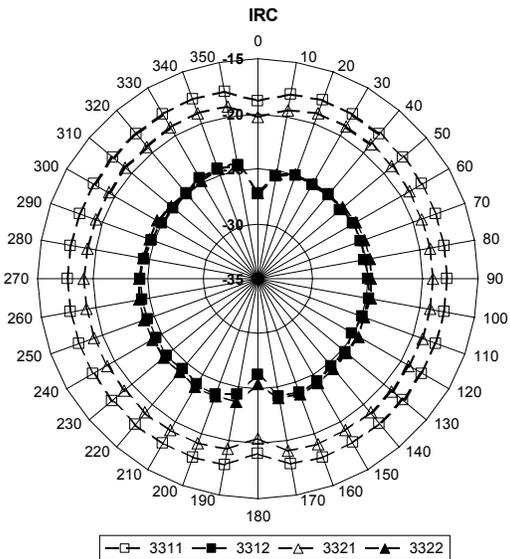
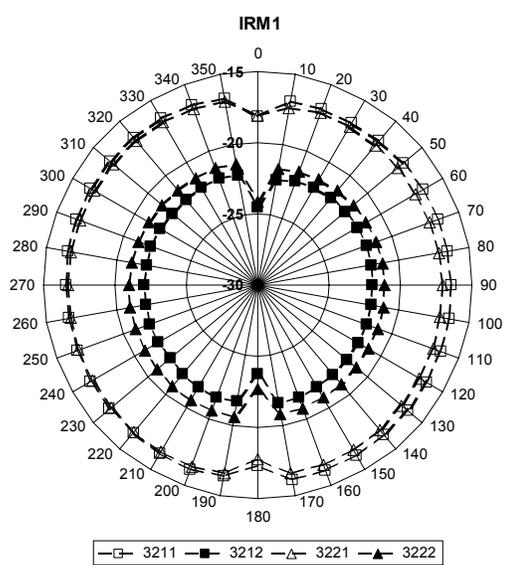
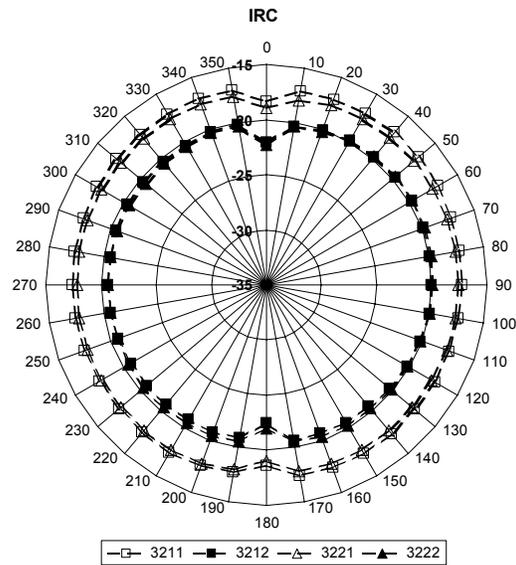
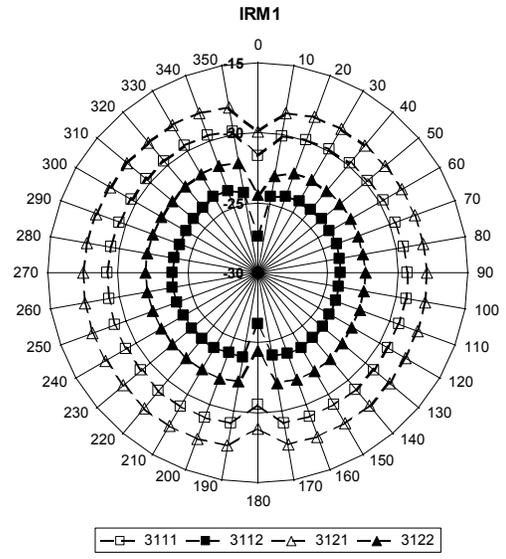
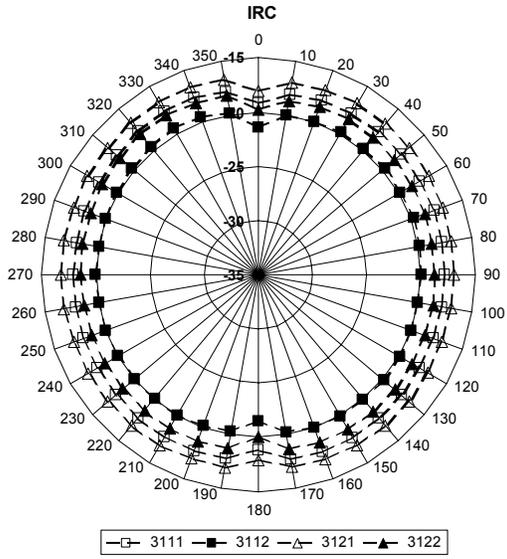
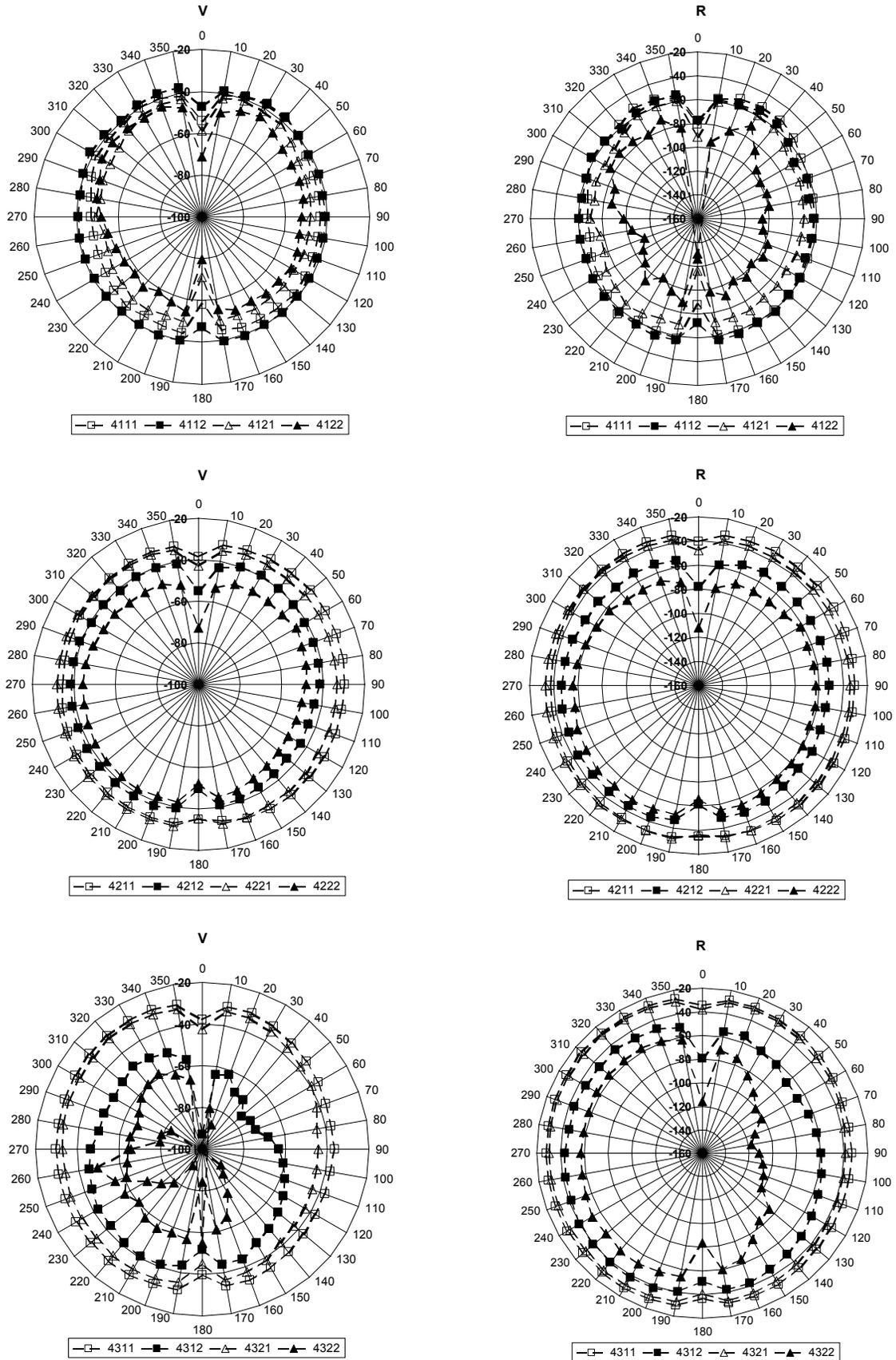


Figura D-5. Encino



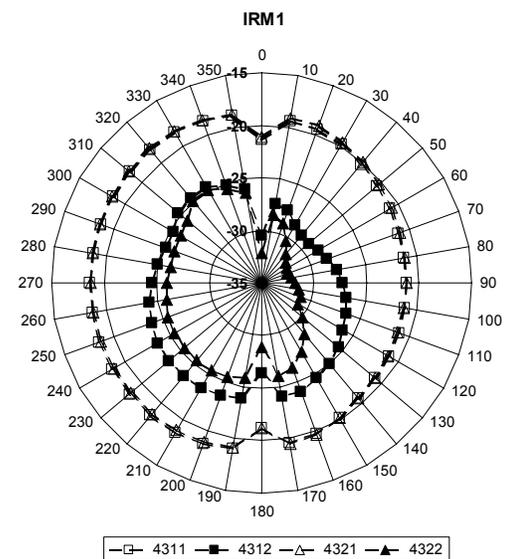
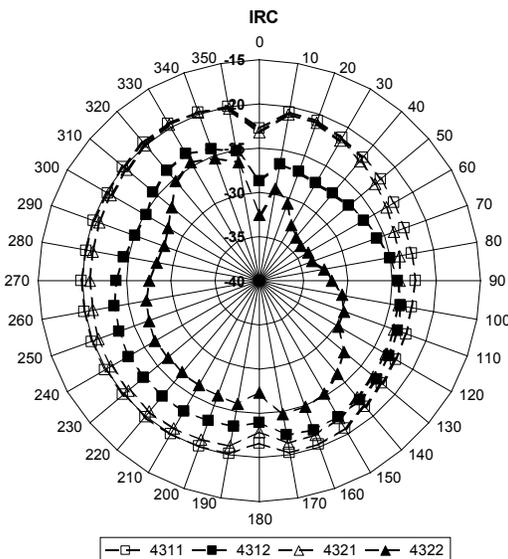
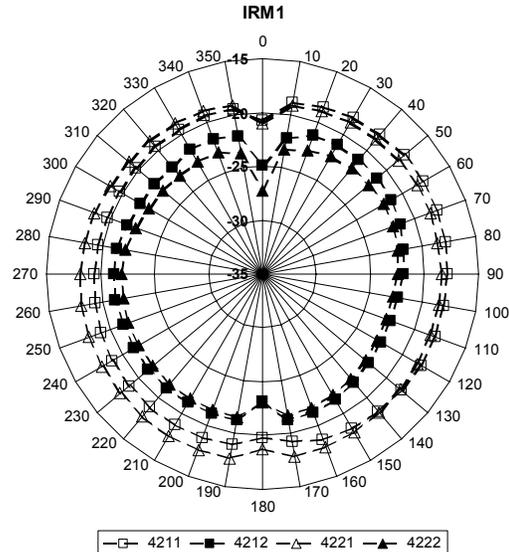
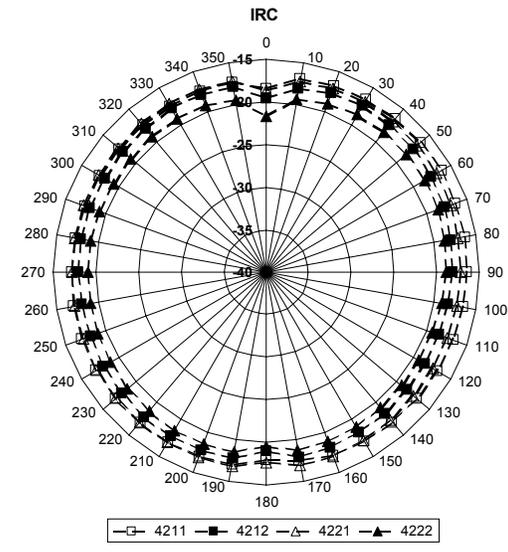
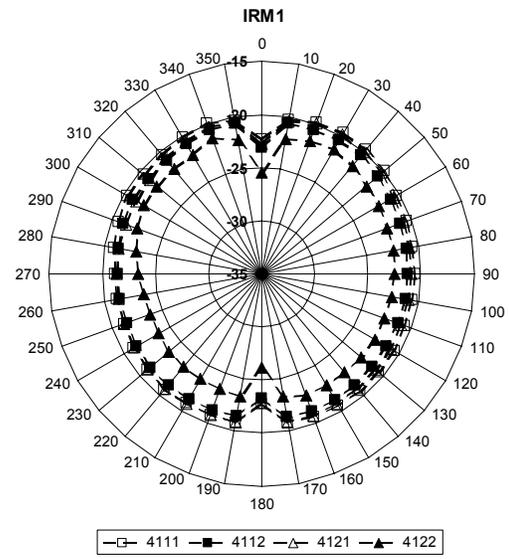
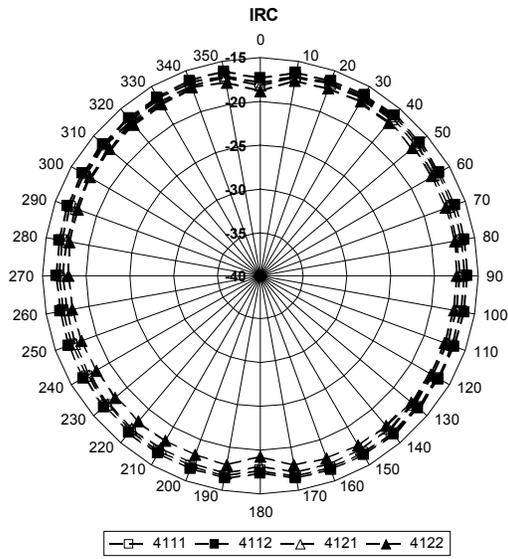
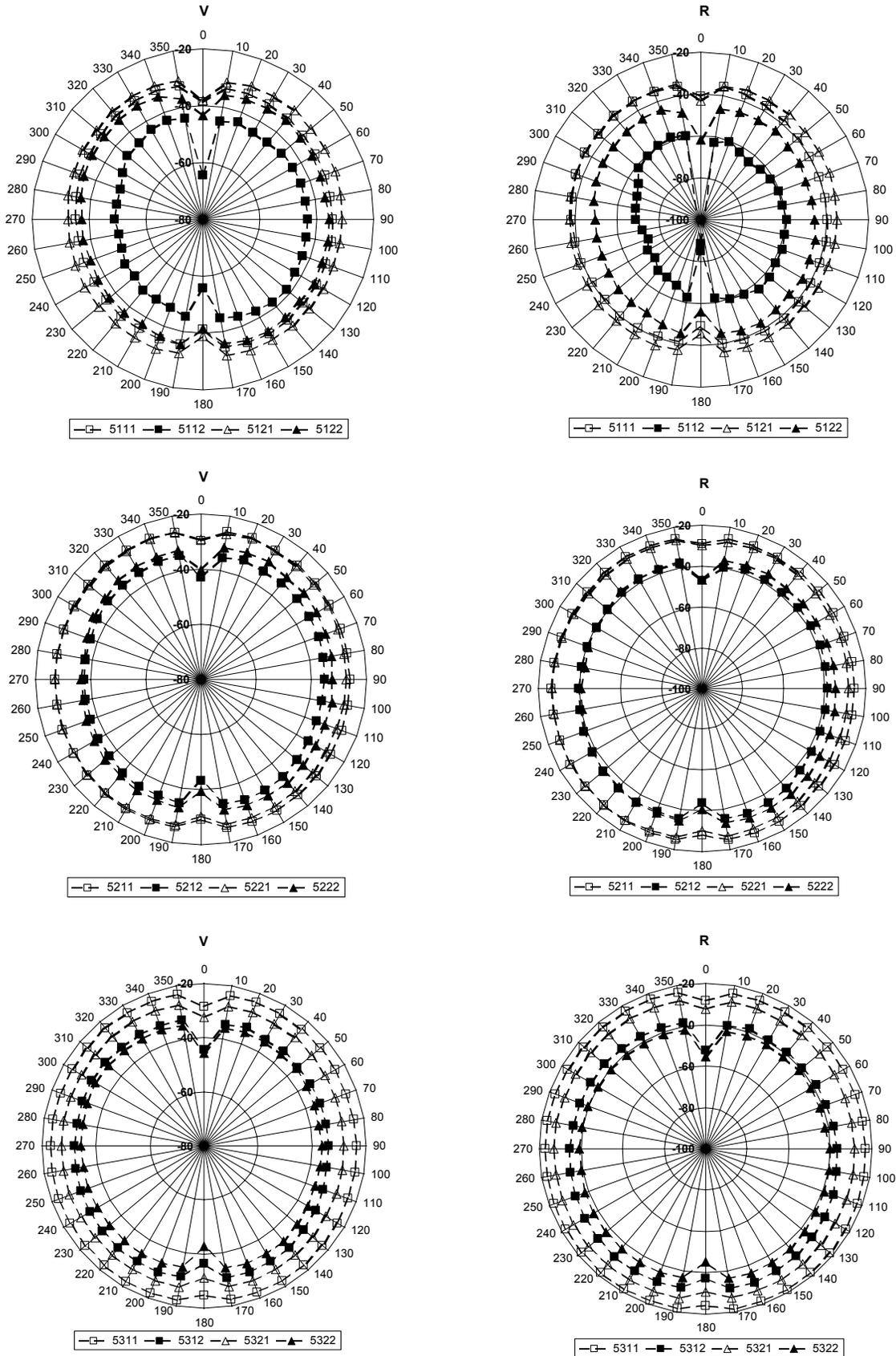


Figura D-6. Fresno



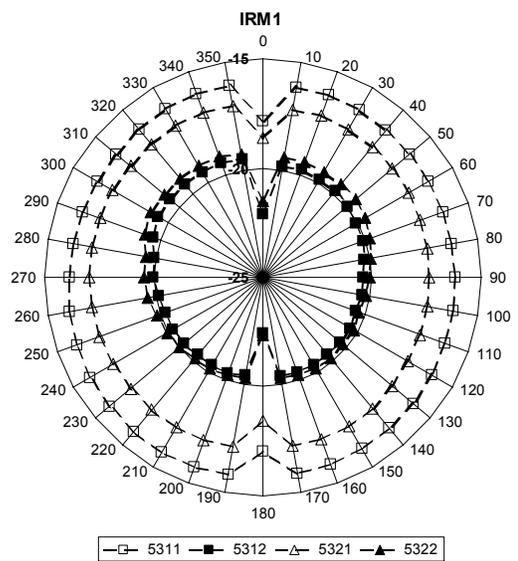
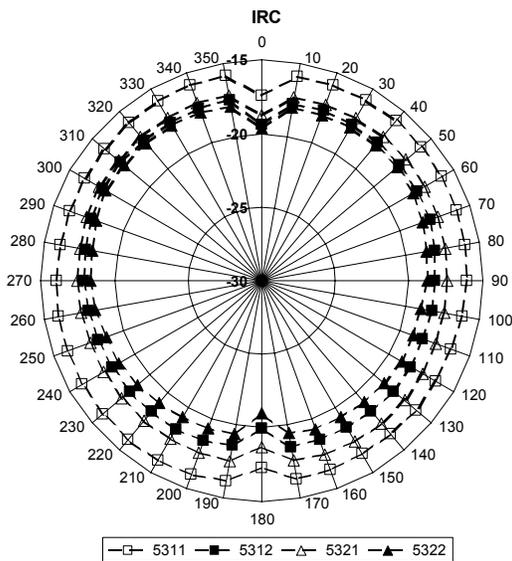
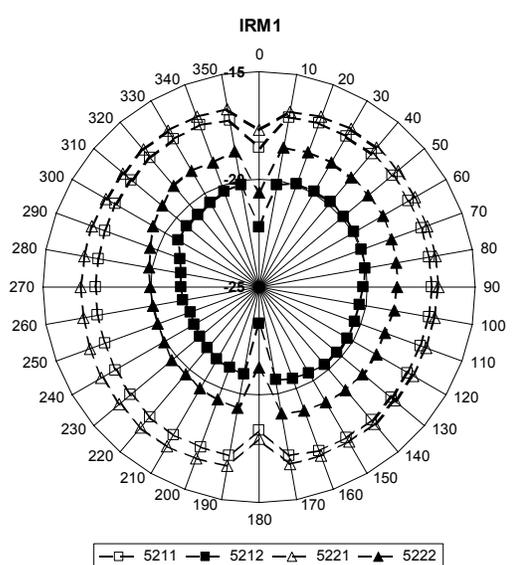
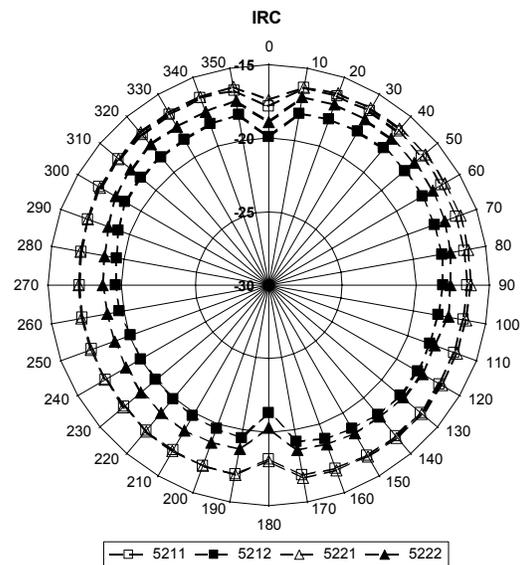
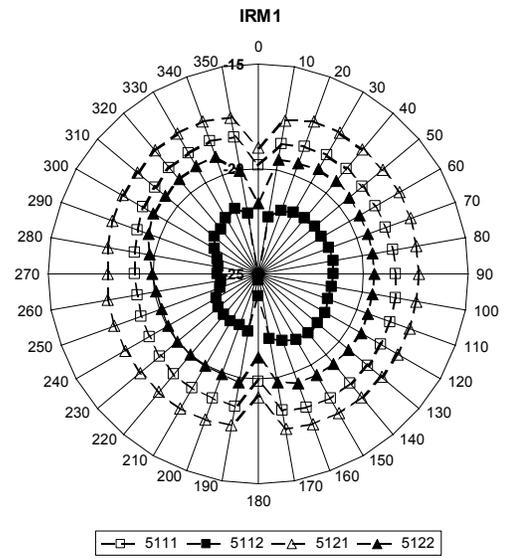
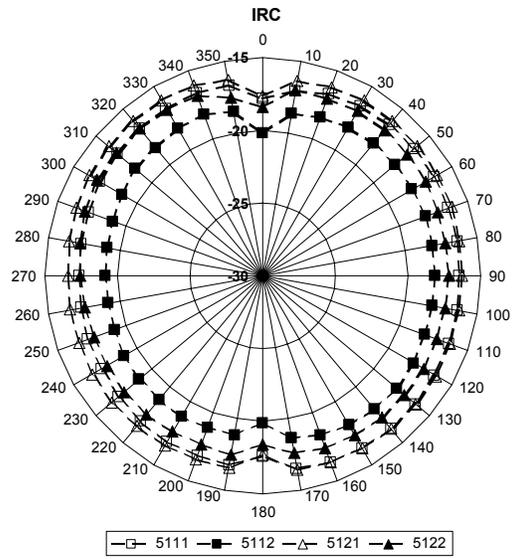
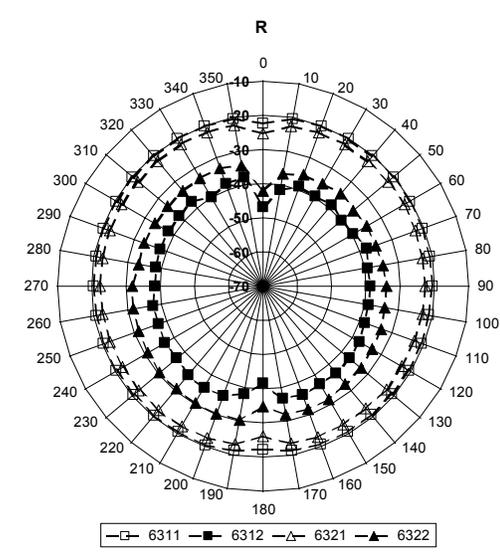
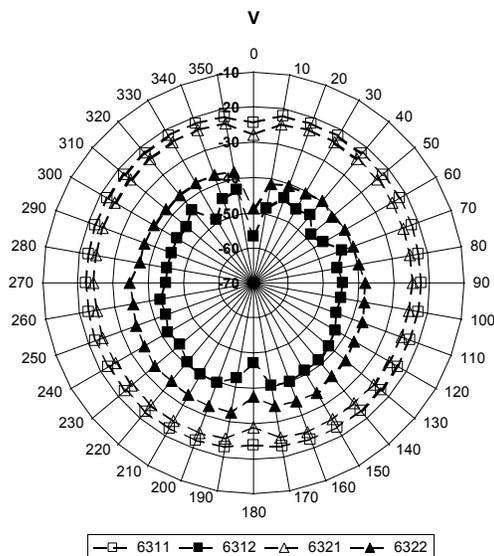
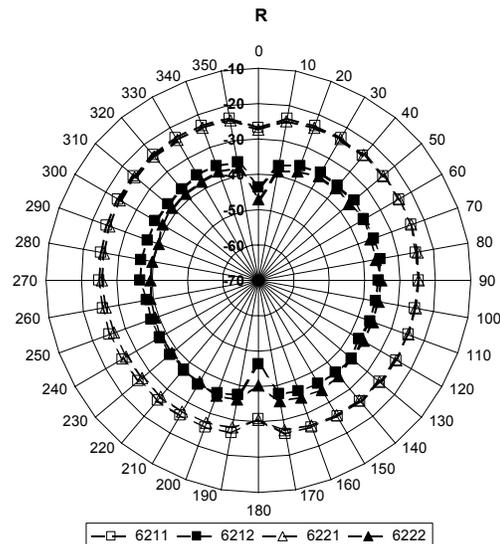
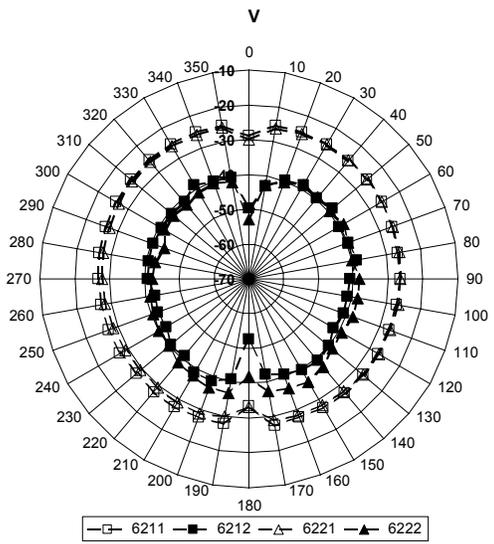
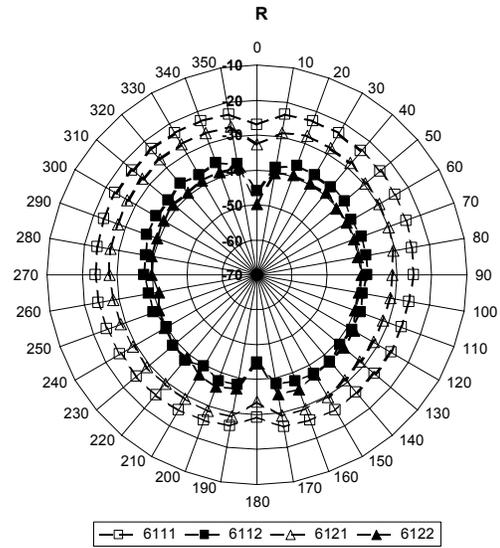
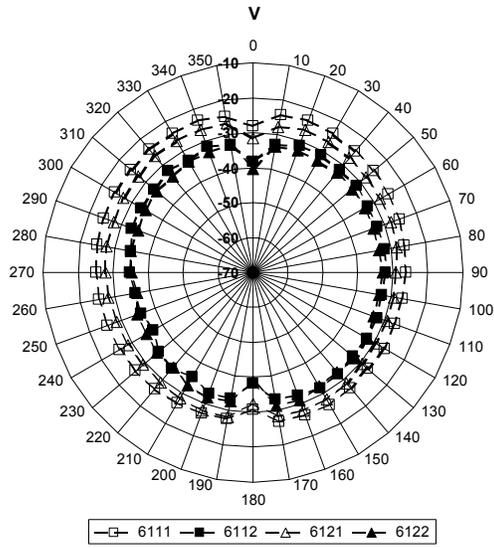


Figura D-7. Matorral



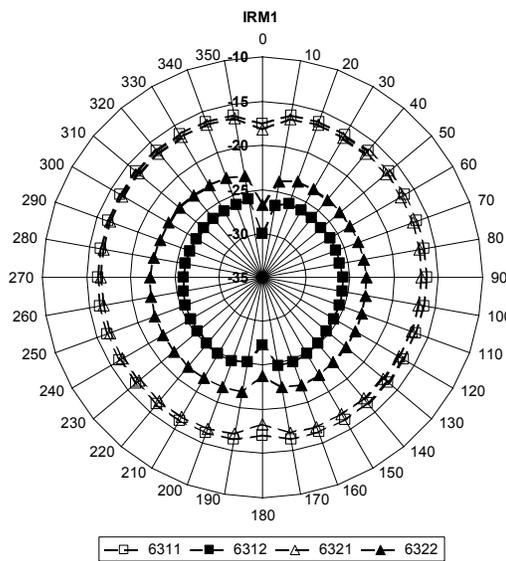
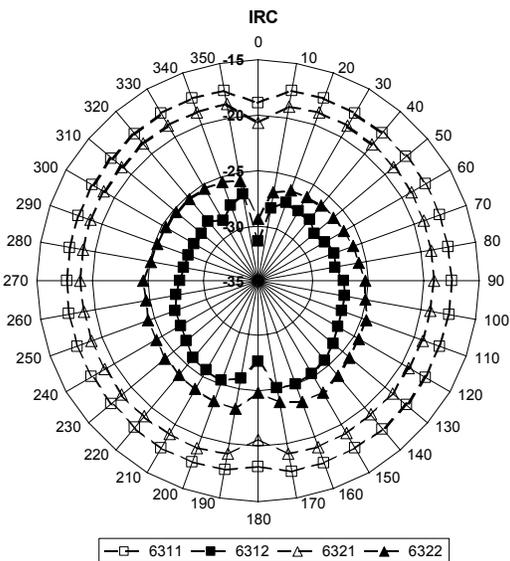
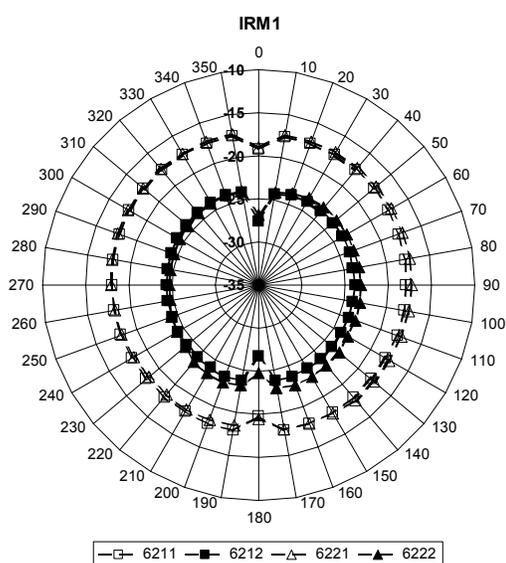
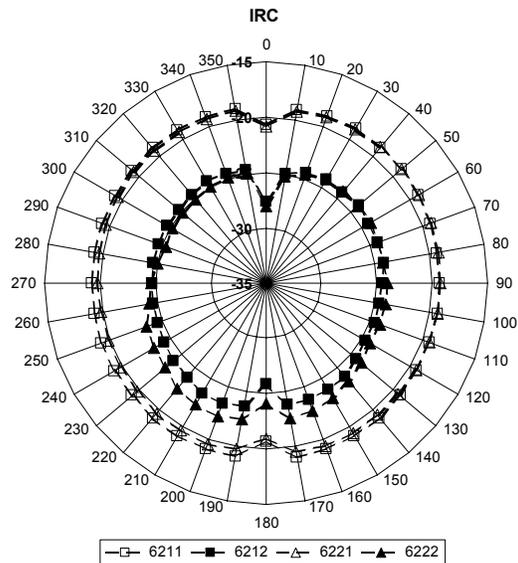
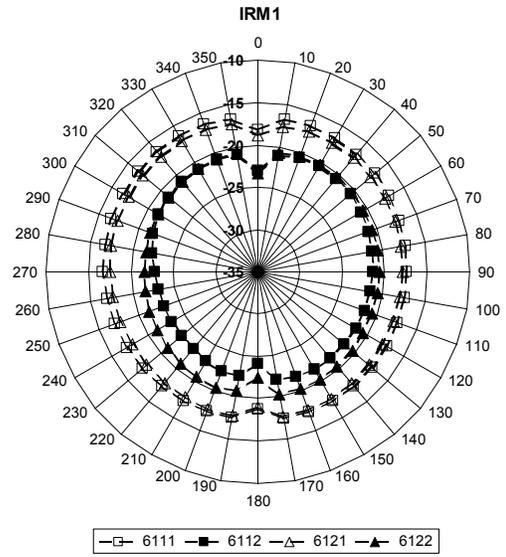
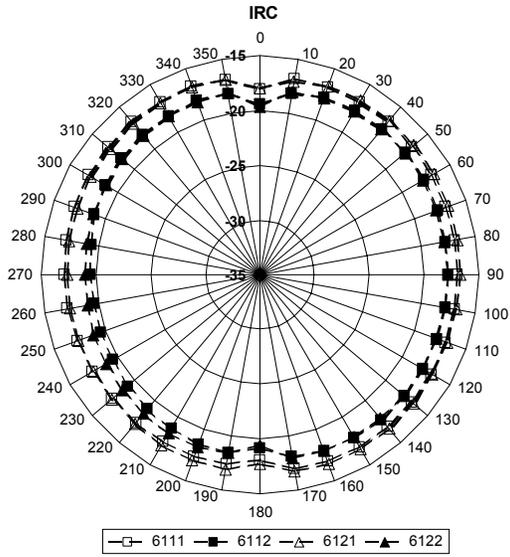
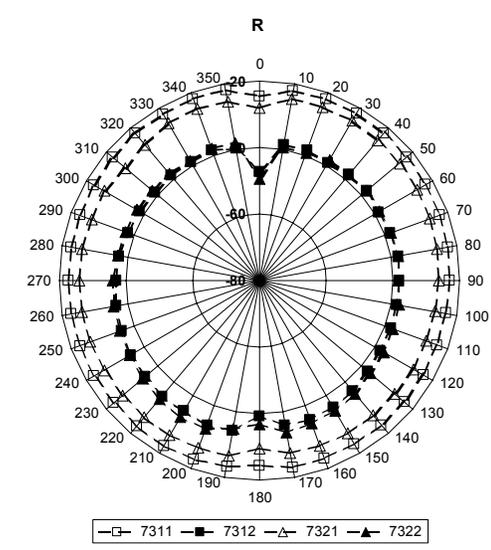
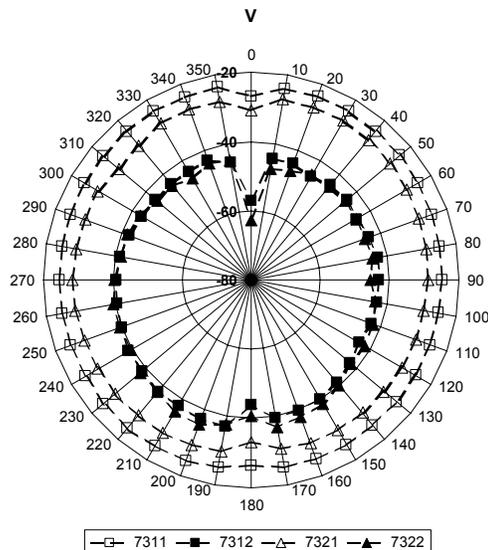
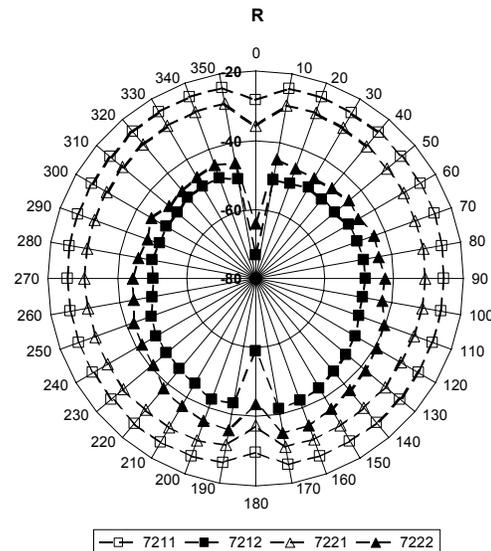
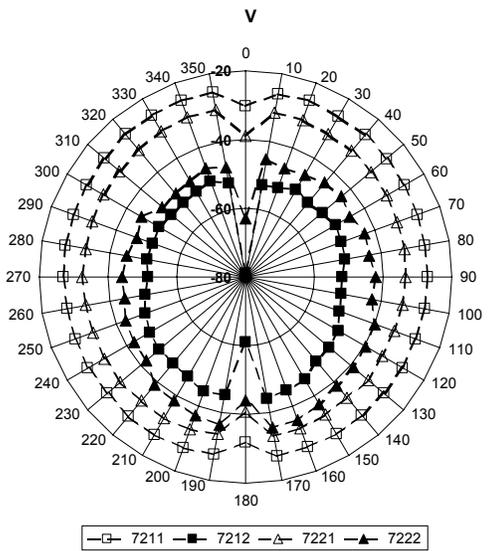
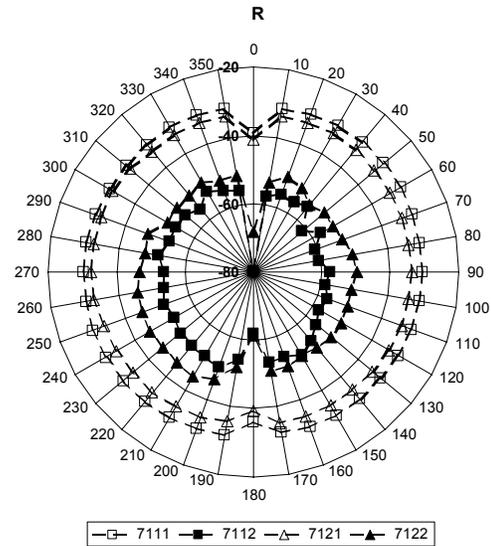
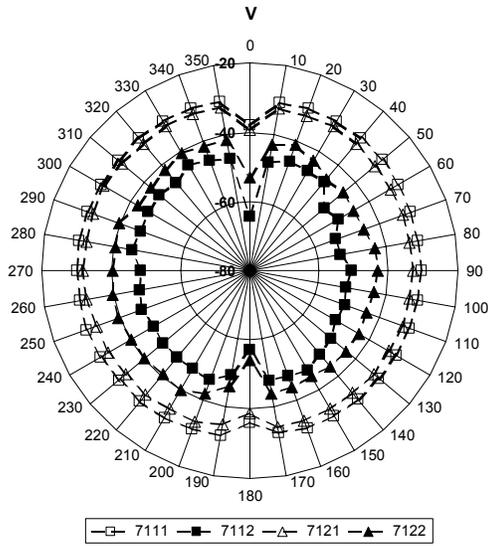


Figura D-8. Pino Greggii



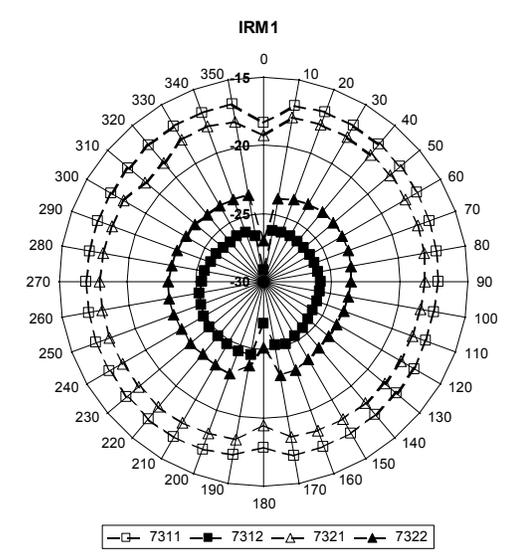
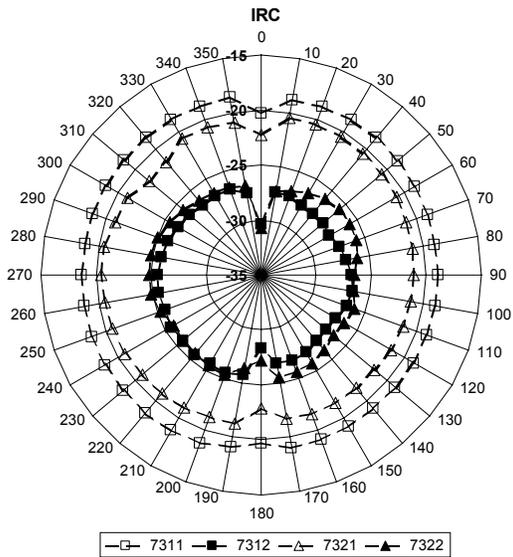
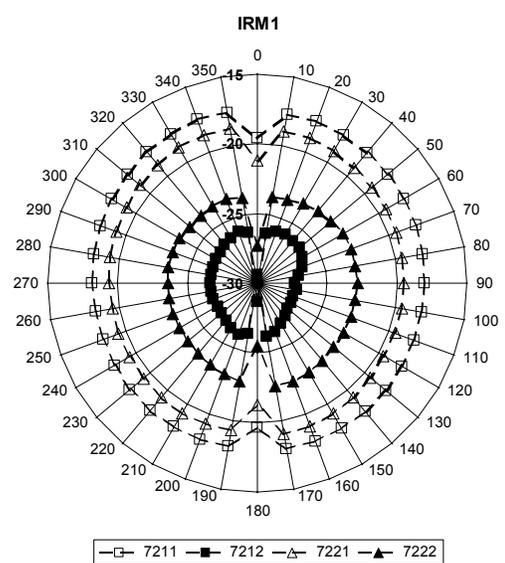
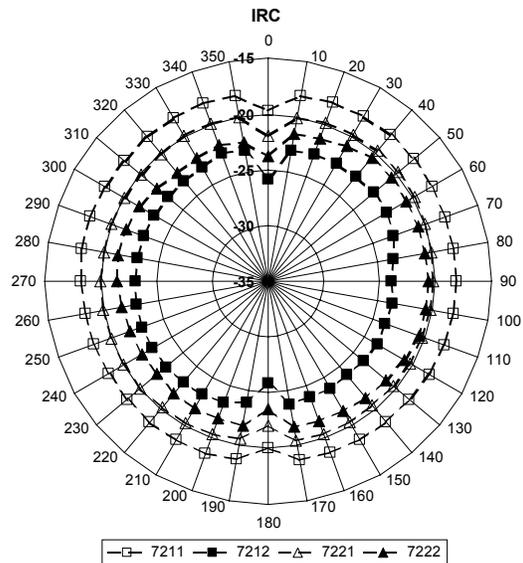
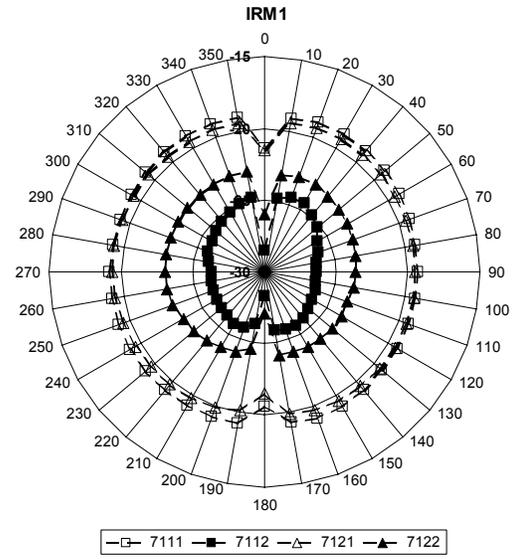
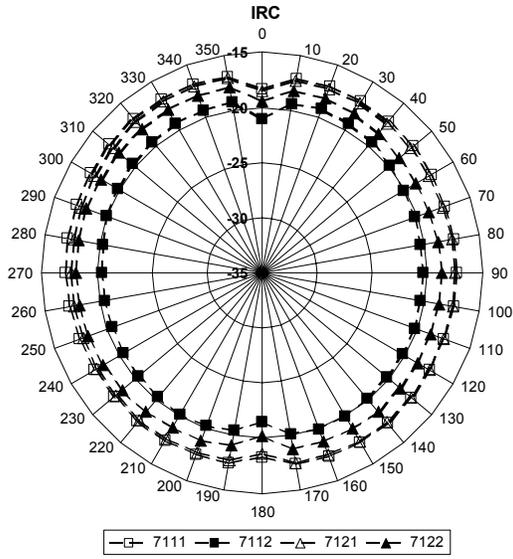


Figura D-9. Pastizal

