

UNIVERSIDAD DE CONCEPCION

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

Departamento de Manejo de Bosques y Medio Ambiente



**EFFECTO DE LA TOPOGRAFIA SOBRE LOS VALORES DIGITALES
DE LAS BANDAS MULTIESPECTRALES DEL SATELITE SPOT EN
RODALES DE *Eucalyptus globulus* Labill.**

Por

RAUL EDUARDO PARDO PINO

**MEMORIA PARA OPTAR
AL TITULO DE
INGENIERO FORESTAL**

**CONCEPCION - CHILE
1998**

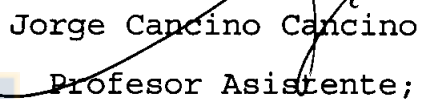
EFFECTO DE LA TOPOGRAFIA SOBRE LOS VALORES DIGITALES DE LAS
BANDAS MULTIESPECTRALES DEL SATELITE SPOT EN RODALES DE
Eucalyptus globulus Labill.

Profesor Asesor



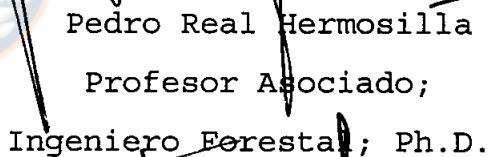
David González Lanteri
Profesor Asistente;
Ingeniero Forestal; M.Sc.

Profesor Asesor



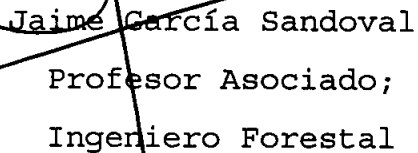
Jorge Cancino Cancino
Profesor Asistente;
Ingeniero Forestal; M.Sc.

Director de Departamento



Pedro Real Hermosilla
Profesor Asociado;
Ingeniero Forestal; Ph.D.

Decano de la Facultad
de Ciencias forestales



Jaime García Sandoval
Profesor Asociado;
Ingeniero Forestal

Calificación de la memoria de título:

David González Lanteri: Cincuenta y uno puntos

Jorge Cancino Cancino: Cincuenta y uno puntos

INDICE DE MATERIAS

CAPITULOS	PAGINA
I INTRODUCCION.....	1
II METODOLOGIA.....	10
2.1 Descripción del área de estudio.....	10
2.2 Generación de planos.....	11
2.3 Generación de información base.....	11
2.3.1 Información topográfica.....	11
2.3.2 Información dasométrica.....	12
2.3.3 Información satelital.....	12
2.4 Geometría de observación.....	13
2.5 Análisis estadístico.....	19
III RESULTADOS Y DISCUSION.....	21
3.1 Análisis global de los datos.....	21
3.2 Análisis por exposición.....	27
IV CONCLUSIONES.....	33
V RESUMEN.....	34
VI SUMMARY.....	35
VII BIBLIOGRAFIA.....	36
VIII APENDICE.....	38

INDICE DE TABLAS

TABLA N°	PAGINA
<u>En el texto</u>	
1 Regiones del espectro electromagnético.....	3
2 Características del sensor HRV-SPOT.....	4
<u>En el Apéndice</u>	
1A Parámetros estadísticos de los ajustes entre la pendiente y los valores de reflectancia del modo multiespectral por banda.....	39
2A Parámetros estadísticos de los ajustes entre la exposición y los valores de reflectancia del modo multiespectral por banda.....	39
3A Parámetros estadísticos de los ajustes entre el ángulo solar y los valores de reflectancia del modo multiespectral por banda.....	40
4A Parámetros estadísticos de los ajustes entre el ángulo de visión y los valores de reflectancia del modo multiespectral por banda.....	40
5A Parámetros estadísticos de los ajustes entre el ángulo de aproximación y los valores de reflectancia del modo multiespectral por banda....	41
6A Parámetros estadísticos de los ajustes entre el espacio disponible y los valores de reflectancia del modo multiespectral por banda.....	41
7A Parámetros estadísticos de los ajustes entre los valores de reflectancia de las bandas del modo multiespectral y las variables topográficas y dasométricas.....	42

INDICE DE FIGURAS

FIGURA N°	PAGINA
1 Sistema de teledetección pasiva.....	2
2 Opciones de captura de imágenes con el sensor HRV-SPOT; a) Exploración por avance y b) Observación de una zona desde dos puntos.....	3
3 Tipos de reflexión; a) Difusa y b) Especular.....	5
4 Reflectancia de distintas superficies.....	6
5 Efecto sombra causado por la topografía.....	8
6 Efecto del relieve sobre la energía reflejada.....	8
7 Geometría de observación.....	9
8 Exposición con respecto al sol; a) Transformación de la exposición respecto al Norte en exposición con respecto al sol y b) Simetría de la exposición	12
9 Vector del sensor (V), solar (S) y normal al plano tangente (N), en cada punto de muestreo.....	15
10 Traslado de los ejes coordenados.....	16
11 Vector de reflectancia solar.....	17
12 Angulos generados por la geometría de observación.	19
13 Efecto de la pendiente sobre los valores de reflectancia del modo multiespectral por banda....	22
14 Efecto de la exposición sobre los valores de reflectancia del modo multiespectral por banda....	22
15 Efecto del ángulo solar sobre los valores de reflectancia del modo multiespectral por banda....	23
16 Efecto del ángulo de visión sobre los valores de reflectancia del modo multiespectral por banda....	24
17 Efecto del ángulo de aproximación sobre los valores de reflectancia del modo multiespectral	

		VI
	por banda.....	25
18	Efecto del espacio disponible sobre los valores de reflectancia del modo multiespectral por banda.....	26
19	Efecto de la pendiente sobre los valores de reflectancia por banda y exposición.....	28
20	Efecto del ángulo solar sobre los valores de reflectancia por banda y exposición.....	29
21	Efecto del ángulo de visión sobre los valores de reflectancia por banda y exposición.....	30
22	Efecto del ángulo de aproximación sobre los valores de reflectancia por banda y exposición....	31
23	Efecto del espacio disponible sobre los valores de reflectancia por banda y exposición.....	32



I INTRODUCCION

La teledetección espacial, una técnica que permite obtener imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales (Chuvienco 1990), ha adquirido importancia debido, por un lado a la necesidad de obtener información para manejar de forma eficiente los recursos naturales de nuestro planeta y por otro, al avance vertiginoso de la tecnología.

Un sistema de percepción remota requiere, al menos, de cuatro componentes: i) una fuente de energía, que da origen al flujo energético que es detectado por el sensor; puede tratarse de una fuente externa al sensor como por ejemplo el sol, en cuyo caso se habla de teledetección pasiva, o de un haz energético emitido por el sensor, caso en que se habla de teledetección activa; ii) la superficie terrestre, que recibe el flujo procedente de la fuente energética y la refleja; iii) el sistema sensor que capta la energía reflejada por la superficie terrestre; y iv) el sistema de recepción-comercialización, que recibe la información transmitida por la plataforma, la graba en un formato apropiado y la distribuye a los usuarios (Figura 1)

Las imágenes satelitales presentan un alto potencial en el estudio de los ecosistemas. Así se pueden utilizar para identificar condiciones de clima, fisiografía, vegetación, en estudios hidrológicos, en estudios de suelo, en estudios urbanos, en el control de incendios y en cartografía. Las imágenes permiten, entre otras, tener una visión panorámica, aportar datos homogéneos con formato digital, y entregar coberturas globales y periódicas de la superficie terrestre. Lo más importante es que permiten obtener información imperceptible para el ojo humano.

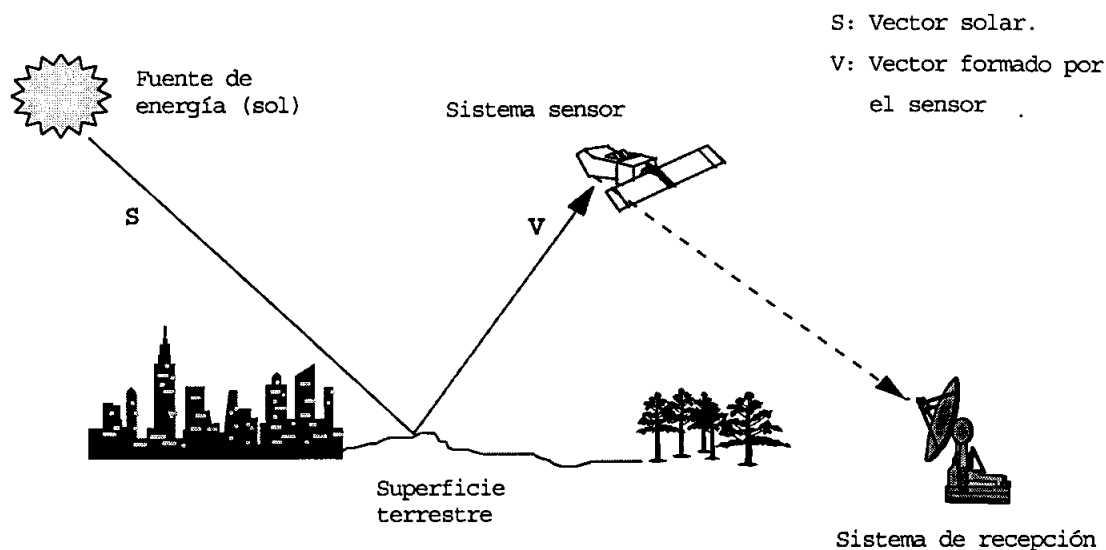


Figura 1. Sistema de teledetección pasiva.

En la teledetección espacial han incursionado varios países, entre los que destacan Estados Unidos, Japón y Francia. Este último diseñó el satélite SPOT (Système Probatoire d'Observation de la Terre), que transporta dos equipos de exploración por avance denominados HRV (Haute Resolution Visible). Estos sensores permiten obtener imágenes pancromáticas y multiespectrales. Para la toma de imágenes, las que cubren un área de 60 km de lado, pueden variar el ángulo de observación, gracias a un dispositivo móvil instalado en el equipo óptico. Esto le permite obtener dos o más observaciones de una misma zona, efectuadas bajo ángulos distintos, durante los recorridos sucesivos del satélite, lo que posibilita la generación de imágenes estereoscópicas (Figura 2).

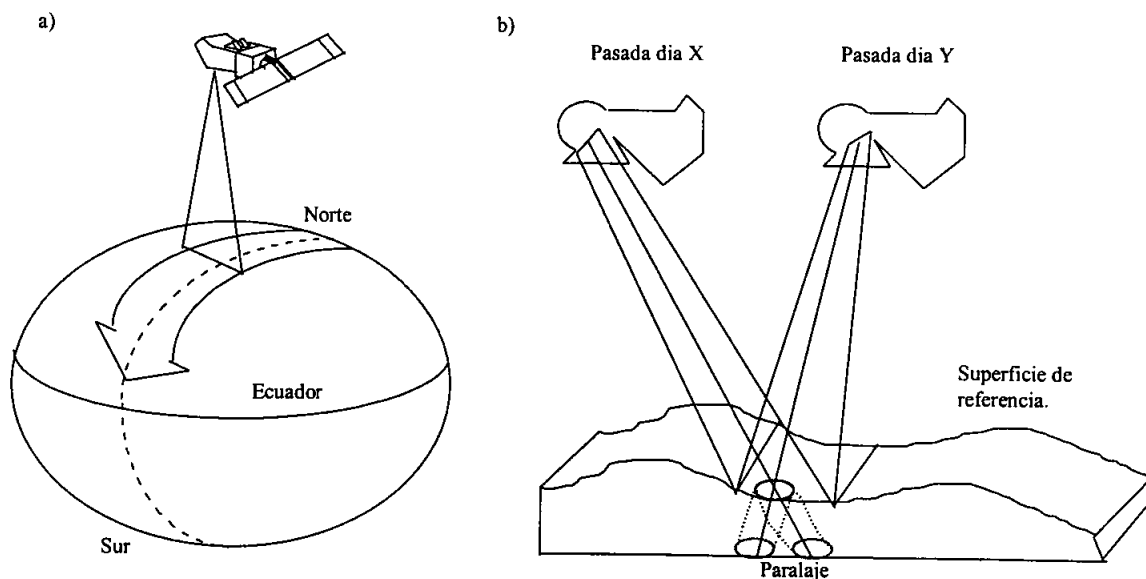


Figura 2. Opciones de captura de imágenes con el sensor HRV-SPOT; a) Exploración por avance y b) Observación de una zona desde dos puntos.

Los sensores remotos captan energía de diferentes regiones del espectro electromagnético (visible, infrarrojo, microonda; Tabla 1). Cada región (banda) entrega información de diferentes aspectos de un objeto; por ejemplo, el rango visible describe el color, el infrarrojo su temperatura, y la microonda la aspereza de su superficie (Bird 1991).

Tabla 1. Regiones del espectro electromagnético.

Nombre de la banda	Longitud de onda (μm)
Visible	0,4-0,7
Infrarrojo cercano	0,7-1,3
Infrarrojo de onda corta	1,5-2,5
Infrarrojo medio	3,0-5,0
Infrarrojo termal	8,0-14,0
Microondas	1000-20000

La resolución de un satélite se define como la capacidad para

registrar y discriminar información en detalle (Estes y Simonett 1975; citado por Chuvieco 1990). Así se pueden diferenciar la resolución espacial, espectral, radiométrica y temporal. El satélite SPOT posee una resolución espacial de 10 m y 20 m para los modos pancromático y multiespectral, respectivamente. La resolución espectral de las tres bandas es desde 0,5 μm a 0,89 μm para el multiespectral y desde 0,51 μm a 0,73 μm para el pancromático. La resolución radiométrica es de 8 bits para el multiespectral y de 6 bits para el pancromático. La resolución temporal es de 26 días en ambos modos (Tabla 2).

Tabla 2. Características del sensor HRV-SPOT.

Modo	Bandas	Amplitud (μm)	Resolución espacial (m)
Multiespectral	XS1	0,500 - 0,590	20
	XS2	0,610 - 0,690	20
	XS3	0,790 - 0,890	20
Pancromático	P	0,510 - 0,730	10

La energía electromagnética al interactuar con la superficie terrestre se descompone en tres términos [$E_i(\lambda) = E_r(\lambda) + E_a(\lambda) + E_t(\lambda)$]. Esto es, el flujo incidente ($E_i(\lambda)$) sobre una superficie es reflejado ($E_r(\lambda)$), absorbido ($E_a(\lambda)$) o transmitido ($E_t(\lambda)$) (Chuvieco 1990).

La energía electromagnética reflejada está directamente relacionada con las propiedades ópticas de los objetos, siendo éstas las que determinan el monto de radiación reflejada en una dirección específica (Lillesand y Kiefer 1994).

La reflexión puede ser difusa, cuando la radiación incidente al ser reflejada por la superficie es dispersada con un ángulo

distinto al de incidencia, o puede ser especular cuando el ángulo de reflexión (κ) es igual al ángulo de incidencia (ξ) (Figura 3).

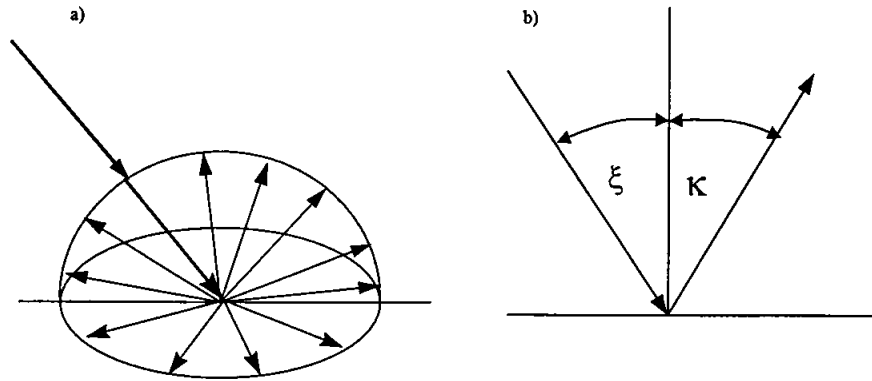


Figura 3. Tipos de reflexión; a) Difusa y b) Especular.

La cantidad de energía reflejada es determinada por las propiedades físicas y químicas del objeto, en tanto que el ángulo de reflexión lo determina la forma de éste. La vegetación muestra una reducida reflectividad en las bandas visibles azul (0,402-0,500 μm) y rojo (0,602-0,700 μm), debido al efecto absorbente de los pigmentos de la hoja (clorofila principalmente); el verde (0,502-0,600 μm) no es absorbido por estos pigmentos y por ello se refleja más. Por el contrario, en el infrarrojo cercano se produce una reducción de la reflectividad, como consecuencia de un deterioro en la estructura celular de la hoja (Murtha 1978; citado por Chuvieco 1990; Figura 4).

La caracterización espectral de las formaciones vegetales es una tarea de interés en la teledetección. Sin embargo, aún ofrece notables dificultades como consecuencia de los múltiples factores que influyen en la radiancia detectada por el sensor. La información que es captada por el sensor presenta

distorsiones causadas por la plataforma, la rotación terrestre, el sensor, la atmósfera y la topografía.

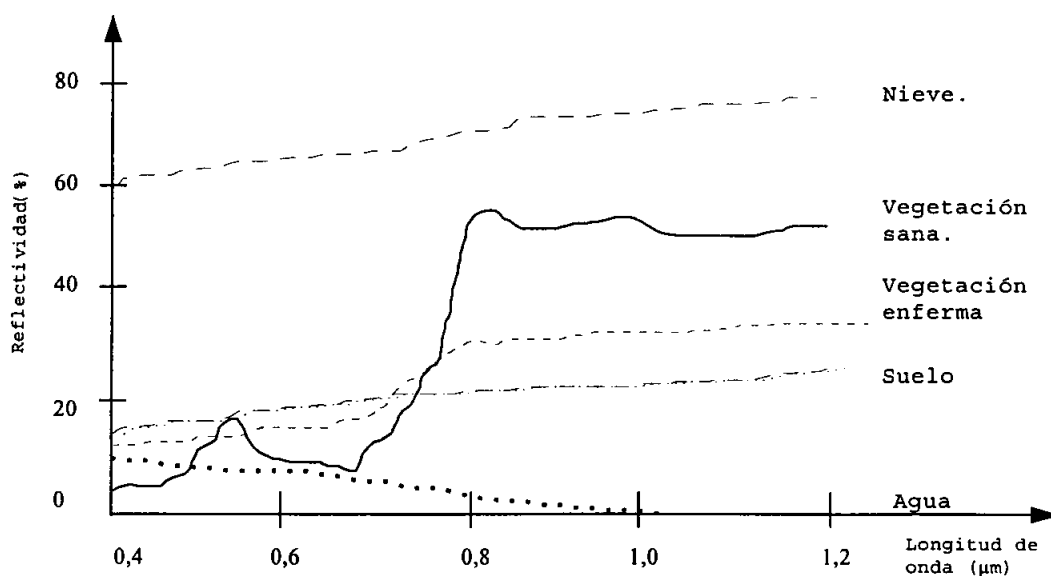


Figura 4. Reflectancia de distintas superficies.

En las áreas boscosas, los sensores captan radiación de una variedad de superficies inclinadas y, dependiendo de la resolución del campo de visión, la señal puede ser influenciada por el sombreado del terreno y por la inclinación individual del objeto sensado (Barker Schaaf et al. 1994).

En un caso ideal, una imagen podría ser una medida exacta de la energía luminosa (radiación) que viene de la superficie terrestre. Pero en la realidad, la luz debe viajar a través de la atmósfera, la cual absorbe, disipa y transmite la luz cambiando las características originales de ésta. Cada banda multiespectral es afectada en forma distinta por la dinámica de la atmósfera (Vaughn y Wilkinson 1995).

Las imágenes satelitales, además del efecto de la atmósfera, están propensas a dos fuentes de error: i) la distorsión radiométrica, que es producida por la gran cantidad de

detectores que poseen los satélites que son de calibración complicada; y ii) la distorsión geométrica, la que se produce porque la rotación de la tierra es hacia el oriente y los satélites viajan en dirección Norte-Sur; además, la toma de cada imagen demora medio minuto lo que implica que se obtiene una imagen cuadrada sobre un rombo (Bell 1995). Las distorsiones geométricas no sólo se relacionan con el sensor sino también con la topografía, la que es de mayor importancia en regiones montañosas (Itten y Meyer 1993).

La topografía produce una variación en los valores de reflectancia de las superficies inclinadas respecto a los valores de reflectancia de las superficies horizontales (Burgess et al. 1994). El grado de respuesta de un sensor al efecto topográfico varía considerablemente en función del ángulo de elevación solar.

Uno de los efectos más obvios causados por la topografía sobre los valores digitales de la imagen es la sombra (Figura 5). La magnitud de ese efecto depende del ángulo de elevación solar, disminuyendo el efecto al acercarse al cenit solar (Chuvieco 1990). El efecto topográfico es función de la orientación relativa del objeto, la fuente de iluminación y la posición del sensor remoto (Holben y Justice 1981; Figura 6).

Los efectos causados por la atmósfera, topografía y geometría de observación sobre los valores digitales de una imagen satelital son difíciles de modelar y corregir (Cihlar et al. 1994).

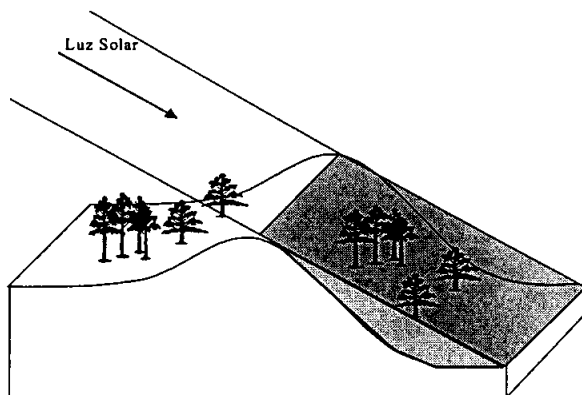


Figura 5. Efecto sombra causado por la topografía.

El impacto que tiene la iluminación sobre un objeto es muy relevante debido a que éste exhibirá valores de intensidad totalmente distintos bajo diferentes condiciones de posición solar y topografía. Este hecho es un problema para la clasificación basada en imágenes satelitales. Para una detección específica y eficiente de los objetos debe eliminarse la influencia de la topografía sobre la iluminación (Itten y Meyer 1993).

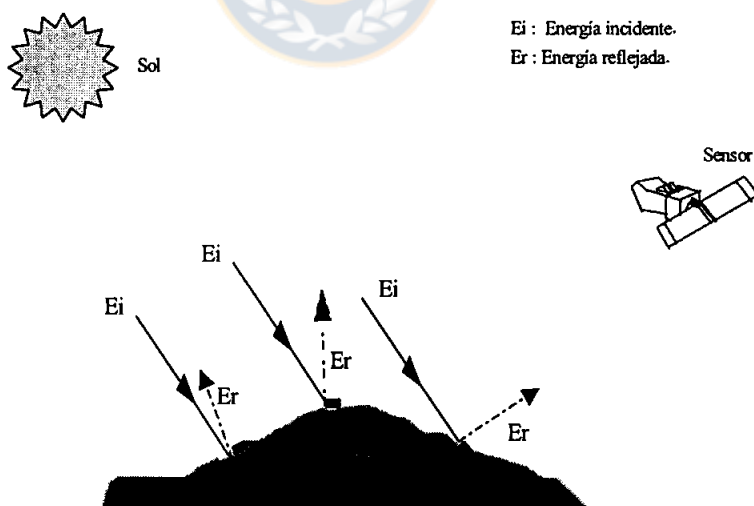


Figura 6. Efecto del relieve sobre la energía reflejada.

Cuando se realizan funciones de reflectancia para caracterizar algún tipo de cobertura es importante considerar los ángulos de incidencia solar, debido a que gran parte de la superficie terrestre posee relieve. El análisis de la reflectancia debe

considerar el ángulo de observación, azimut de observación, ángulo de elevación solar, azimut solar y las pendientes, las cuales afectan notablemente los valores de la reflectancia obtenidas para una cobertura particular de terreno (Figura 7).

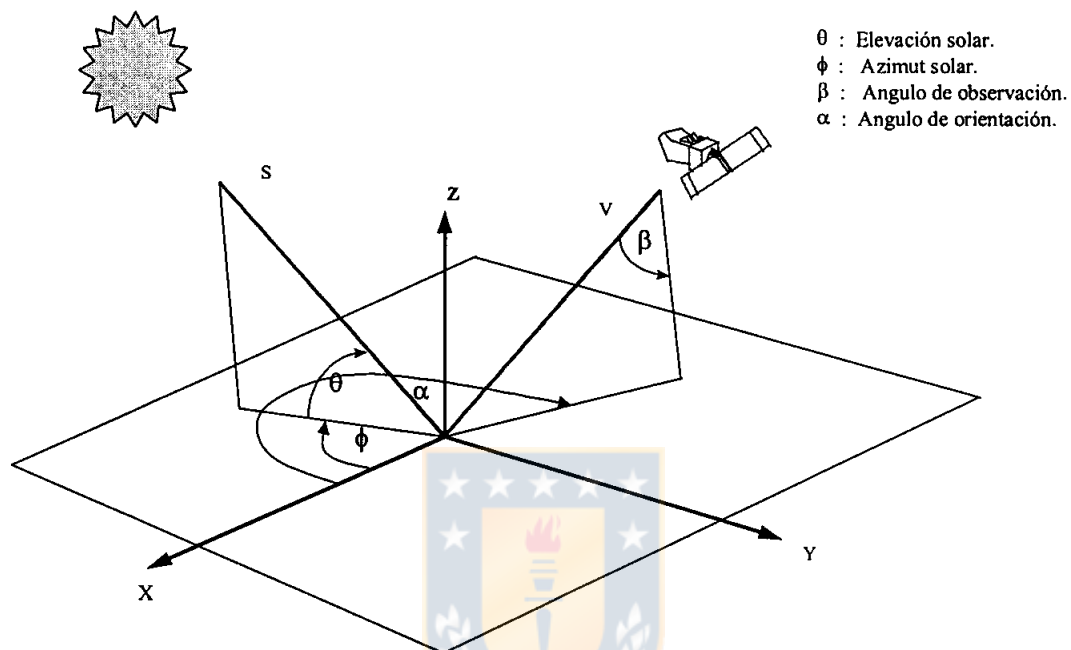


Figura 7. Geometría de observación

El objetivo principal del presente estudio es determinar la influencia ejercida por la topografía sobre los valores digitales del modo multiespectral del satélite SPOT, obtenidos en imágenes de formaciones de *Eucalyptus globulus* Labill. Específicamente se busca determinar el efecto de la pendiente y la exposición del terreno.

II METODOLOGIA

2.1 Descripción del Area de Estudio.

El presente estudio fue realizado con información recopilada en el predio Coliumo, localizado en la comuna de Tomé, Provincia de Concepción, Octava Región (longitud $72^{\circ} 55' 39''$ y latitud $36^{\circ} 34' 54''$).

En la investigación se utilizó información de 90 parcelas (500 m^2) de *Eucalyptus globulus* Labill de las cuales 16 eran de eucalipto puro y 74 asociadas a *Pinus radiata* D.Don. que estaban constituidas a lo menos por el noventa por ciento de la especie dominante.

En las parcelas se midieron variables de terreno y dasométricas. En terreno se midió la pendiente, la exposición respecto al Norte y la posición en la pendiente. En los árboles se midió el DAP y la altura total.

El estudio se realizó en dos etapas: primero se confeccionó un plano base, en el que se ubicaron las parcelas; luego se generó la información base para cada punto muestreo.

2.2 Generación de planos.

El plano base empleado se confeccionó por medio de restitución aerofotogramétrica con fotografías aéreas pancromáticas (escala 1:20000), del vuelo del servicio aerofotogramétrico (SAF), realizado en el año 1992. La fotointerpretación se realizó con fotografías color de formato pequeño ampliado (escala 1:10000) tomadas en enero 1996.

En la fotointerpretación se utilizó estereoscopio de espejos, definiendo unidades homogéneas de acuerdo a la textura, color, altura de la vegetación, tamaño de la copa y a otros factores. La fotointerpretación fue apoyada con visitas a terreno, para comprobar los límites de los polígonos definidos.

Además se confeccionaron planos de uso actual del suelo y de curvas de nivel, mediante sistemas tradicionales y automatizados de cartografía. Posteriormente esos planos se digitalizaron y se traspasaron al sistema de información geográfica (SIG).

2.3 Generación de Información Base.

2.3.1 Información Topográfica. La información topográfica (Exposición con respecto al norte ($^{\circ}$) y la Pendiente (%)), se obtuvo en terreno. Para facilitar la interpretación de la información se transformó la exposición respecto al Norte en exposición con respecto al sol, desplazando el sistema coordenado original en el azimut solar. El ángulo

resultante va de 0° a 180° , debido a la simetría de la exposición con respecto al sol (Figura 8).

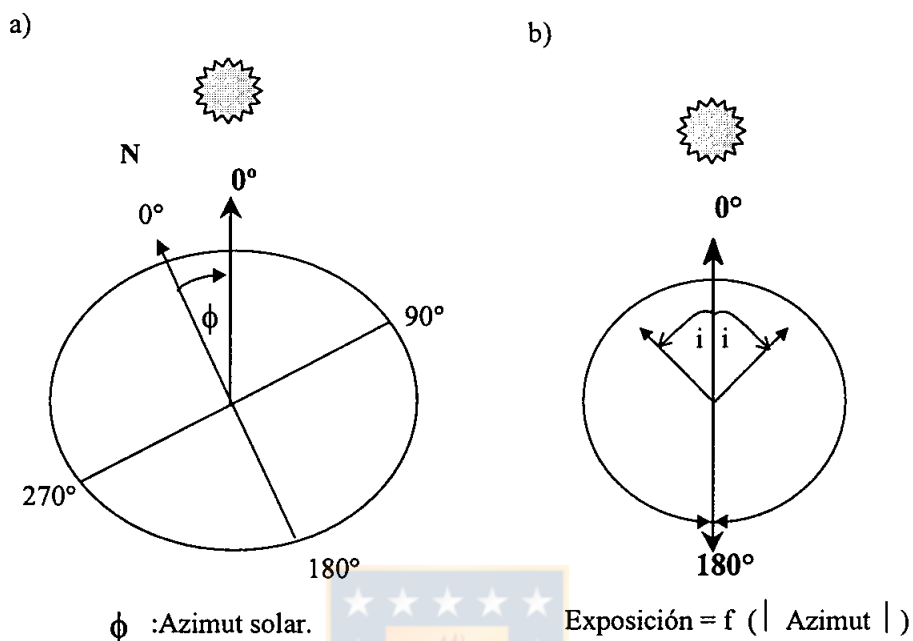


Figura 8. Exposición con respecto al sol; a) Transformación de la exposición respecto al Norte en exposición con respecto al sol y b) Simetría de la exposición.

2.3.2 Información Dasométrica. En cada parcela se determinó el área basal (m^2/ha), densidad del rodal (n° arb./ha), diámetro cuadrático medio (cm) y el espacio disponible ($m^2/arb.$).

2.3.3 Información Satelital. En el estudio se ocupó una imagen satelital multiespectral del satélite SPOT 2, tomada el 8 de septiembre de 1990, a las 15:08 hrs, con ángulo de observación (α) y de orientación satelital (β) de $21,4^\circ$ y $8,8^\circ$ respectivamente. La elevación solar (θ) en ese momento era de 31° y el azimut solar (ϕ) de $30,7^\circ$, al

centro de imagen satelital. De la imagen se obtuvieron los valores digitales de las tres bandas.

El valor digital de cada banda asociada a cada parcela en terreno se obtuvo del promedio de cuatro pixeles adyacentes. La imagen se corrigió geométricamente estableciendo diferentes puntos de control basados en la carta regular IGM escala 1:50000 de Tomé.

2.4 Geometría de Observación.

En cada punto de muestreo se generó un plano tangente según la pendiente y exposición, determinando distintos ángulos de observación (respecto al sensor) y de incidencia (con respecto al sol).

En cada punto de muestreo se calculó el ángulo de visión (τ), formado entre el plano tangente al punto de muestreo y el sensor; el ángulo solar (ψ), formado entre el plano tangente al punto de muestreo y el sol; el ángulo de aproximación (ϕ), formado entre el vector de reflectancia solar y el vector del sensor. La información de las posiciones del sol y del sensor asociados a cada punto de muestreo se manejó con procedimientos de álgebra vectorial, considerando los ángulos de elevación solar y azimut solar, además de la posición del satélite en el momento de la toma de la imagen.

Para facilitar la interpretación de información se ideó un sistema coordinado para cada punto de muestreo, en el que

al eje positivo X le corresponde el Norte, al eje positivo Y le corresponde el Oeste y al eje positivo Z el vector normal a la superficie. El centro del sistema coordinado se encuentra ubicado en la posición del punto de muestreo. Para describir la posición del sol y del sensor respecto a cada punto de muestreo se definieron tres vectores con norma unitaria (Figura 9).

i) Vector formado por la posición del sensor:

$$V = [|V| \cdot \cos\beta \cdot \cos\alpha, |V| \cdot \cos\beta \cdot \sin\alpha, |V| \cdot \sin\beta] \quad (1)$$

Donde :

V = vector formado por el sensor.

α = ángulo de orientación.

β = ángulo observación.

ii) Vector formado por la posición del sol:

$$S = [|S| \cdot \cos\theta \cdot \cos\phi, |S| \cdot \cos\theta \cdot \sin\phi, |S| \cdot \sin\theta] \quad (2)$$

Donde :

S = vector formado por el sol.

ϕ = azimut solar.

θ = elevación solar.

iii) Vector normal al plano tangente del punto de muestreo:

$$N = [|N| \cdot \sin\eta \cdot \cos\delta, |N| \cdot \sin\eta \cdot \sin\delta, |N| \cdot \cos\eta] \quad (3)$$

Donde :

N = vector normal al plano tangente del punto de muestreo.

η = pendiente.

δ = exposición.

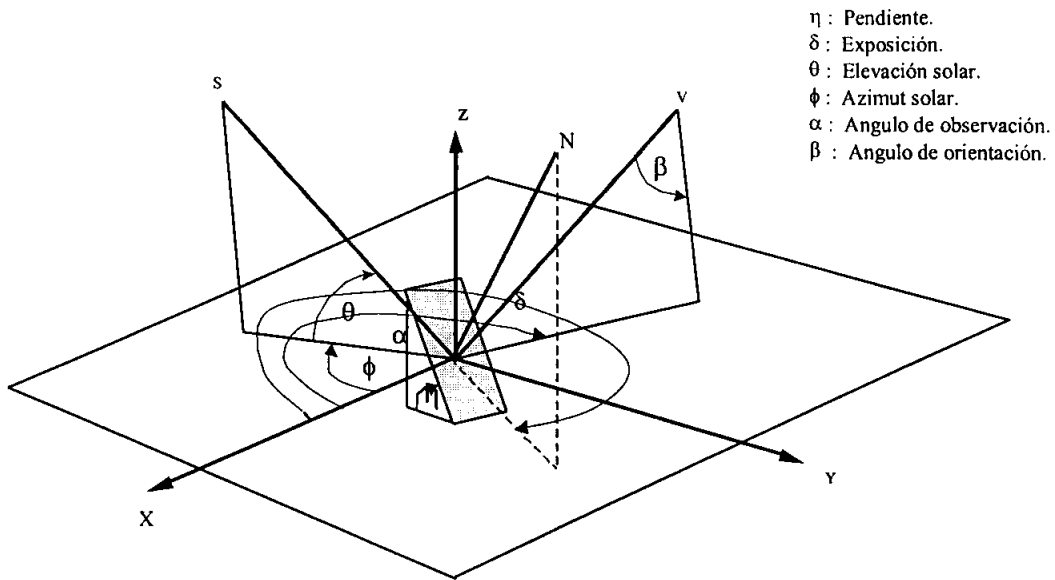


Figura 9. Vector del sensor (V), solar (S) y normal al plano tangente (N), en cada punto de muestreo.

Para obtener el vector de reflectancia solar, es necesario obtener los vectores normales al plano de reflectancia formado por la superficie, rotando el eje coordenado original hacia éste, replanteándose los vectores solar y del sensor, respecto al nuevo eje coordenado (Figura 10).

$$X' = [X1, X2, X3] \quad (4)$$

$$X1 = 1/\sqrt{(1+\cos^2\delta\text{tag}^2\eta)}; X2 = 0;$$

$$X3 = -\cos\delta\text{tag}\eta//\sqrt{(1+\cos^2\delta\text{tag}^2\eta)}$$

$$Y' = [Y1, Y2, Y3] \quad (5)$$

$$Y1 = Z2*X3-Z3*X2; Y2 = Z3*X1-Z1*X3;$$

$$Y3 = Z1*X2-Z2*X1$$

$$Z' = [Z1, Z2, Z3] \quad (6)$$

$$Z1 = \cos\delta\text{sen}\eta; Z2 = \text{sen}\delta\text{sen}\eta; Z3 = \cos\eta$$

hacer negativas las componentes X e Y de este vector. Luego se recalculan las componentes del vector solar de acuerdo al nuevo eje coordenado. Para obtener el vector de reflectancia solar se utilizaron las siguientes relaciones obtenidas entre el vector solar (2) y los nuevos ejes trasladados [(4), (5) y (6)].

$$R_s = [R_1, R_2, R_3] \quad (7)$$

$$R_1 = -(S_1 \cdot X_1 + S_2 \cdot X_2 + S_3 \cdot X_3) / \sqrt{X_1^2 + X_2^2 + X_3^2};$$

$$R_2 = -(S_1 \cdot Y_1 + S_2 \cdot Y_2 + S_3 \cdot Y_3) / \sqrt{Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2};$$

$$R_3 = (S_1 \cdot Z_1 + S_2 \cdot Z_2 + S_3 \cdot Z_3) / \sqrt{Z_1^2 + Z_2^2 + Z_3^2}$$

Donde :

R1 = componente X del vector reflectancia solar.

R2 = componente Y del vector reflectancia solar.

R3 = componente Z del vector reflectancia solar.

R_s = vector de reflectancia solar.

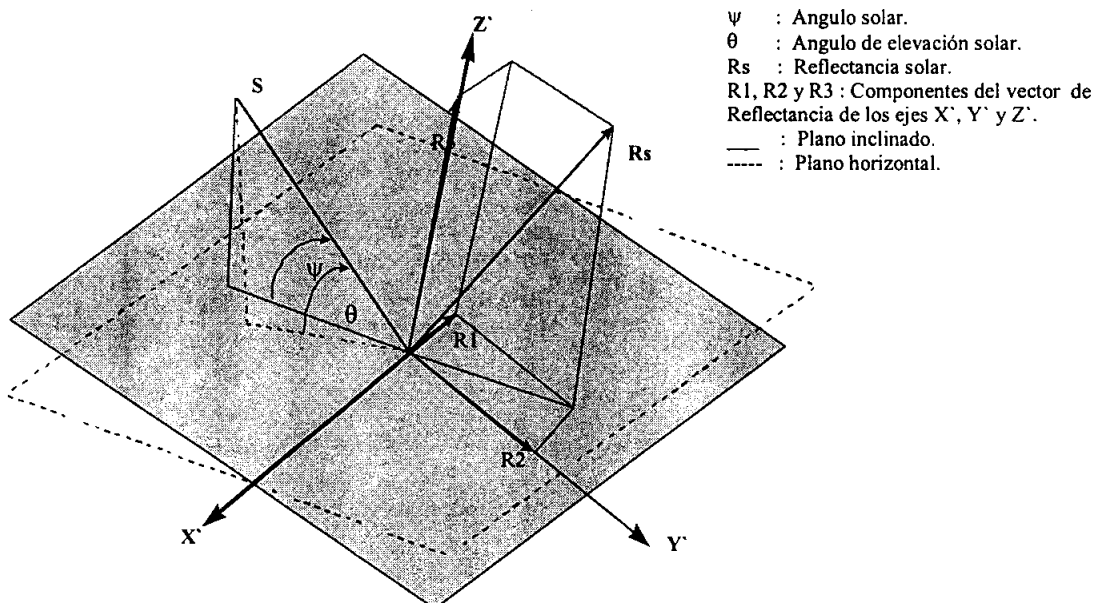


Figura 11. Vector de reflectancia solar.

Para el cálculo del ángulo de visión, que es el ángulo formado entre el sensor y la superficie (Figura 12), se ocupa la siguiente relación, resultante del producto punto entre (1) y (3).

$$\tau = \text{Arcsen} (V \cdot N / (|V| * |N|))$$

Donde:

τ = ángulo de visión.

V = vector formado por el sensor.

N = vector normal al plano tangente del punto de muestreo.

Para el cálculo del ángulo solar, que es el ángulo formado entre el sol y la superficie (Figura 12), se ocupa la siguiente relación, resultante del producto punto entre (2) y (3).

$$\psi = \text{Arcsen} (S \cdot N / (|S| * |N|))$$

Donde:

ψ = ángulo solar.

S = vector formado por el sol.

N = vector normal al plano tangente del punto de muestreo.

Para el cálculo del ángulo de aproximación, que es el ángulo formado por la reflectancia solar y el sensor (Figura 12), se ocupa la siguiente relación, resultante del producto punto entre (7) y (1).

$$\phi = \text{Arccos} (R_s \cdot V / (|R_s| * |V|))$$

Donde :

ϕ = ángulo de aproximación.

R_s = vector de reflectancia solar.

V = vector formado por el sensor.

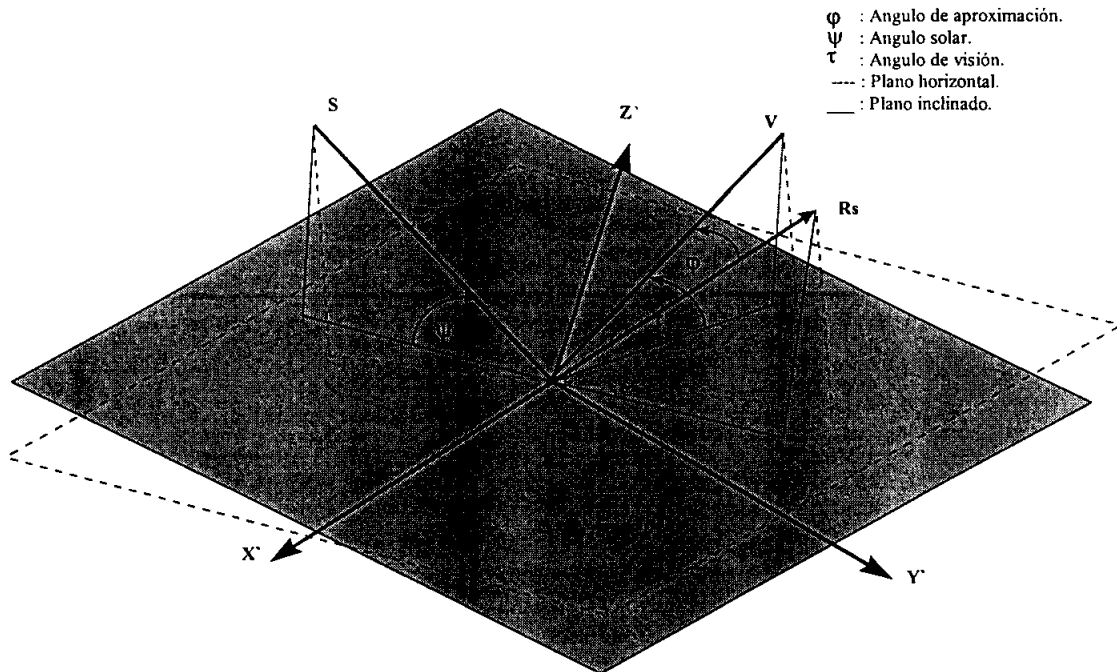


Figura 12. Angulos generados por la geometría de observación.

2.5 Análisis Estadístico

Los datos fueron sometidos a pruebas de hipótesis y análisis de regresión, con objeto de determinar si existen diferencias significativas sobre los valores de reflectancia de las bandas del modo multiespectral causadas por las variables topográficas. El software estadístico utilizado fue el SAS (Statistical Analysis Systems).

Primero, se consideraron los datos en forma global, obteniendo modelos que representan los cambios ocurridos en la medida que cambian las diferentes variables

independientes (topográficas y dasométricas). Segundo, se agruparon los datos por rangos de exposición, para determinar como varían los valores de reflectancia respecto a las variables explicatorias en las distintas exposiciones (0° , 45° , 90° y 135°).

Los modelos utilizados para ajustar la distribución de los valores espectrales fueron de la forma: $Y = a + bx$, $Y = a + bx^2$, $Y = a + b \ln(x)$, $Y = a + bx^c$. Se consideró sólo los mejores modelos, seleccionados de acuerdo a r^2 , r^2 adj., valor F, y EEE.

En cada punto de muestreo se consideraron distintos parámetros. Los factores topográficos fueron: la pendiente (%), exposición con respecto al sol ($^\circ$), ángulo solar ($^\circ$), ángulo de visión ($^\circ$), y el ángulo de aproximación ($^\circ$). El parámetro dasométrico considerado fue el espacio disponible ($m^2/arb.$). Las variables dependientes fueron los valores digitales (Nivel de Brillo NB) de la banda 1 (b1), 2 (b2) y 3 (b3) del satélite SPOT.

III RESULTADOS Y DISCUSION

3.1 Análisis global de los datos

Las funciones de transformación resultantes de la corrección geométrica de la imagen son las siguientes:

$$X_c = 22350,36 + 0,050459*X - 0,009541*Y$$

$$Y_c = 300552,675 - 0,009263*X - 0,049435*Y$$

Donde:

X, Y = Son las coordenadas de la imagen satelital original, sin corrección.

X_c, Y_c = Es la posición corregida geoméricamente de la coordenada X e Y respectivamente.

Los errores medios cuadráticos (RMS) medidos en pixeles para la corrección geométrica, son los siguientes:

$$X_{RMS} = 1,1$$

$$Y_{RMS} = 1,1$$

$$Total_{RMS} = 1,5$$

Donde :

X_{RMS}, Y_{RMS} = son los errores medios cuadráticos para las coordenadas X e Y respectivamente.

Total_{RMS} = el error medio cuadrático total.

La pendiente y la exposición presentan una leve influencia sobre los valores de reflectancia de la banda 3 (infrarrojo cercano). En las otras bandas no existe influencia. La distribución de los valores espectrales presenta una tendencia inversamente proporcional a las variables explicatorias, a mayor pendiente o exposición los valores de reflectancia disminuyen (Figuras 13 y 14).

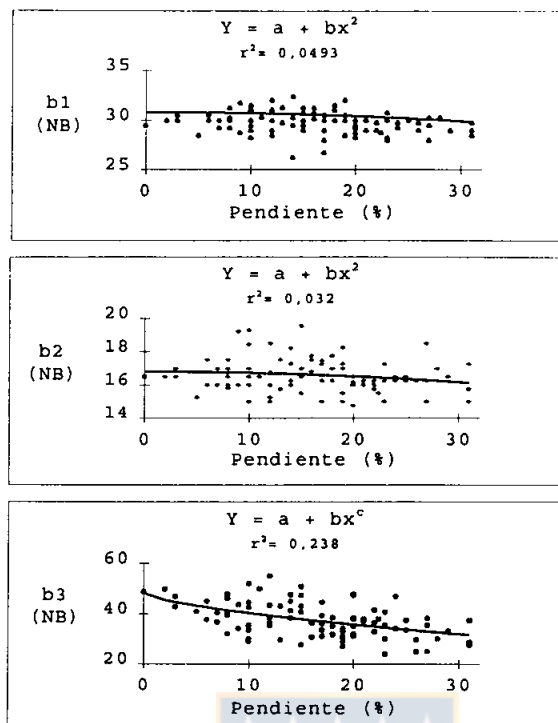


Figura 13. Efecto de la pendiente sobre los valores de reflectancia del modo multiespectral por banda.

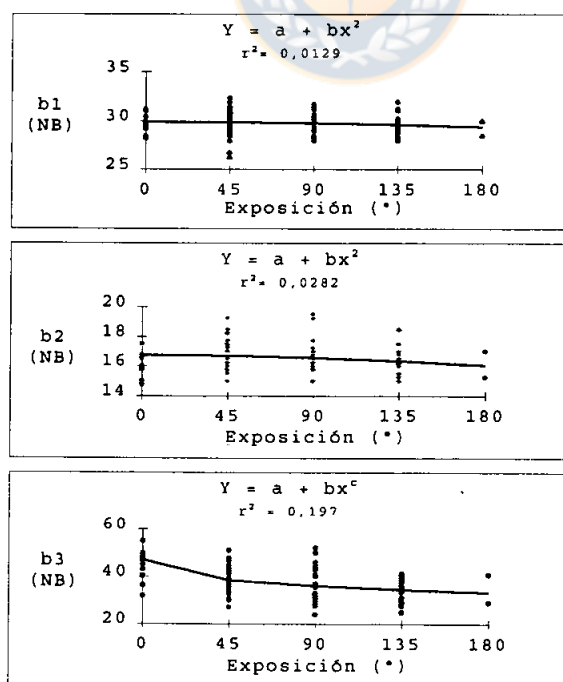


Figura 14. Efecto de la exposición sobre los valores de reflectancia del modo multiespectral por banda.

El ángulo solar y el ángulo de visión no influyen sobre los valores de reflectancia, lo que indica una baja influencia de la posición del sol y del sensor sobre los valores de reflectancia. Pero se observa una leve tendencia a aumentar la reflectancia espectral en la medida que aumentan los ángulos de visión y solar (Figuras 15 y 16).

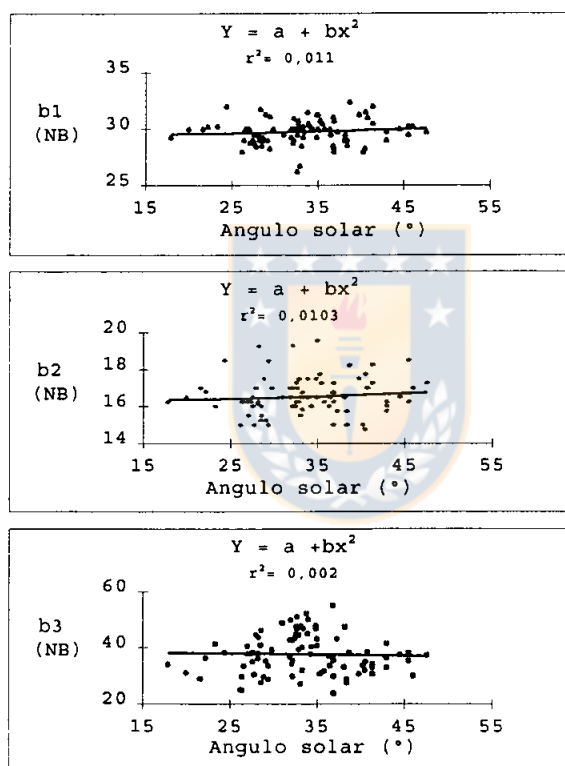


Figura 15. Efecto del ángulo solar sobre los valores de reflectancia del modo multiespectral por banda.

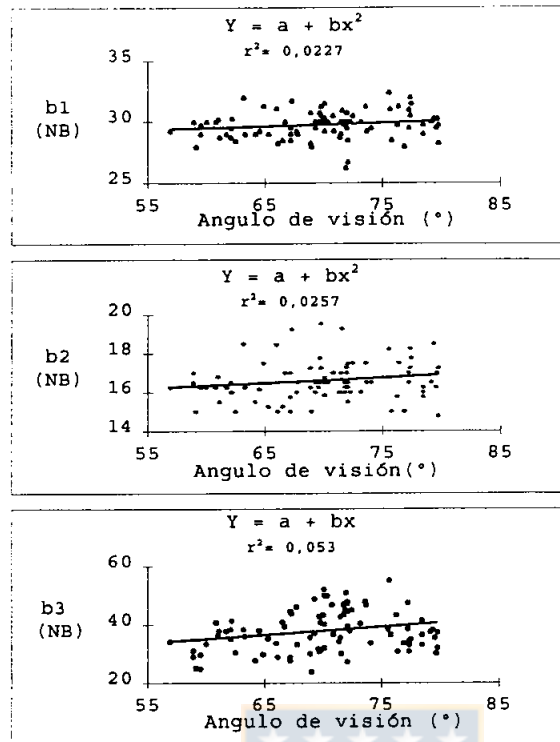


Figura 16. Efecto del ángulo de visión sobre los valores de reflectancia del modo multiespectral por banda.

El ángulo de aproximación no influye sobre la reflectancia espectral de ninguna de las bandas. Pero se observa una leve tendencia a disminuir la reflectancia espectral en la medida que aumenta el ángulo de aproximación (Figura 17).

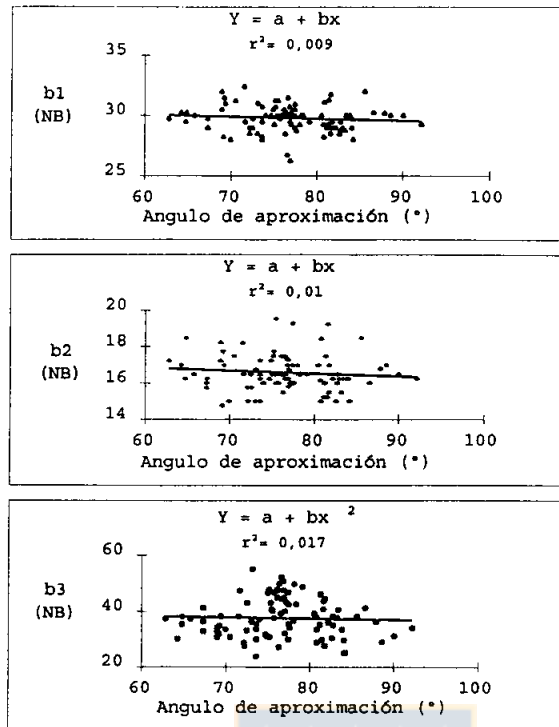


Figura 17. Efecto del ángulo de aproximación sobre los valores de reflectancia del modo multiespectral por banda.

El espacio disponible no influye sobre los valores de reflectancia espectral de las bandas analizadas. Pero se observa una leve tendencia a disminuir la reflectancia espectral en la medida que aumenta el espacio disponible (Figura 18).

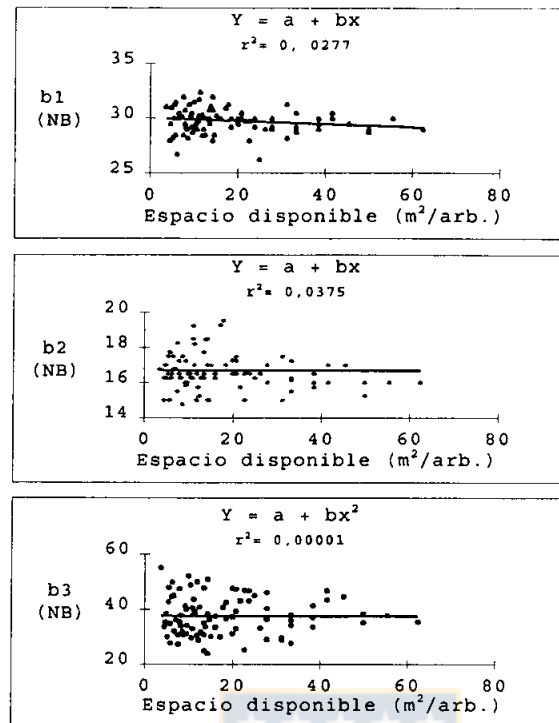


Figura 18. Efecto del espacio disponible sobre los valores de reflectancia del modo multiespectral por banda.

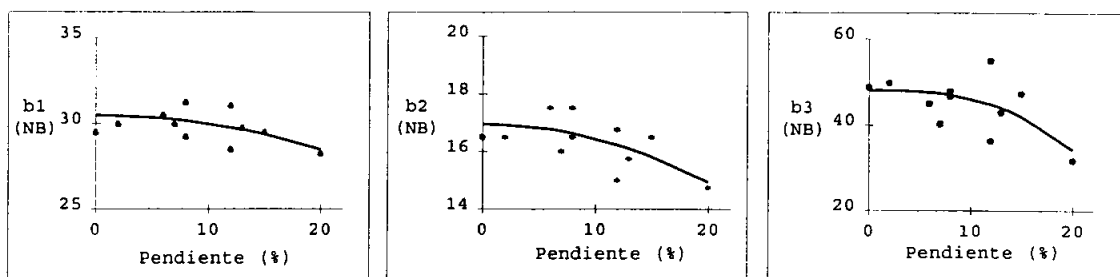
3.2 Análisis de datos por exposición

El efecto de las variables cambia según la exposición que se considere. Con exposición directa al sol (exposición 0°) todas las variables analizadas (topográficas y dasométricas) mostraron una relación más fuerte con los valores de reflectancia espectral, siendo la banda 3 (infrarrojo cercano) la más sensible (Figuras 19, 20, 21, 22 y 23).

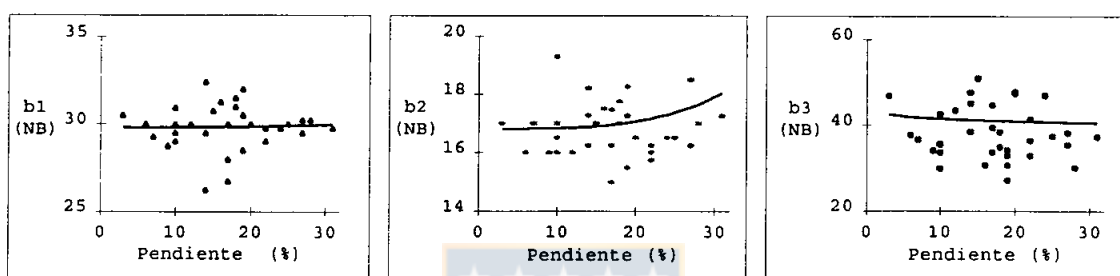
En la exposición 45° y 135° existe una influencia considerablemente menor de las variables analizadas sobre los valores de reflectancia espectral de las bandas del modo multiespectral.

En la exposición perpendicular al sol (90°) la pendiente, y los ángulos solar y de aproximación muestran una influencia sobre los valores de reflectancia espectral de la banda 3 (Figuras 19, 20 y 22).

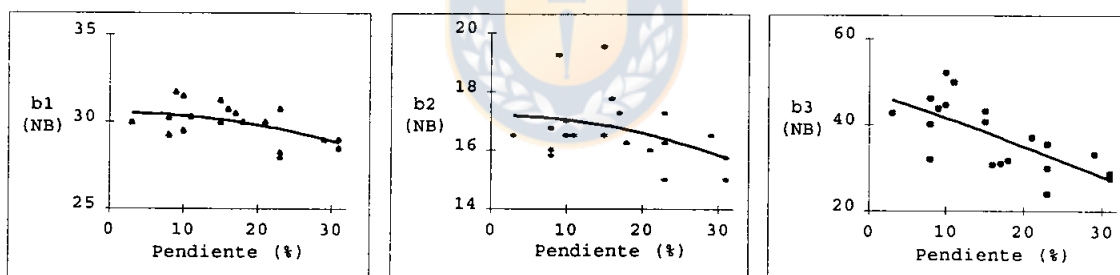
Exposición 0°



Exposición 45°



Exposición 90°



Exposición 135°

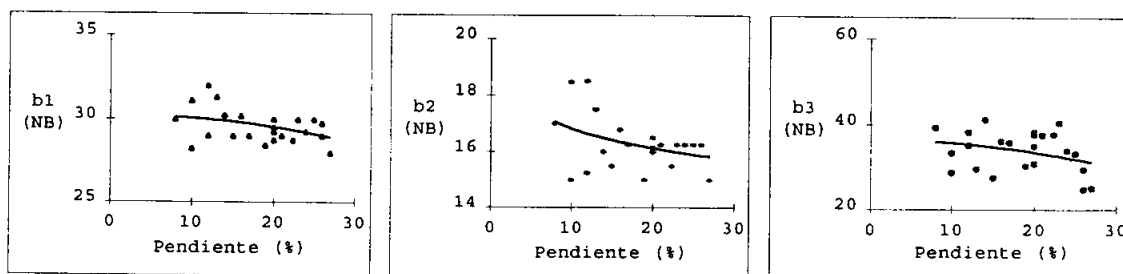
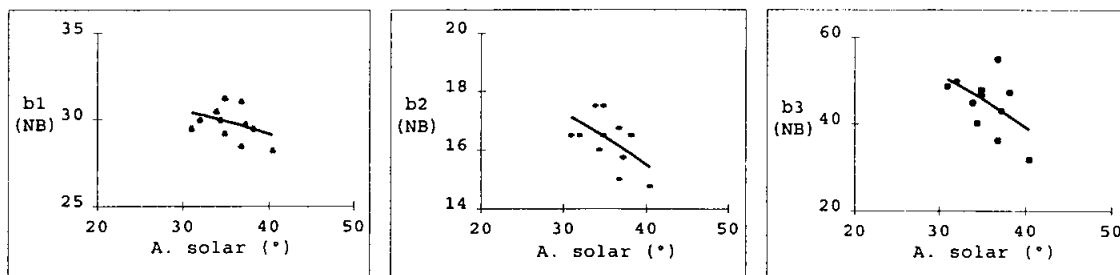
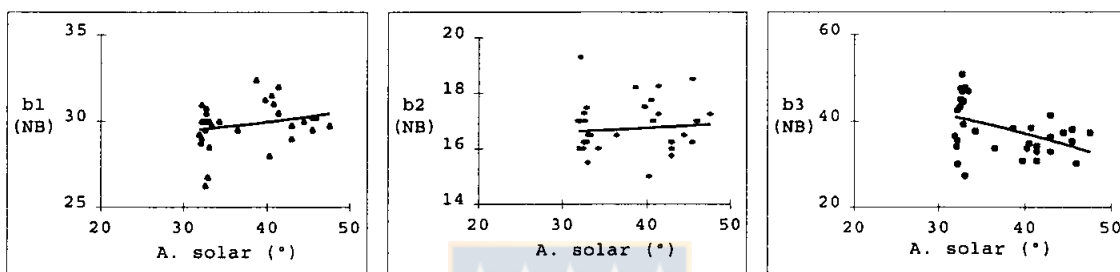


Figura 19. Efecto de la pendiente sobre los valores de reflectancia por banda y exposición.

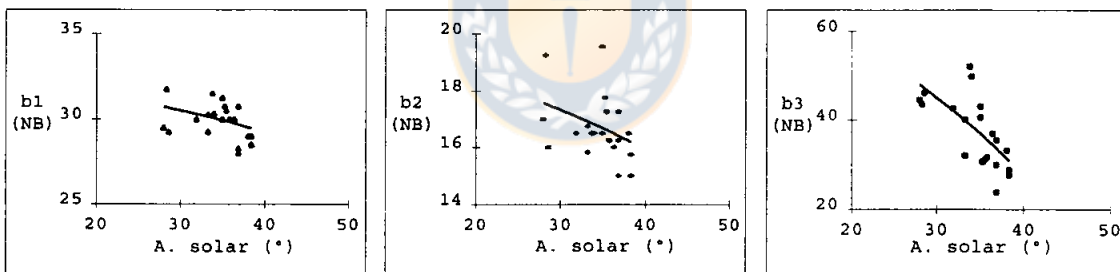
Exposición 0°



Exposición 45°



Exposición 90°



Exposición 135°

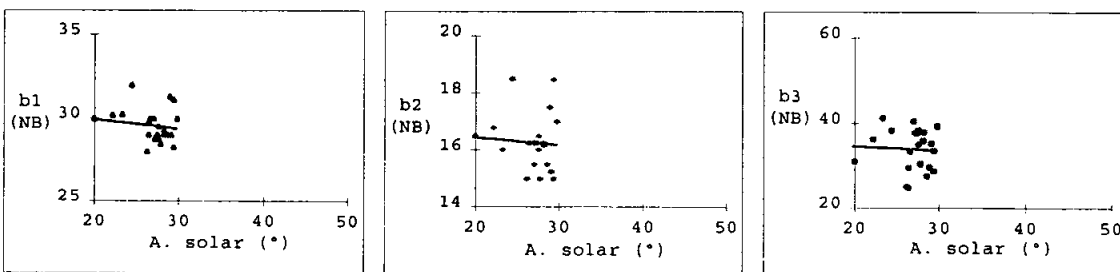
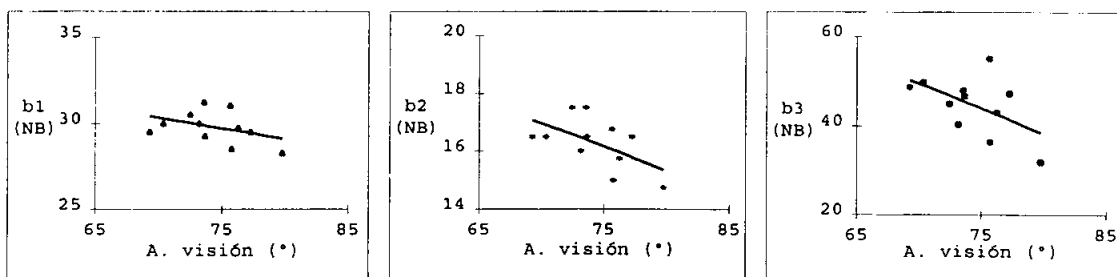
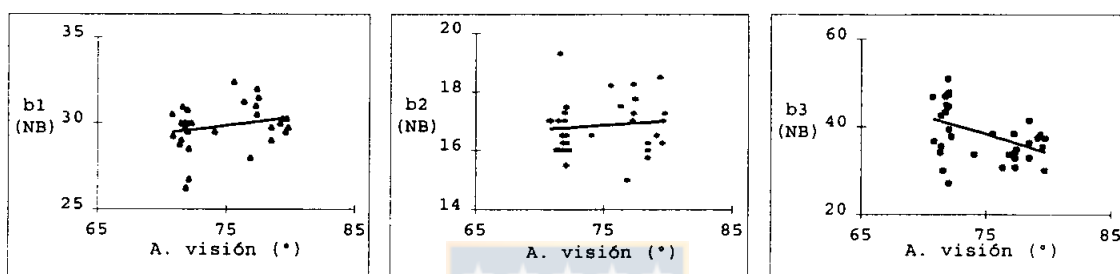


Figura 20. Efecto del ángulo solar sobre los valores de reflectancia por banda y exposición.

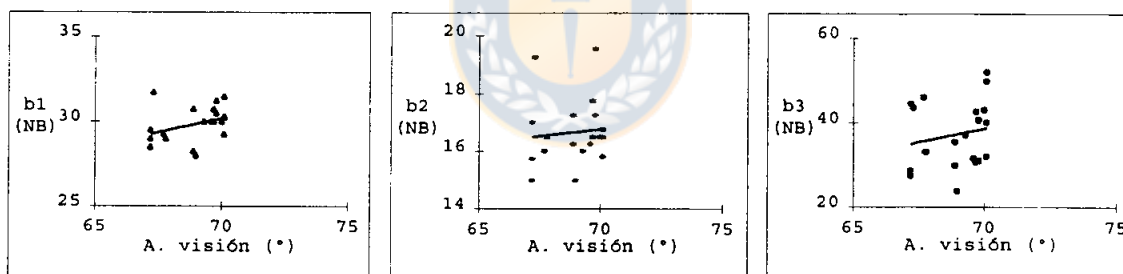
Exposición 0°



Exposición 45°



Exposición 90°



Exposición 135°

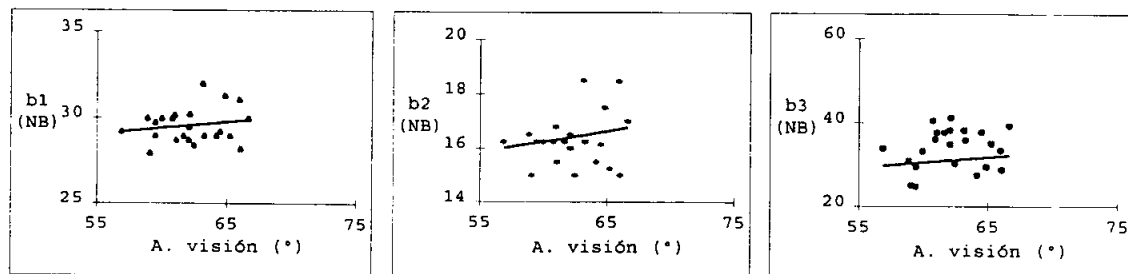
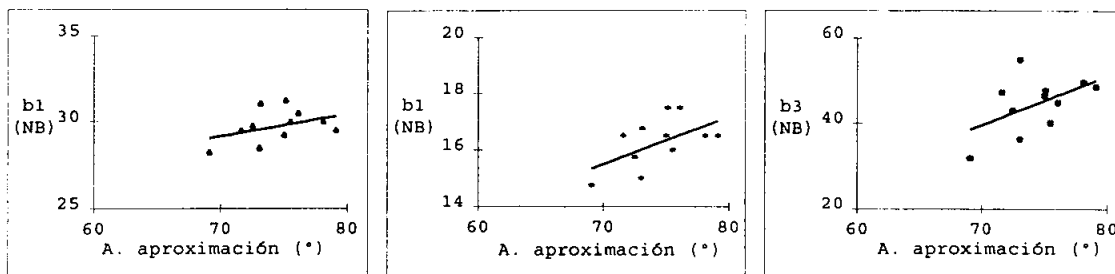
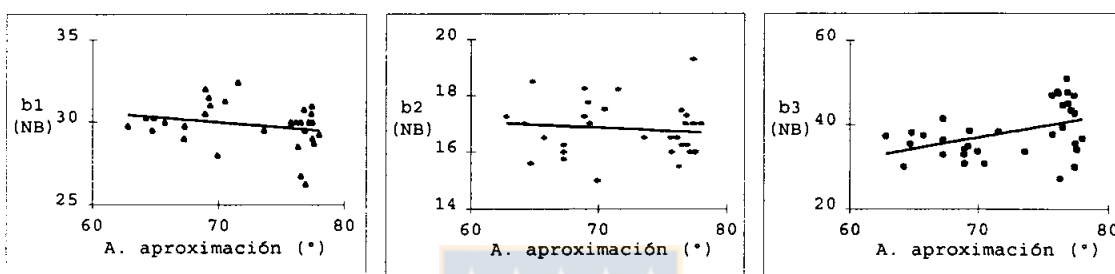


Figura 21. Efecto del ángulo de visión sobre los valores de reflectancia por banda y exposición.

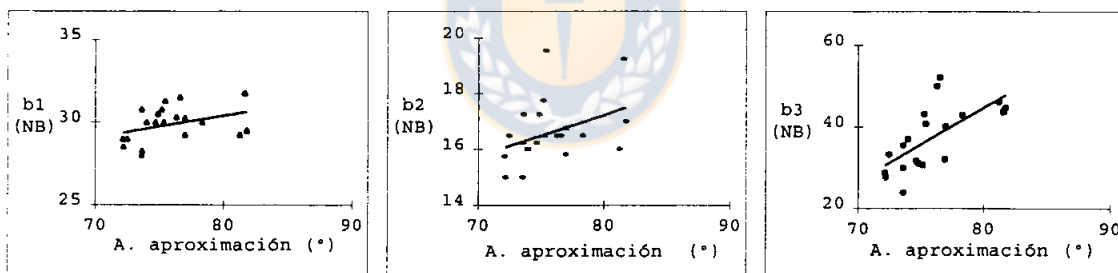
Exposición 0°



Exposición 45°



Exposición 90°



Exposición 135°

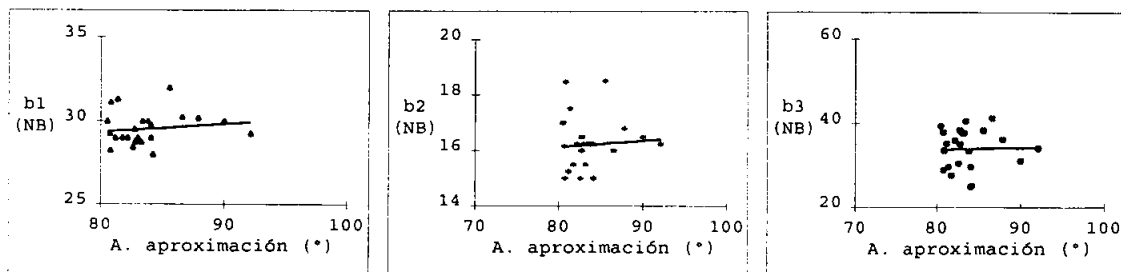
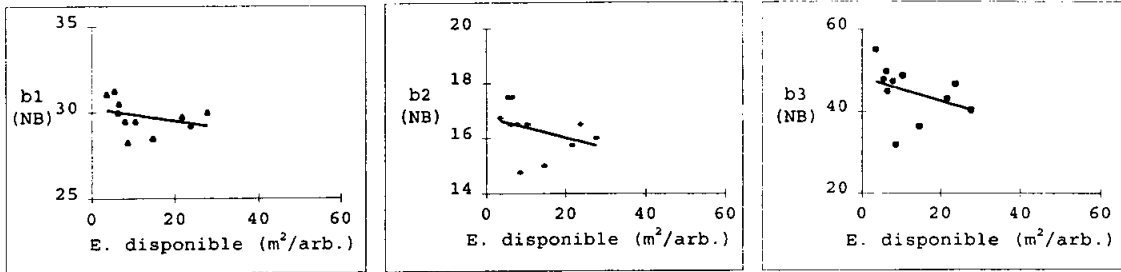
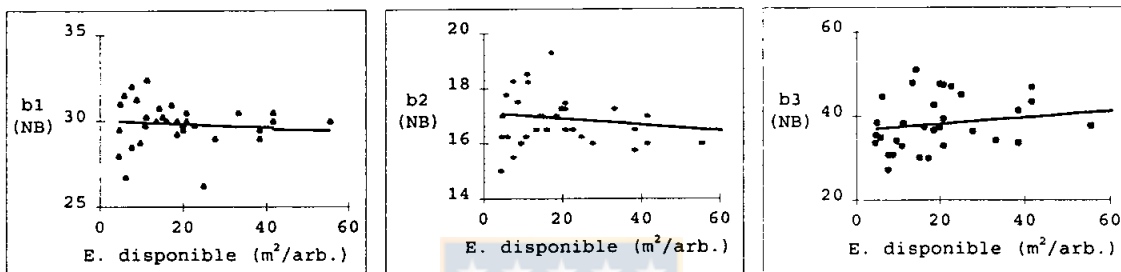


Figura 22. Efecto del ángulo de aproximación sobre los valores de reflectancia por banda y exposición.

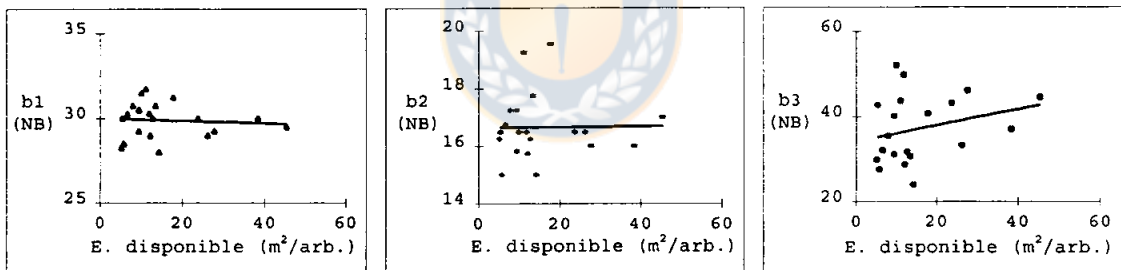
Exposición 0°



Exposición 45



Exposición 90°



Exposición 135°

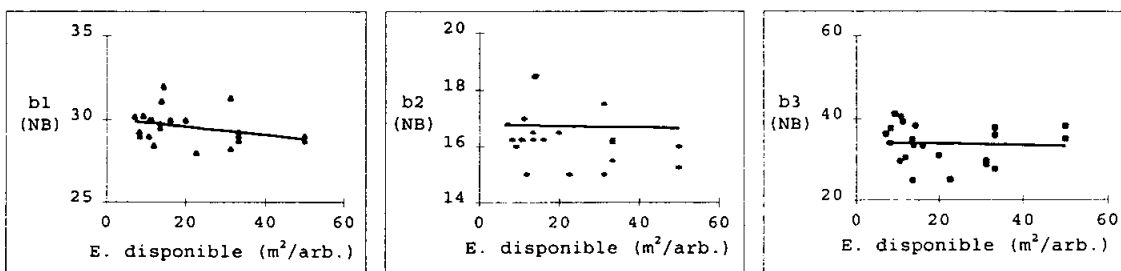


Figura 23. Efecto del Espacio disponible sobre los valores de reflectancia por banda y exposición.

IV CONCLUSIONES

De las tres bandas del modo multiespectral del sensor HRV-SPOT 2, la banda 3 (infrarrojo cercano) es la que presenta una mayor sensibilidad a los cambios en las variables topográficas. Las bandas 1 y 2 del modo multiespectral no son sensibles a cambios topográficos.

La exposición con respecto al sol y la pendiente son las variables que presenta una mayor influencia sobre los valores de reflectancia espectral.

El mayor efecto de la topografía sobre los valores de reflectancia espectral de la banda 3 (infrarrojo cercano) del modo multiespectral se produce en los terrenos con exposición directa al sol (exposición 0°).

V RESUMEN

En este estudio se analizó las relaciones existentes entre los valores espectrales del modo multiespectral del satélite SPOT 2 y las variables topográficas (pendiente, exposición, y los ángulos generados por la geometría de observación) en formaciones de *Eucalyptus globulus* Labill.

En la investigación se utilizó información de 90 parcelas de 500 m² en las que se midieron variables de terreno y de rodal; a cada parcela se le asoció un valor digital obtenido de un imagen multiespectral del satélite SPOT.

La pendiente y la exposición muestran el mayor efecto sobre los valores digitales de las bandas analizadas, siendo la banda 3 la más sensible.

La influencia de las variables topográficas sobre los valores de reflectancia espectral del modo multiespectral es mayor en terreno con exposición directa al sol (0° exposición).

La corrección de los valores digitales es de vital importancia si se trata de obtener información de buena calidad y más fidedigna para zonas con topografía abrupta.

VI SUMMARY

The relationships between the spectral values of multispectral mode of SPOT 2 satellite and topographical variables (slope, aspect and angles that are formed by geometry of observation) were analyzed in stands of *Eucalyptus globulus* Labill.

Data from 90 plots of 500 m² were used; in each plot, field and stand variables were measured and the digital value from a multispectral image were obtained (SPOT).

The slope and aspect showed a high effect on the digital values of the band 3, wich was the most sensitive to the changes in those topographical variables.

The influence of the topographical variables are higher when the aspect of soil surface is in direct exposition to sunlight (0° exposition).

Adjusting the digital values is required to obtain good quality information and more accuracy for zones with abrupt topography.

VII BIBLIOGRAFIA

1. BARKER SCHAAF, C., LI, X. and STRAHLER, A. 1994. Topographic effects on bidirectional and hemispherical reflectances. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing 32(6): 1183-1193.
2. BELL, T. 1995. Remote Sensing. IEEE Spectrum 32(3): 24-31.
3. BIRD, A. 1991. Principles of remote sensing. Remote sensing and geographical information systems for resource management in developing countries. Netherland.
4. BURGESS, D., LEWIS, P. and MULLER, J. 1994. On topographic effects in AVHRR NDVI data. Remote sensing of environment 2: 1-15.
5. CHUVIECO, E. 1990. Fundamentos de la teledetección espacial. Rialp. Madrid. España.
6. CIHLAR, J., MANAK, D. and VOISIN, N. 1994. AVHRR bidirectional reflectance effect and compositing. Remote sensing environment 48: 77-88.
7. HOLBEN, B. and JUSTICE, C. 1981. The topographic effect on spectral response from Nadir-Pointing sensors. Photogrammetric engineering and remote sensing 46(2): 115-133.

8. ITTEN, K. and MEYER, P. 1993. Geometric and radiometric correction of TM data. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. 31(4): 764-770.
9. LILLESAND, T. and KIEFER, R. 1994. Remote sensing and image interpretation. Second edition Wiley and Sons. New York. U.S.A.
10. MORENO, J., GANDIA, S. And MELIA, J. 1992. Low resolution effective parameters. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing 30(5): 1006-1014.
11. VAUGHN, V. And WILKINSON, T. 1995. Systems considerations for multispectral image compression designs. IEEE Signal processing magazine 12(1): 19-31.

VIII APENDICE



Tabla 1A. Parámetros estadísticos de los ajustes entre la pendiente y los valores de reflectancia del modo multiespectral por banda.

banda 1					
y=a+bx					
Parámetro	Valor	Std. Error	Valor T	Prob > T	
a	30,077	0,191	158,291	0,0001	
b	-0,001	0,0005	-2,125	0,0364	
banda 2					
y=a+bx					
Parámetro	Valor	Std. Error	Valor T	Prob > T	
a	16,801	0,172	97,468	0,0001	
b	-0,0007	0,0004	-1,699	0,0929	
banda 3					
y=a+bx					
Parámetro	Valor	Std. Error	Lim.Conf. 95%	Lim.Conf. 95%	
a	48,338	5,192	38,018	58,659	
b	-1,816	2,711	-7,195	3,564	
c	0,648	0,372	-0,089	1,3587	

Tabla 2A. Parámetros estadísticos de los ajustes entre la exposición y los valores de reflectancia del modo multiespectral por banda.

banda 1					
y=a+bx					
Parámetro	Valor	Std. Error	Valor T	Prob > T	
a	29,87	0,165	181,571	0,0001	
b	-1,58E-05	1,47E-05	-1,077	0,2902	
banda 2					
y=a+bx					
Parámetro	Valor	Std. Error	Valor T	Prob > T	
a	16,731	0,146	114,028	0,0001	
b	2,10E-05	1,32E-05	-1,599	0,1092	
banda 3					
y=a+bx					
Parámetro	Valor	Std. Error	Lim.Conf. 95%	Lim.Conf. 95%	
a	47,081	5,811	35,41	58,622	
b	-2,440	4,499	-11,383	6,502	
c	0,333	0,295	-0,254	0,920	

Tabla 3A. Parámetros estadísticos de los ajustes entre el ángulo solar y los valores de reflectancia del modo multiespectral por banda.

banda 1					
$y = a + bx$					
Parámetro	Valor	Std. Error	Valor T	Prob > T	
a	29,43	0,347	84,84	0,0001	
b	0,00027	0,00028	0,96	0,3245	
banda 2					
$y = a + bx$					
Parámetro	Valor	Std. Error	Valor T	Prob > T	
a	16,285	0,311	52,223	0,0001	
b	0,0002	0,0002	0,955	0,3421	
banda 3					
$y = a + bx$					
Parámetro	Valor	Std. Error	Valor T	Prob > T	
a	38,272	2,217	17,66	0,0001	
b	-0,0006	0,001	-0,33	0,7245	

Tabla 4A. Parámetros estadísticos de los ajustes entre el ángulo de visión y los valores de reflectancia del modo multiespectral por banda.

banda 1					
$y = a + bx$					
Parámetro	Valor	Std. Error	Valor T	Prob > T	
a	28,766	0,690	41,120	0,0001	
b	0,0002	0,0001	1,429	0,1567	
banda 2					
$y = a + bx$					
Parámetro	Valor	Std. Error	Valor T	Prob > T	
a	15,621	0,627	24,885	0,0001	
b	0,0002	0,0001	1,523	0,1313	
banda 3					
$y = a + bx$					
Parámetro	Valor	Std. Error	Valor T	Prob > T	
a	18,666	8,538	2,186	0,0354	
b	0,274	0,122	2,224	0,0289	

Tabla 5A. Parámetros estadísticos de los ajustes entre el ángulo de aproximación y los valores de reflectancia del modo multiespectral por banda.

banda 1					
$y = a + bx$					
	Parámetro	Valor	Std. Error	Valor T	Prob > T
R ²					
Coeficiente de determinación					
SE					
	a	31,068	1,477	21,036	0,0001
	b	-0,017	0,019	-0,893	0,3741
banda 2					
$y = a + bx$					
	Parámetro	Valor	Std. Error	Valor T	Prob > T
R ²					
Coeficiente de determinación					
SE					
	a	17,804	1,326	13,418	0,0001
	b	-0,016	0,017	-0,936	0,3519
banda 3					
$y = a + bx$					
	Parámetro	Valor	Std. Error	Valor T	Prob > T
R ²					
Coeficiente de determinación					
SE					
	a	39,44	4,776	8,259	0,0001
	b	-0,0003	0,0008	-0,395	0,6585

Tabla 6A. Parámetros estadísticos de los ajustes entre el espacio disponible y los valores de reflectancia del modo multiespectral por banda.

banda 1					
$y = a + bx$					
	Parámetro	Valor	Std. Error	Valor T	Prob > T
R ²					
Coeficiente de determinación					
SE					
	a	30,017	0,202	148,373	0,0001
	b	-0,014	8,95E-05	-1,584	0,1168
banda 2					
$y = a + bx$					
	Parámetro	Valor	Std. Error	Valor T	Prob > T
R ²					
Coeficiente de determinación					
SE					
	a	16,70	0,126	132,41	0,0001
	b	-0,0002	0,0001	-1,851	0,1021
banda 3					
$y = a + bx$					
	Parámetro	Valor	Std. Error	Valor T	Prob > T
R ²					
Coeficiente de determinación					
SE					
	a	37,62	1,306	28,82	0,0001
	b	-0,002	0,05	-0,029	0,9854

Tabla 7A. Parámetros estadísticos de los ajustes entre los valores de reflectancia de las bandas del modo multiespectral y las variables topográficas y dasométricas.

Pendiente							
Rango	banda	Modelo	a	b	c	r ²	r ² adj
1	b1	Y= a + bx ²	30,451	-0,005		0,352	0,271
	b2	Y= a + bx ²	16,945	-0,005		0,429	0,358
	b3	Y= a + bx ^c	48,058	-0,003	2,873	0,359	0,271
2	b1	Y= a + bx ²	29,772	0,0002		0,009	-0,030
	b2	Y= a + bx ^c	16,81	5,3E-07	3,61	0,022	-0,062
	b3	Y= a + blnx	43,309	-1,879		0,0277	-0,007
3	b1	Y= a + bx ²	30,521	-0,0018		0,2955	0,2564
	b2	Y= a + bx ²	17,185	-0,0015		0,163	0,1165
	b3	Y= a + bx ^c	47,313	-0,457	1,102	0,492	0,396
4	b1	Y= a + bx ²	30,246	-0,0018		0,154	0,114
	b2	Y= a + bx	19,109	-0,993		0,1354	0,0942
	b3	Y= a + bx ²	36,576	-0,0071		0,0953	0,0522
Angulo solar							
Rango	banda	Modelo	a	b		r ²	r ² adj
1	b1	Y= a + bx ²	32,235	-0,0019		0,1642	0,0714
	b2	Y= a + bx ²	19,512	-0,0025		0,3207	0,2453
	b3	Y= a + bx ²	66,658	-0,017		0,2718	0,1909
2	b1	Y= a + bx ²	28,781	0,0007		0,058	0,0252
	b2	Y= a + bx ²	16,435	0,0002		0,0143	-0,0165
	b3	Y= a + bx ²	47,566	-0,006		0,1878	0,1625
3	b1	Y= a + bx ²	32,116	-0,0018		0,1412	0,0935
	b2	Y= a + bx ²	19,131	-0,002		0,1421	0,0944
	b3	Y= a + bx ²	67,647	-0,025		0,4634	0,4336
4	b1	Y= a + bx ²	30,335	-0,0011		0,0273	-0,019
	b2	Y= a + bx ²	16,666	-0,0006		0,0073	-0,0397
	b3	Y= a + bx ²	35,351	0,002		0,0038	-0,0436
Angulo de visión							
Rango	banda	Modelo	a	b		r ²	r ² adj
1	b1	Y= a + bx ²	34,371	-0,00083		0,1611	0,0678
	b2	Y= a + bx ²	22,353	-0,0011		0,319	0,2435
	b3	Y= a + bx ²	86,229	-0,0075		0,273	0,192
2	b1	Y= a + bx ²	26,293	0,0006		0,0604	0,0311
	b2	Y= a + bx ²	15,665	0,0002		0,0126	-0,0183
	b3	Y= a + bx ²	69,785	-0,0056		0,2052	0,1803
3	b1	Y= a + bx ²	18,419	0,0024		0,1276	0,0791
	b2	Y= a + bx ²	13,382	0,0007		0,0086	-0,0465
	b3	Y= a + bx ²	-6,035	0,009		0,0316	-0,0222
4	b1	Y= a + bx ²	27,438	0,0006		0,0325	-0,0136
	b2	Y= a + bx ²	14,089	0,0006		0,0384	-0,0074
	b3	Y= a + bx ²	23,488	0,002		0,0335	-0,0125

Angulo de aproximación						
Rango	banda	Modelo	a	b	r ²	r ² adj
1	b1	Y= a + bx	20,261	0,127	0,155	0,0616
	b2	Y= a + bx	3,656	0,169	0,3126	0,2362
	b3	Y= a + bx	-42,573	1,173	0,2709	0,1899
2	b1	Y= a + bx	34,239	-0,061	0,056	0,0271
	b2	Y= a + bx	18,329	-0,021	0,013	-0,0178
	b3	Y= a + bx	-0,272	0,531	0,1819	0,1563
3	b1	Y= a + bx	20,124	0,128	0,1331	0,0849
	b2	Y= a + bx	5,532	0,146	0,1421	0,0945
	b3	Y= a + bx	-98,631	1,789	0,4501	0,4195
4	b1	Y= a + bx	25,573	0,047	0,021	-0,0257
	b2	Y= a + bx	14,295	0,023	0,0058	-0,0416
	b3	Y= a + bx	30,589	0,040	0,006	-0,047
Espacio disponible						
Rango	banda	Modelo	a	b	r ²	r ² adj
1	b1	Y= a + bx	30,227	-0,036	0,103	0,0033
	b2	Y= a + bx	16,766	-0,037	0,128	0,032
	b3	Y= a + bx	48,218	-0,283	0,1308	0,034
2	b1	Y= a + bx	30,016	-0,009	0,0133	-0,0196
	b2	Y= a + bx	17,129	-0,011	0,0606	0,0312
	b3	Y= a + bx	36,58	0,076	0,033	0,0028
3	b1	Y= a + bx	30,011	-0,0076	0,066	-0,0486
	b2	Y= a + bx	16,648	0,0012	0,0001	-0,0554
	b3	Y= a + bx	34,186	0,188	0,0707	0,0101
4	b1	Y= a + bx	30,088	-0,025	0,1109	0,0685
	b2	Y= a + bx	16,79	-0,024	0,1142	0,072
	b3	Y= a + bx	34,356	-0,019	0,0029	-0,0449