

U N I V E R S I D A D D E C O N C E P C I O N

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

Departamento de Manejo de Bosques y Medio Ambiente

**DESCRIPCION DEL EFECTO TOPOGRAFICO SOBRE LOS VALORES
DIGITALES DE LAS BANDAS MULTIESPECTRALES DEL SATELITE SPOT**



Por

OSCAR BERNARDO MARDONES ARIAS

MEMORIA PARA OPTAR AL
TITULO DE INGENIERO
FORESTAL.

CONCEPCION - CHILE

1997

**DESCRIPCION DEL EFECTO TOPOGRAFICO SOBRE LOS VALORES
DIGITALES DE LAS BANDAS MULTIESPECTRALES DEL SATELITE SPOT**



David González Lanteri

Profesor Asesor

Profesor Asistente;
Ingeniero Forestal; MSc



Jorge Cancino Cancino

Profesor Asesor

Profesor Asistente;
Ingeniero Forestal; MSc

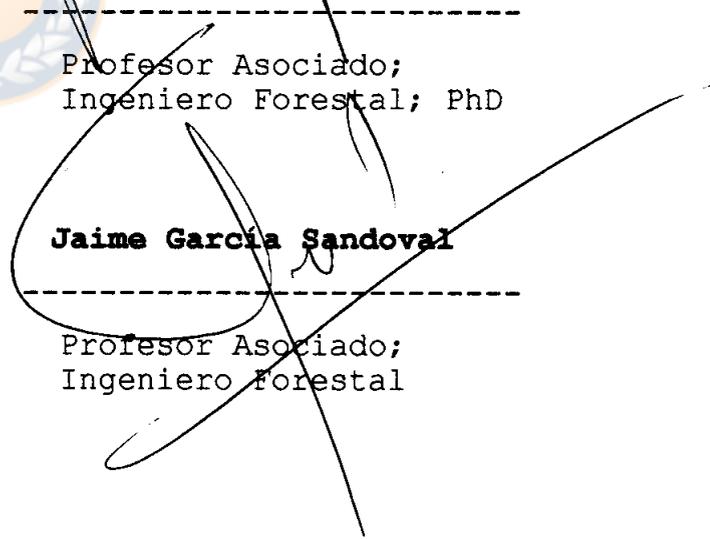


Pedro Real Hermosilla

Director Departamento

Profesor Asociado;
Ingeniero Forestal; PhD

Decano Facultad de Ciencias
Forestales



Jaime García Sandoval

Profesor Asociado;
Ingeniero Forestal

Calificación de la memoria de título:

David González Lanteri: Noventa y tres puntos

Jorge Cancino Cancino: Ochenta y seis puntos

INDICE DE MATERIAS

CAPITULOS	PAGINA
I	INTRODUCCION 1
II	METODOLOGIA 9
	2.1 Descripción del Area de Estudio. 9
	2.2 Generación de Plano Base. 10
	2.3 Generación de información base. 11
	2.3.1 Información Dasométrica. 11
	2.3.2 Información Topográfica. 11
	2.3.3 Información Satelital. 11
	2.4 Geometría de observación. 14
	2.5 Análisis estadístico. 21
III	RESULTADOS Y DISCUSION 24
	3.1 Análisis global de los datos. 24
	3.2 Análisis de los datos por rodales. 25
IV	CONCLUSIONES 29
V	RESUMEN 30
VI	SUMMARY 31
VII	BIBLIOGRAFIA 32
VIII	APENDICE 34

INDICE DE TABLAS

TABLA N°	PAGINA
<u>En el texto</u>	
1 Características del sensor HVR-SPOT (Haute Resolution Visible).....	2
2 Datos asociados a cada punto de muestreo.....	22
3 Resultado del análisis de regresión múltiple para el DCM.....	27
4 Resultado del análisis de regresión múltiple para el N°Arboles/ha.....	28
<u>En el Apéndice</u>	
1 Resultados del ajuste entre el valor digital de la banda 1 del satélite SPOT y la exposición.....	36
2 Resultados del ajuste entre el valor digital de la banda 2 del satélite SPOT y la exposición.....	36
3 Resultados del ajuste entre el valor digital de la banda 3 del satélite SPOT y la exposición.....	36
4 Resultados del ajuste entre el valor digital de la banda 1 del satélite SPOT y la pendiente.....	38
5 Resultados del ajuste entre el valor digital de la banda 2 del satélite SPOT y la pendiente.....	38
6 Resultados del ajuste entre el valor digital de la banda 3 del satélite SPOT y la pendiente.....	38
7 Resultados del ajuste entre el valor digital de la banda 1 del satélite SPOT y la exposición respecto al sol.....	40

8	Resultados del ajuste entre el valor digital de la banda 2 del satélite SPOT y la exposición respecto al sol.....	40
9	Resultados del ajuste entre el valor digital de la banda 3 del satélite SPOT y la exposición respecto al sol.....	40
10	Resultados del ajuste entre el valor digital de la banda 1 del satélite SPOT y el ángulo solar.....	42
11	Resultados del ajuste entre el valor digital de la banda 2 del satélite SPOT y el ángulo solar.....	42
12	Resultados del ajuste entre el valor digital de la banda 3 del satélite SPOT y el ángulo solar.....	42
13	Resultados del ajuste entre el valor digital de la banda 1 del satélite SPOT y el ángulo de visión....	44
14	Resultados del ajuste entre el valor digital de la banda 2 del satélite SPOT y el ángulo de visión....	44
15	Resultados del ajuste entre el valor digital de la banda 3 del satélite SPOT y el ángulo de visión....	44
16	Resultados del ajuste entre el valor digital de la banda 1 del satélite SPOT y el ángulo de aproximación.....	46
17	Resultados del ajuste entre el valor digital de la banda 2 del satélite SPOT y el ángulo de aproximación.....	46
18	Resultados del ajuste entre el valor digital de la banda 3 del satélite SPOT y el ángulo de aproximación.....	46
19	Resultados del ajuste entre la exposición y el ángulo de aproximación.....	48
20	Resultados del ajuste entre la exposición respecto al sol y el ángulo de aproximación.....	48
21	Parámetros estadísticos de los ajustes entre el diámetro cuadrático medio y las bandas 1, 2 y 3 a)banda 1, b)banda 2, c)banda 3.....	50

22	Parámetros estadísticos y modelos ajustados para los diferentes rodales, entre la banda 3 y el ángulo de aproximación.....	55
----	--	----



INDICE DE FIGURAS

FIGURA N°	PAGINA
<u>En el texto</u>	
1	Geometría de observación de una imagen satelital. 6
2	Efecto de sombra causado por la topografía 6
3	Proceso de generación de la información base 14
4	Información angular obtenida de cada punto muestral 15
5	Corrección de la posición de cada punto de muestreo respecto a la posición del satélite 16
6	Traslado de los ejes coordenados para el cálculo del vector de reflectancia solar 19
7	Ajuste del valor espectral de la banda 3 del satélite SPOT..... 23
<u>En el apéndice</u>	
1	Efecto de la exposición sobre los valores de la banda 1 del satélite SPOT..... 35
2	Efecto de la exposición sobre los valores de la banda 2 del satélite SPOT..... 35
3	Efecto de la exposición sobre los valores de la banda 3 del satélite SPOT..... 35
4	Efecto de la pendiente sobre los valores de la banda 1 del satélite SPOT..... 37
5	Efecto de la pendiente sobre los valores de la banda 2 del satélite SPOT..... 37
6	Efecto de la pendiente sobre los valores de la banda 3 del satélite SPOT..... 37

7	Efecto de la exposición respecto al sol sobre los valores de la banda 1 del satélite SPOT.....	39
8	Efecto de la exposición respecto al sol sobre los valores de la banda 2 del satélite SPOT.....	39
9	Efecto de la exposición respecto al sol sobre los valores de la banda 3 del satélite SPOT.....	39
10	Efecto del ángulo solar sobre los valores de la banda 1 del satélite SPOT.....	41
11	Efecto del ángulo solar sobre los valores de la banda 2 del satélite SPOT.....	41
12	Efecto del ángulo solar sobre los valores de la banda 3 del satélite SPOT.....	41
13	Efecto del ángulo de visión sobre los valores de la banda 1 del satélite SPOT.....	43
14	Efecto del ángulo de visión sobre los valores de la banda 2 del satélite SPOT.....	43
15	Efecto del ángulo de visión sobre los valores de la banda 3 del satélite SPOT.....	43
16	Efecto del ángulo de aproximación sobre los valores de la banda 1 del satélite SPOT.....	45
17	Efecto del ángulo de aproximación sobre los valores de la banda 2 del satélite SPOT.....	45
18	Efecto del ángulo de aproximación sobre los valores de la banda 3 del satélite SPOT.....	45
19	Valor del ángulo de aproximación respecto a la exposición.....	47
20	Valor del ángulo de aproximación respecto a la exposición respecto al sol.....	47
21	Valor espectral respecto al diámetro cuadrático medio.....	49
22	Valor de la banda 3 del satélite SPOT respecto al ángulo de aproximación para los distintos	

	rodiales.....	54
23	Imagen satelital del área de estudio, predio Coliumo, del 8 de septiembre de 1990.....	57



I INTRODUCCION

La calidad de la información cartográfica es de vital importancia para cualquier proceso que demande algún tipo de decisión sobre la base de ésta. La calidad depende en gran medida de la velocidad con la que se registren los diferentes cambios que sufre la superficie terrestre, causados por una parte por las sucesiones estacionales y fuerzas activas de la tierra; y por otra, por la acción directa o indirecta del hombre (Buiten y Clevers 1993).

Monitorear los cambios que suceden en la corteza terrestre ha sido un desafío constante del hombre en todo momento. En algunos caso dichos cambios son muy rápidos, mientras que en otros son de lento proceso, casi imperceptibles. En un principio, la detección de los cambios se realizaba en terreno (in situ), lo cual fue cambiando hasta derivar en los sensores remotos (Lillesand y Kiefer 1994).

Los sensores remotos que más se han utilizado son las cámaras aéreas, obteniéndose fotografías de la superficie terrestre. Hoy en día, es posible observar y detectar cambios desde sensores montados sobre plataformas satelitales, convirtiéndose en una herramienta muy valiosa para el estudio de la tierra.

Existen diferentes tipos de sistemas remotos de teledetección, los cuales cumplen con diferentes funciones, pudiendo ser clasificados de acuerdo a la forma de adquisición de la energía. Los sensores activos, corresponden a aquellos que emiten su propia energía. Los

sensores pasivos, en cambio, recogen la energía proveniente del sol y que es reflejada por la superficie terrestre (Lillesand y Kieffer 1994).

El poder de discriminación que tienen los sistemas de teledetección espacial es alto. La capacidad de captar energía imperceptible para el ojo humano es una de las características más importante que poseen. Esta capacidad depende de la resolución que posean los sensores satelitales. Así se puede diferenciar la resolución espacial, resolución espectral, resolución radiométrica y resolución temporal. En este sentido, el satélite SPOT (*Système Probatoire d'Observation de la Terre*), tiene una resolución espacial de 10 m para el modo pancromático y de 20 m para el modo multiespectral; resolución espectral de tres bandas, que abarcan desde 0,5 μm hasta 0,89 μm para el modo multiespectral y una banda que abarca desde 0,51 μm hasta 0,73 μm para el modo pancromático. La resolución radiométrica es de 8 bits para el modo multiespectral y de 6 bits para el pancromático. La resolución temporal es de 26 días tanto para el modo multiespectral como para el pancromático (tabla 1).

Tabla 1. Características del sensor HRV-SPOT (Haute Resolution Visible).

Bandas	Amplitud	Resolución Espacial
XS1	0,5 - 0,59 μm	20 metros
XS2	0,61 - 0,68 μm	20 metros
XS3	0,79 - 0,89 μm	20 metros
P	0,51 - 0,73 μm	10 metros

La información adquirida por los sistemas de teledetección espacial se complementa de muy buena manera con los sistemas tradicionales, como las fotografías aéreas y visitas a terrenos, mejorándose así las capacidades de procesos y disminuyendo los costos implicados.

Las imágenes satelitales presentan ventajas que son fundamentales para el desarrollo de las diferentes áreas de aplicación. Las coberturas globales y periódicas de la superficie terrestre, visión panorámica, homogeneidad de los datos, información sobre regiones no visibles de espectro, y el formato digital de las imágenes son algunos aspectos que muestran las ventajas potenciales de las imágenes satelitales.

El campo de aplicación de las imágenes satelitales es muy amplio y multidisciplinario. Así, pueden utilizarse para realizar estudios hidrológicos, estudios de suelos, coberturas vegetales, estudios poblacionales, predicciones de rendimientos, inventarios forestales y detección de incendios entre otros.

Las posibilidades de las imágenes satelitales son muchas, no obstante, la información que es captada por los sensores presenta distorsiones causadas por distintas fuentes entre las que se pueden nombrar: distorsiones causadas por la plataforma, la rotación terrestre, características del sensor, la atmósfera, y el efecto que causa la topografía.

Existen diferentes técnicas para corregir las distorsiones antes señaladas. La corrección geométrica y la corrección radiométrica de los datos corresponden a manejos necesarios

que deben ser realizados antes de analizar en forma correcta una imagen. La corrección geométrica básicamente corresponde a la ubicación de cada unidad de información denominada pixel, dentro de un sistema de referencia previamente establecido, lo cual no implica un cambio en la información original, sino que sólo un desplazamiento de ésta. La corrección radiométrica en cambio, implica una transformación de los valores digitales de los pixeles de acuerdo a la naturaleza de la distorsión (Chuvieco 1991).

Existen efectos que son más simples de corregir, como ser la pérdida de información de alguna línea, causada por un mal funcionamiento del sensor (Gutman 1991). Otros como los causados por la atmósfera, la topografía y la geometría de observación son muy complicados de modelar y corregir (Buiten y Clevers 1993; Cihlar et al. 1994).

Gran parte de los estudios realizados con imágenes satelitales se han hechos en zonas con efecto topográfico pequeño, lo cual ha derivado en que este efecto se ignore en aquellos lugares en que sí existe una fuerte variación del relieve, provocando por lo tanto variaciones significativas en los valores digitales y errores posteriores en el análisis de las imágenes (Leprieur y Durand 1988; Burgess et al. 1994).

El efecto de la topografía está definido como una variación en los valores de reflectancias de las superficies inclinadas respecto a los valores de reflectancia de las superficies horizontales. Es una función de la orientación de la superficie respecto al origen de la fuente de luz y a la posición del sensor (Burgess et al. 1994).

La posición del satélite en el momento de toma de las imágenes es otro aspecto que afecta los valores digitales de reflectancia. Si la tierra fuese una superficie reflectora isotrópica, entonces se podría prescindir del ángulo de observación, luego las variaciones de radiancia recibida por el satélite serían el resultado de una combinación del efecto presentado por la atmósfera y la diferencia de ángulos de iluminación. Sin embargo, se ha demostrado que este no es el caso (Smith et al. 1980; Gutman 1991).

Es necesario contar con funciones de distribución de reflectancia para caracterizar el comportamiento de la iluminación directa sobre un tipo de cobertura y que dependa de la incidencia solar y los ángulos de excitación de la radiancia. En otras palabras, las propiedades radiométricas y geométricas de las coberturas de terrenos. En la práctica se refiere al ángulo de elevación solar, ángulo de observación, acimut de observación y pendientes, las cuales afectan las medidas de la radiancias obtenidas para una cobertura particular de terreno (figura 1).

Uno de los efectos más obvio causados por la topografía sobre los valores digitales de la imagen, es que provoca sectores con sombra. La magnitud de este efecto en los datos iniciales depende del ángulo de elevación solar, el cual disminuye al acercarse al cenit solar (figura 2).

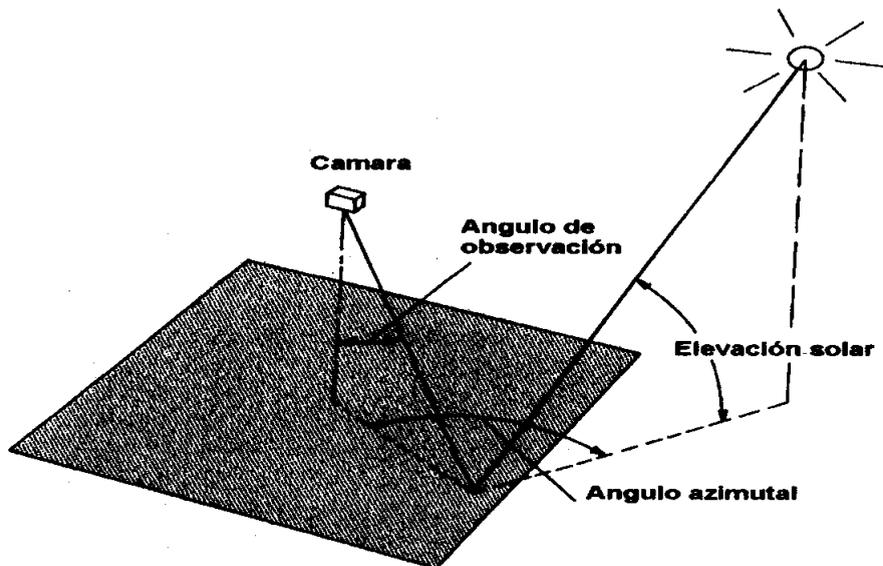


Figura 1. Geometría de observación de una imagen satelital.

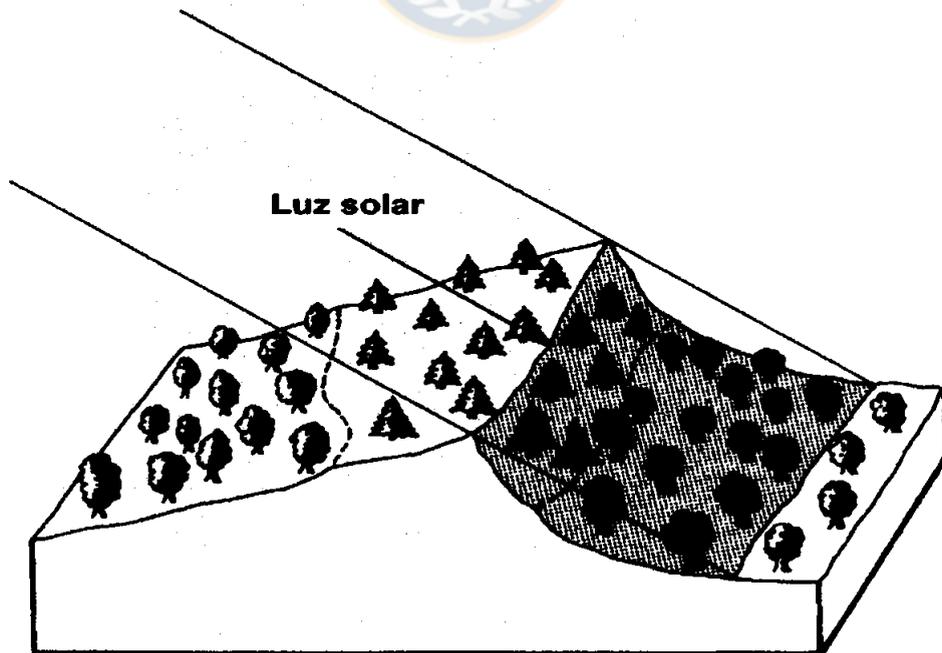


Figura 2. Efecto de sombra causado por la topografía.

Existen otros efectos causados por la topografía que son aun más complejos, como son las variaciones de la longitud atmosférica debidas a variaciones de altitud del terreno y que provoca diferencias significativas en los distintos valores de reflectancias espectral y combinaciones de bandas (Teillet y Staenz 1992).

El efecto de la topografía sobre los valores espectrales depende también del tipo de sensor que se esté utilizando y, principalmente, de la resolución radiométrica que este posea. Los datos del SPOT y Landsat tienden a tener una discriminación razonable del tipo de cobertura, excepto en áreas de alto relieve topográfico (Holben y Justice 1980).

La naturaleza del efecto topográfico ha sido estudiada por diferentes autores. Se han realizado numerosos estudios para desarrollar modelos matemáticos de elevación del terreno, los cuales deberían mejorar la descripción cuantitativa de cobertura forestal a través de parámetros topográficos (Fleming y Hoffer 1979), pero esos modelos no toman en cuenta la distribución de la reflectancia espectral con las variaciones topográficas.

La iluminación y efecto direccional están topográficamente relacionados. El efecto de la iluminación depende principalmente del coseno del ángulo de incidencia solar de cada pixel, en tanto que el efecto direccional es causado por la modificación de la reflectancia debido al ángulo de incidencia solar y al ángulo de observación de cada pixel (Schott 1997).

Las observaciones topográficas pueden mejorar significativamente la información digital de las imágenes satelitales, con lo cual se puede tener una mayor comprensión de los factores que afectan la respuesta espectral de coberturas forestales en áreas montañosas. De ahí la importancia que tiene la corrección de este efecto y la necesidad de considerar modelos que incluyan este factor como parte de ellos; con ello se lograrían respuestas más precisas y cercanas a la realidad.

Este estudio tiene como objetivo principal determinar la influencia que ejerce la topografía sobre los valores de reflectancia espectral de la imagen satelital multiespectral SPOT. Determinándose por una parte relaciones matemáticas que existen entre los valores de reflectancia espectral de cada una de las bandas y la exposición y la pendiente del terreno. Por otro parte obteniéndose relaciones que existentes entre dichos valores de reflectancia y el efecto que tiene la geometría de observación sobre éstos; principalmente los ángulos asociados a cada punto de muestreo.

II METODOLOGIA

2.1 Descripción del Area de Estudio.

Este estudio fue realizado con información recopilada en el predio Coliumo, localizado en la Comuna de Tomé, Provincia de Concepción, Octava Región, a 2 Km del Centro de Tomé y ubicado a $72^{\circ} 55' 39'$ grados de longitud y los $36^{\circ} 34' 54'$ grados de latitud.

El predio, en el momento de la toma de datos (Primavera-Verano 1996), poseía una superficie total de 948.7 ha, de las cuales 701.13 ha estaban cubiertas por plantaciones jóvenes y adultas de eucaliptos y pino.

Las plantaciones de pino radiata presentaban diferentes edades, desde 1 hasta 48 años. La superficie aproximada que ocupaban era de 367.52 ha, de las cuales 174.53 ha correspondían a bosques adultos.

Esta investigación fue hecha utilizando información de rodales adultos de pino radiata, los que contaban con cobertura de copas completa en el momento de toma de la imagen satelital.

En los rodales se realizaron parcelas de inventario con una intensidad de aproximadamente una por cada hectárea. En esas parcelas se midieron variables dasométricas de los árboles (dap, altura total y la altura por calidad de trozas), variables del terreno (pendiente, posición de la parcela respecto a la ladera, exposición respecto al norte, erosión del suelo) y variables de la vegetación acompañante

(tipo de cobertura de sotobosque, altura, etc). Con estos datos se determinaron las características estructurales, estado de crecimiento y características volumétricas.

2.2 Generación de Plano Base.

La cartografía del predio fue realizada mediante restitución aerofotogramétrica, utilizando para ello fotografías aéreas escala 1:20.000 (FONDEF 1992). La fotointerpretación se realizó sobre fotografías color de formato pequeño ampliado (escala 1 : 10.000) tomadas en enero de 1996.

El trabajo preliminar con los pares estereoscópicos fue la interpretación visual de las fotografías bajo el estereoscopio de espejos. En una primera etapa se diferenciaron unidades homogéneas, las cuales fueron caracterizadas de acuerdo a las combinaciones particulares del color, textura, relaciones con el ambiente circundante, altura de la vegetación, tamaño de las copas y otros factores asociados. La fotointerpretación fue apoyada con visitas a terreno, con objeto de verificar los deslindes de los polígonos.

Los planos de uso actual de suelo y de curvas de nivel con x cota de 10 m se realizaron en forma integrada mediante el empleo de sistemas tradicionales de cartografía y sistemas de cartografía automatizada. Posteriormente esos planos fueron digitalizados y traspasados al Sistema de Información Geográfico (SIG).

2.3 Generación de información base.

2.3.1 Información Dasométrica. En cada polígono definido en el plano de uso actual se realizaron parcelas de inventario de 500 m² de superficie. La intensidad de muestreo fue de un 5% aproximadamente. De cada parcela se obtuvo la densidad de rodal, área basal y el diámetro cuadrático medio (DCM).

2.3.2 Información Topográfica. La información topográfica (Porcentaje de Pendiente (PP) y Exposición (Ex)) se obtuvo mediante el TIN (Triangular Irregular Network) que es un procedimiento de ARC/INFO. Este genera una malla de triángulos a través de las curvas de nivel, los cuales llevan asociados a los polígonos que se generan los valores PP y Ex. Posteriormente, se realizó una intersección de la cubierta TIN y la cubierta de vegetación generada (de uso actual); luego se seleccionaron aquellos polígonos que tenían como atributo asociado la especie pino. Con esto se generó una cubierta que poseía sólo rodales de pino e información topográfica, de superficie y composición.

2.3.3 Información Satelital. En el estudio se utilizó una imagen satelital SPOT (XS) multiespectral (figura 23, apéndice), tomada el 8 de septiembre de 1990, a las 15:08 hrs. Geometría para el centro de la imagen: ángulo de elevación solar de 31° y un acimut solar de 30,7°. Las coordenadas del centro de la imagen corresponde a 36° 51' 24'' de Latitud y 72° 44' 32'' de Longitud. El ángulo de observación y de orientación del satélite en el momento de toma de la imagen corresponde a: 21,4° y 8,8° respectivamente.

La imagen se corrigió geoméricamente estableciendo diferentes puntos de control basados en la carta regular IGM escala 1:50.000 de Tomé, obteniéndose las funciones de transformación siguientes:

$$X_0 = 22350.36 + 0.050459*X - 0.009541*Y$$

$$Y_0 = 300552.675 - 0.009263*X - 0.049435*Y$$

Donde: X_0 : es la posición de la coordenada X corregida geoméricamente.

Y_0 : es la posición de la coordenada Y corregida geoméricamente.

X, Y : son las coordenadas de la imagen original, sin corrección geométrica.

Los errores de la corrección geométrica, error EMC (Error medio cuadrático), es igual a :

$$X_{EMC} = 1.1$$

$$Y_{EMC} = 1.1$$

$$Total_{EMC} = 1.5$$

Donde: X_{EMC}, Y_{EMC} : son los errores medios cuadráticos medidos en pixeles para las coordenadas X e Y respectivamente.

$Total_{EMC}$: es el error medio cuadrático total medido en pixeles.

Además se realizó un realce del contraste para una mejor discriminación de la imagen y tener un rango radiométrico mayor. Para esto se aplicó una expansión lineal (Linear

stretch) del histograma en cada una de las bandas asociadas a la imagen (Star y Estes 1995)

La información de cada una de las bandas espectrales de las imágenes fue transformada a información vectorial de polígono. Así se generaron tres cubiertas vectoriales, las cuales poseen el atributo denominado "grid-code" que corresponde a la información de la radiancia de acuerdo a la banda a que pertenece.

En forma paralela se generó una cubierta vectorial de puntos, la que se encuentra contenida dentro de los polígonos de la cubierta de pino. La distancia entre cada punto es de 20 m con el objetivo de que cada uno coincida exactamente con cada pixel de la imagen.

Finalmente se interceptó la cubierta de puntos con las cubiertas de polígonos de vegetación (las cuales contiene la información de identificación del rodal), las cubiertas de vectores de polígonos transformada de la imagen multiespectral (las tres Bandas espectrales) y con la cubierta TIN de polígonos (que contiene la información topográfica PP y Ex para cada pixel). Con esto se tiene una cubierta de puntos los cuales poseen la base de datos con todas la información para cada uno de los pixeles involucrados dentro de los diferentes rodales de pino presentes; el procedimiento se grafica en la figura 3.

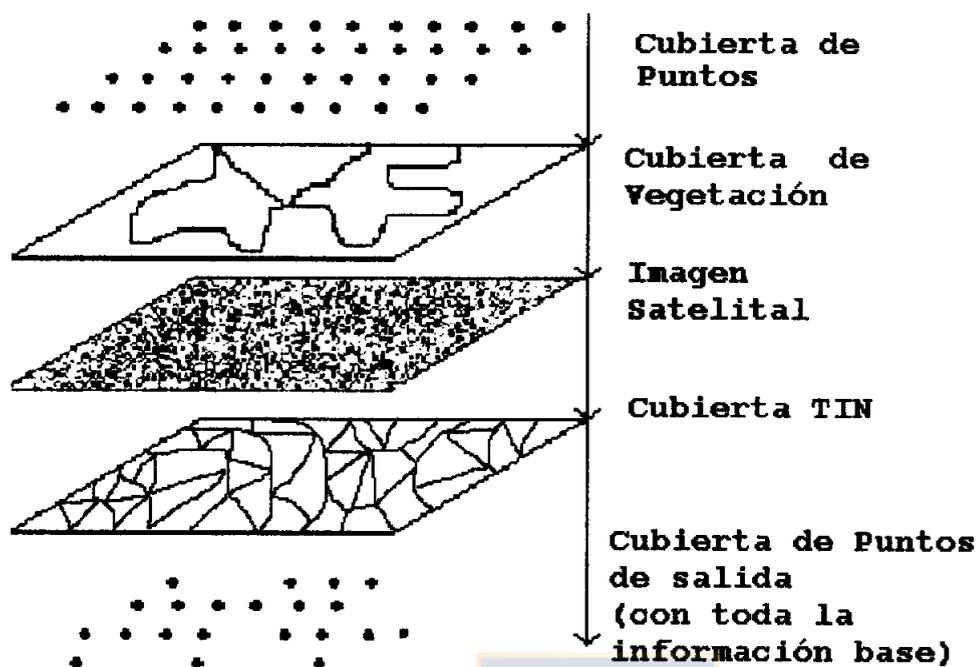


Figura 3. Proceso de generación de la información base.

2.4 Geometría de observación.

Cada uno de los puntos de muestreo genera un plano tangente diferente debido a la diferentes pendientes y exposiciones que estos presentan los cuales produce diferentes ángulos de incidencia de los rayos solares y diferentes ángulos de observación respecto al sensor. En cada punto se calcularon tres ángulos. El primero, denominado **ángulo solar** es el que se forma entre el sol y el plano tangente al punto de muestreo, el segundo, denominado **ángulo de visión**, corresponde al ángulo formado entre el plano tangente al punto de muestreo y el vector formado el sensor, y el último, denominado **ángulo de aproximación**, el ángulo formado entre el vector de reflectancia solar y el vector del sensor (Figura 4).

Los ángulos asociados a cada punto de muestreo se obtuvieron mediante procedimientos de álgebra vectorial a partir de los ángulos de elevación solar y acimut solar, además de información de la posición del satélite en el momento de la toma de la imagen.

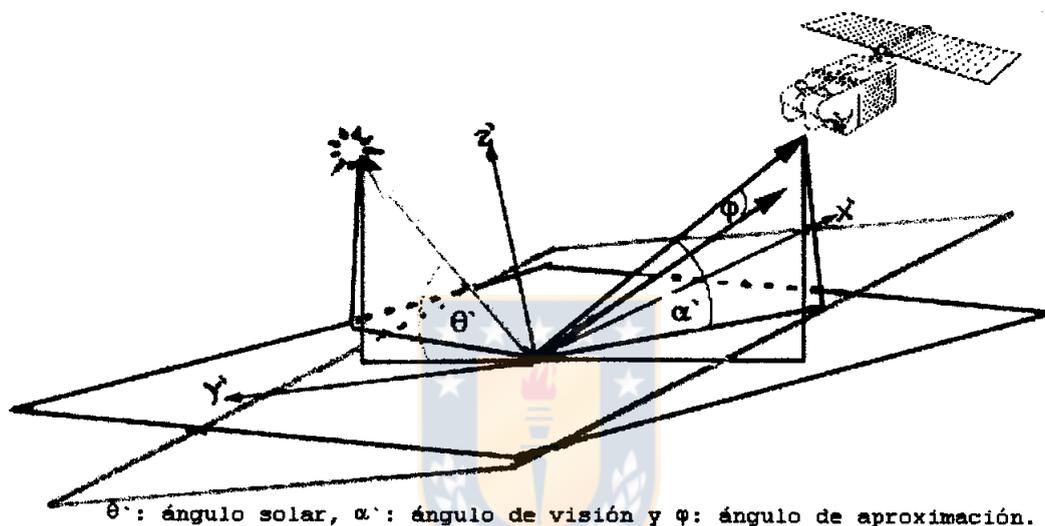


Figura 4. Información angular obtenida de cada punto muestral.

Para manejar la información de las posiciones tanto del satélite como del sol en forma vectorial se estableció un sistema de coordenadas. En éste el Norte corresponde al eje positivo X, el Oeste corresponde al eje positivo Y, y el vector normal que sale de la superficie corresponde al eje positivo Z.

El centro del eje coordenado se encuentra ubicado en la posición de cada punto de muestreo. Debido a esto es necesario corregir los ángulos que corresponden al sensor (de observación y orientación) ya que estos son medidos

sobre el centro de la imagen. Los ángulos asociados al sol no son corregidos ya que por la distancia a la cual se encuentra no afecta en forma significativa los valores de los ángulos.

La corrección de los ángulos del sensor se realizó de la siguiente forma:

$$N = S + P \quad (\text{Figura 5})$$

Donde S: vector formado por el sensor

P: vector formado por la posición del punto.

N: vector formado por la observación del sensor desde el punto.

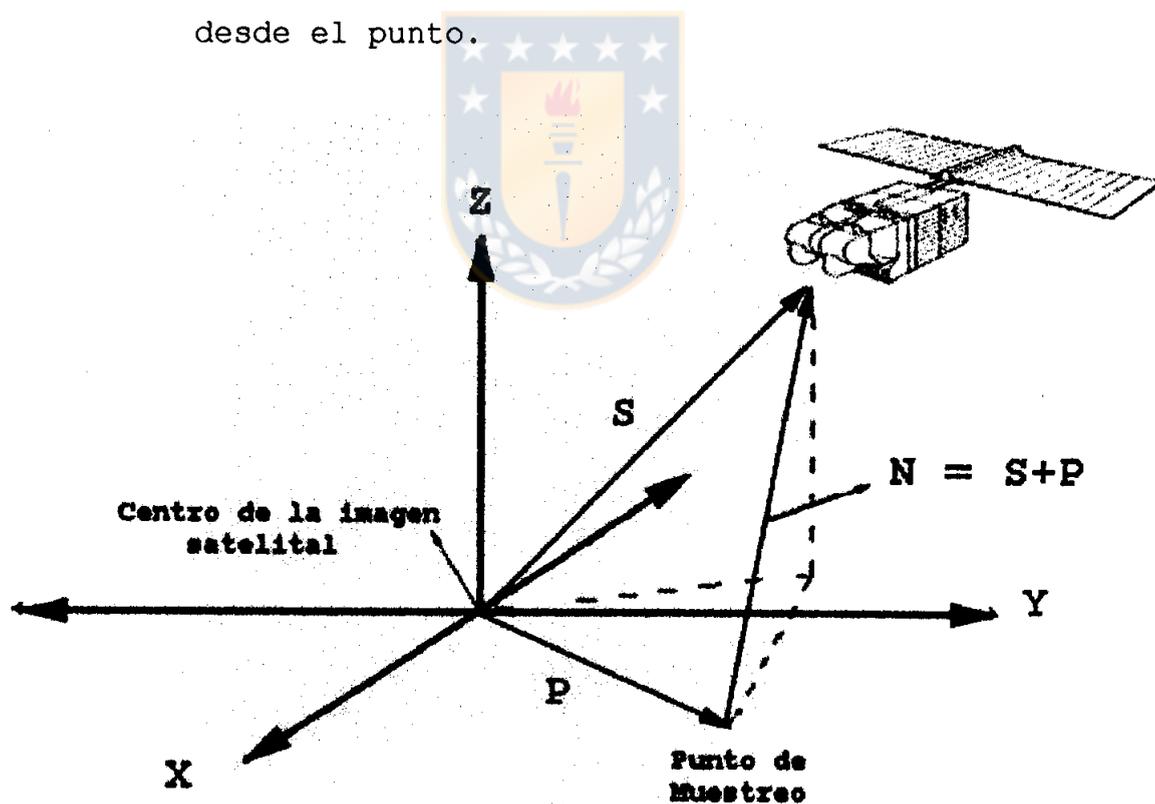


Figura 5. Corrección de la posición de cada punto de muestreo respecto a la posición del satélite.

Una vez que se tiene el nuevo vector corregido (N), se recalculan los ángulos de observación y orientación:

$$\alpha = \text{Arctan}((N_3/N_1) * \text{Cos}\beta),$$

$$\beta = \text{Arctan}(N_2/N_1)$$

Donde : α : nuevo ángulo de observación

β : nuevo ángulo de orientación

N_1 : componente en el eje X del vector N

N_2 : componente en el eje Y del vector N

N_3 : componente en el eje Z del vector N

Con este sistema coordenado se generan los vectores formado por la posición del sol y el sensor respecto a la coordenada del punto de muestreo. Como el objetivo es obtener los ángulos que se producen entre la superficie, el sol, y el sensor como consecuencia de las variaciones de la pendiente y la exposición, se asume que los vectores tienen magnitud unitaria para mayor comodidad.

El cálculo del vector formado por el sol y la superficie se realizó de la siguiente manera:

$$\text{sen}\theta' = A * E / (|A| * |E|)$$

$$A = [|A| * \text{cos}\phi * \text{cos}\theta, |A| * \text{sen}\phi * \text{cos}\theta, |A| * \text{sen}\phi]$$

$$E = [|E| * \text{sen}\delta * \text{cos}\gamma, |E| * \text{sen}\delta * \text{sen}\gamma, |E| * \text{cos}\theta]$$

Donde θ' : ángulo solar

A: vector solar

E: vector normal al plano tangente al punto de muestreo

ϕ : acimut solar

θ : elevación Solar

δ : pendiente del terreno (grados)

γ : exposición del terreno (grados)

De igual manera se realizó el cálculo del vector formado por la posición del sensor y la superficie, esto es:

$$\sin \alpha' = N \cdot E / (|N| \cdot |E|)$$

$$N = [|N| \cdot \cos \beta \cdot \cos \alpha, |N| \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha, |N| \cdot \sin \sigma]$$

$$E = [|E| \cdot \sin \delta \cdot \cos \gamma, |E| \cdot \sin \delta \cdot \sin \gamma, |E| \cdot \cos \delta]$$

Donde α' : es el ángulo de visión

N: vector formado por la posición del Sensor

E: vector normal al plano tangente al punto de muestreo

β : ángulo de orientación

σ : ángulo de observación

δ : pendiente del terreno medida en grados

γ : exposición del terreno medida en grados

Para calcular el ángulo de aproximación es necesario primero obtener el vector de reflectancia solar, para esto se rota el eje coordenado original hacia el plano de reflectancia formado por la superficie, posteriormente se replantean los vectores, solar y del sensor, de acuerdo al nuevo eje coordenado. Para obtener el vector de reflectancia solar (figura 6) es necesario hacer negativa las componentes X e Y del vector solar, por último se determina el ángulo que existe entre ambos vectores, el de reflectancia solar y el del sensor (ángulo de visión), el cual corresponde al ángulo de aproximación.

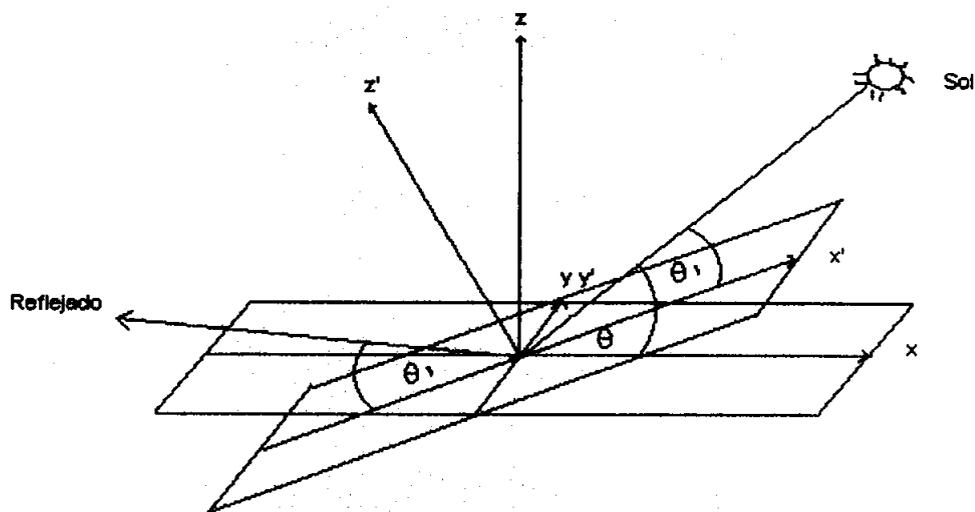


Figura 6. Traslado de los ejes coordenados para el cálculo del vector de reflectancia solar.

Para obtener el vector de reflectancia, como se mencionó anteriormente, se rotó el eje coordenado, quedando este sobre la superficie de reflectancia (figura 6), para lo cual se calculan dos vectores pertenecientes al plano formado por la superficie los cuales deben ser ortogonales entre sí (producto cruz) y para mayor comodidad, unitarios.

$$\mathbf{X}' = [X_1, X_2, X_3];$$

$$X_1 = 1/\sqrt{(1 + \cos^2 \gamma \tan^2 \delta)}$$

$$X_2 = 0$$

$$X_3 = -\cos \gamma \tan \delta / \sqrt{(1 + \cos^2 \gamma \tan^2 \delta)}$$

$$\mathbf{Y}' = [Y_1, Y_2, Y_3]$$

$$Y_1 = Z_2 * X_3 - Z_3 * X_2$$

$$Y_2 = Z_3 * X_1 - Z_1 * X_3$$

$$Y_3 = Z_1 * X_2 - Z_2 * X_1$$

$$\mathbf{Z}' = [Z_1, Z_2, Z_3]$$

$$Z_1 = \cos \gamma \sin \delta$$

$$Z_2 = \sin \gamma \sin \delta$$

$$Z_3 = \cos \delta$$

Donde: X' : eje X trasladado;
 Y' : eje Y trasladado;
 Z' : eje Z trasladado;
 γ : exposición;
 δ : pendiente;.

Luego se recalculan las componentes del vector formado entre la superficie y la posición del sol (vector solar), para el nuevo eje coordenado:

$$R_1 = \cos\theta\cos\phi; R_2 = \sin\phi\cos\theta; R_3 = \sin\theta$$

$$R'_1 = -(R_1*X_1+R_2*X_2+R_3*X_3)/\sqrt{(X_1^2+X_2^2+X_3^2)};$$

$$R'_2 = -(R_1*Y_1+R_2*Y_2+R_3*Y_3)/\sqrt{(Y_1^2+Y_2^2+Y_3^2)};$$

$$R'_3 = (R_1*Z_1+R_2*Z_2+R_3*Z_3)/\sqrt{(Z_1^2+Z_2^2+Z_3^2)}.$$

Donde: R_1 : componente en el eje X original del vector solar,
 R_2 : componente en el eje Y original del vector solar,
 R_3 : componente en el eje Z original del vector solar,
 R'_1 : componente X del vector de reflectancia solar en sistema original,
 R'_2 : componente Y del vector de reflectancia solar en el sistema original,
 R'_3 : componente del vector de reflectancia solar en el sistema original.

Finalmente, se calcula el vector formado por la posición del sensor para el eje trasladado, y se calcula el ángulo formado por los dos vectores, el del sol reflejado y el del sensor:

$$N1 = \cos\alpha\cos\beta, N2 = \sin\beta\cos\alpha, N3 = \sin\alpha;$$

$$\phi = \arcsin(R'_1*N1+R'_2*N2+R'_3*N3)$$

Donde: N1: componente del vector del sensor en el eje X original

N2: componente del vector del sensor en el eje Y original

N3: componente del vector del sensor en el eje Z original

ϕ : ángulo de aproximación.

2.5 Análisis estadístico.

Con la base de datos generada, se realizó una reelección de los rodales útiles para el estudio, principalmente por el número de datos que estos poseían el cual varió de acuerdo a la superficie de cada uno de los polígonos. En el análisis se usó 23 rodales de pino (tabla 2)

Con objeto de determinar si existen diferencias significativas entre los valores de reflectancias causados por las variables topográficas y geometría de observación se analizaron cada uno de los rodales mediante prueba de hipótesis y análisis de regresión. Los análisis fueron realizados utilizando dos software estadísticos, STATMOST (Statistical Analysis and Graphics) y Tablecurve (Jandel).

Los datos se consideraron en una primera etapa en forma global, tomando la totalidad de éstos, obteniéndose modelos que representan los cambios ocurridos de los valores espectrales de las bandas en la medida que cambian las

diferentes variables topográficas y de geometría de observación.

Tabla 2. Datos asociados a cada punto de muestreo.

Parámetros dasométricos	Rodal N°Arboles/ha Area basal/ha Diámetro Cuadrático medio
Parámetros Topográficos	Coordenada X Coordenada Y Pendiente (% y °) Exposición respecto al Norte(°) Exposición respecto a la posición del Sol (°) Acimut Solar (°) Angulo de elevación solar(°) Angulo de orientación del Sensor(°) Angulo de observación del sensor(°) Angulo solar(°) Angulo de visión Angulo de aproximación
Parámetros Espectrales	Valor de radiancia Banda 1 Valor de radiancia Banda 2 Valor de radiancia Banda 3

En una segunda etapa se generaron modelos para cada uno de los rodales, para determinar como varían los valores de la banda 3 respecto al ángulo de aproximación.

Se generó un modelo que pudiese predecir el valor del promedio de la densidad y diámetro cuadrático medio de cada uno de los rodales en base a los valores espectrales de las bandas 1 y 2, y el valor ajustado a cero pendiente de la banda 3.

El ajuste del valor de la banda 3 se realizó en base al modelo ajustado para la banda 3 y el ángulo de aproximación, considerando como ángulo objetivo el que se forma cuando existe cero pendiente (ángulo de aproximación 80° aproximadamente).

$$B_{aj} = B_0 + \Delta B \quad \Delta B = B_E - B_1$$

$$B_E = 78.18 - 2.32 * A_0 / \ln A_0$$

Donde: B_{aj} : es el valor ajustado de la banda 3

B_0 : valor original de la banda 3

B_E : valor esperado de acuerdo ángulo objetivo (80°)

B_1 : valor calculado para el punto de muestreo de acuerdo al ángulo de aproximación

A_0 : ángulo de aproximación objetivo (80°).

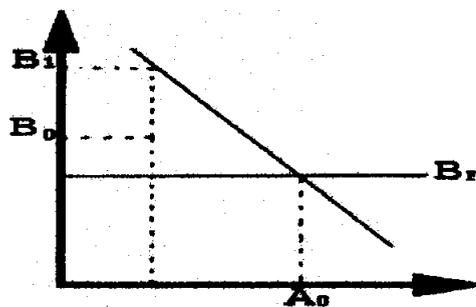


Figura 7 Ajuste del valor espectral de la banda 3 del satélite SPOT.

III RESULTADOS Y DISCUSION

3.1 Análisis global de los datos.

La exposición tiene una mayor influencia sobre los valores espectrales que se encuentra a nivel del infrarrojo o sea en la banda 3. La distribución de los valores espectrales respecto a la exposición se presenta en forma de onda periódica, encontrándose un máximo en los 50° y un mínimo en los 230° (figura 1, 2 y 3 apéndice).

La banda 2 es la que presenta la relación más baja con la exposición, con un valor de $r^2 = 0.23$ del modelo de regresión simple (tabla 2 del apéndice). Dichos cambios de exposición no consideran los cambios de pendiente que se producen dentro de las diferentes exposiciones presentes, por lo tanto, la pendiente está aportando error a los ajustes realizados.

La pendiente de la superficie no presenta correlaciones buenas con respecto a los valores de ninguna de las bandas lo cual indica la baja influencia que tiene esta variable sobre los valores espectrales (figuras 4, 5 y 6 apéndice).

La exposición de las superficies respecto al sol, muestra que los valores de reflectancia mas altos se producen a los 0 y 360° , mientras que los valores más bajos se encuentran a los 180° (figura 7 apéndice). Esta respuesta se produce debido a que los rayos solares al incidir sobre la superficie con un ángulo más cercano a la perpendicular los valores son mayores, en cambio al incidir en forma más tangencial los valores son bajos.

El valor de radiancia de la banda 3 disminuye a medida que el ángulo de exposición respecto al sol aumenta. El valor mínimo se logra en los 185° , para luego comenzar a aumentar nuevamente.

Los valores espectrales de las tres bandas aumentan en la medida que el ángulo solar aumenta (figuras 10, 11 y 12 apéndice). Esta respuesta se produce debido a que los rayos solares inciden en forma más directa sobre la superficie aumentando con esto la cantidad de energía que es reflejada. La mayor relación del ángulo solar se produce con la banda 3 y la más baja relación es con la banda 2.

El ángulo de visión no presenta relaciones tan fuertes sobre los valores espectrales de las bandas, lo cual indica que la influencia de la posición del sensor sobre los valores espectrales es menor (figuras 13, 14 y 15 apéndice).

Los valores de reflectancia espectral de las tres bandas disminuyen a medida que el ángulo de aproximación aumenta. Mientras más cercano a cero sea el ángulo de aproximación, la reflexión de los rayos solares hacia el sensor del satélite es mayor. Este efecto incide en mayor forma sobre los valores de la banda 3 y de menor forma en la banda 2.

3.2 Análisis de los datos por rodales.

Los valores espectrales de las bandas, principalmente la banda 2 y en menor medida la banda 3, disminuyen cuando el diámetro cuadrático medio (DCM) de los rodales aumenta (figura 21, apéndice). Esto se produce debido a las

diferencias fenológicas de los árboles, principalmente las características estructurales de las copas de los árboles.

Por otra parte, debido al estado de madurez de los árboles con mayor diámetro, la cantidad de energía que absorben es mayor, por lo tanto disminuye la energía reflejada.

Aquellos rodales que por sus condiciones de ubicación se encuentran en sectores de gran relieve (siendo estos los de interés para la corrección de los datos), son los que presentan un mayor R^2 (tabla 22 apéndice).

Los rodales ubicados en sectores de mayor relieve tienen un rango más amplio de valores de ángulo de aproximación y de valores de la banda 3.

Los valores de los coeficientes de correlación son bajos en aquellos rodales ubicados en sectores en los cuales las variaciones de relieve son menores. En estos rodales el rango de variación del ángulo de aproximación es menor al igual que el rango de variación de los valores de radiancia espectral.

El ángulo de aproximación tiene un efecto sobre los valores espectrales cuando este es superior a 80° aproximadamente (pendiente 0, sin exposición, específico para estas condiciones de toma de la imagen).

No se encontró un modelo que represente las variaciones que se producen en los valores espectrales de las bandas a causa de variaciones del ángulo de aproximación. No obstante, al eliminar la influencia causada por las

diferencias entre rodales, trabajando en forma particular en cada uno de los rodales, es posible observar que la distribución de los valores espectrales de los rodales se ajustan en su mayoría a dos modelos:

$$y = a + bx^2$$

$$Y = a + bx^3 \quad (\text{figura 22 apéndice})$$

Finalmente, el análisis de regresión múltiple de los datos dasométricos y los valores de reflectancia espectral de las bandas 1, 2 y el valor ajustado de la banda 3, que existe una mejor correlación de los valores espectrales con el diámetro cuadrático medio (tabla 3) que con el valor dasométrico correspondiente a la densidad de árboles (tabla 4).

Tabla 3. Resultado del análisis de regresión múltiple para el DCM

Numero de muestras	2097
Numero de variables	3
Variable dependiente	DCM
Variable independiente	Banda 1
Variable independiente	Banda 2
Variable independiente	Banda 3 ajustada
Ecuación de Regresión	
<p>DCM = 124.7591 -1.73093 * Banda 1 -1.8947 * Banda 2 -0.147003 * Banda 3 Ajustada</p>	
Estadística de regresión	
R ²	0.41796182
R ² Ajustado	0.41712755
Error estándar de estimación	5.85491433
Estadística Durbin-Watson	0.34559852
Error medio absoluto	4.92383086

Suma Cuadrado de los errores	71748.08575383		
Error medio cuadrático	34.28002186		
Estimado	Error Estándar	Valor T	Valor P
124.7591	3.1729	39.3207	0.0000
-1.7309	0.1782	-9.7136	7.57265E-022
-1.8947	0.1959	-9.6718	1.12088E-021
-0.1470	0.0239	-6.1484	9.34875E-010

Tabla 4. Resultado del análisis de regresión múltiple para el N° Arboles/ha

Numero de muestras	2097		
Numero de variables	3		
Variable dependiente	N°Arboles/ha (N°Arb)		
Variable independiente	Banda 1		
Variable independiente	Banda 2		
Variable independiente	Banda 3 ajustada		
Ecuación de Regresión			
$\text{N}^{\circ}\text{Arb} = -743.3167$ $+20.9695 \quad * \text{ Banda 1}$ $+44.1554 \quad * \text{ Banda 2}$ $-1.49234 \quad * \text{ Banda 3 Ajustada}$			
Estadística de regresión			
R ²	0.27394554		
R ² Ajustado	0.27290485		
Error estándar de estimación	111.04938809		
Estadística Durbin-Watson	0.23701210		
Error medio absoluto	86.48417375		
Suma Cuadrado de los errores	25810806.08464549		
Error medio cuadrático	12331.96659565		
Estimado	Error Estándar	Valor T	Valor P
-743.3167	60.1792	-12.3517	0.0000
20.9695	3.3798	6.2043	6.6032707E-010
44.1554	3.7156	11.8838	0.0000
-1.4923	0.4535	-3.2908	0.0010

IV CONCLUSIONES

La topografía del terreno influye sobre los valores espectrales de las tres bandas del satélite SPOT 2. Ese efecto es más fuerte sobre los valores de la banda 3, la cual corresponde al rango del infrarrojo cercano.

Es posible utilizar el ángulo de aproximación para modelar la distribución de los valores espectrales de las diferentes bandas respecto a la topografía del terreno y a la geometría de observación, el cual puede ser muy útil para la corrección del efecto que provoca la topografía y la geometría de observación en sectores de gran relieve.

El ángulo de aproximación, que considera tanto las variables topográficas como las de geometría de observación e iluminación, está directamente relacionado con la cantidad de energía que llega al sensor. Puede ser usado en cualquier situación independiente de la imagen satelital que se trate.

Las características de iluminación y la exposición de la superficie son las variables geométricas y topográficas que más influyen sobre los valores espectrales de las bandas.

V RESUMEN

En esta investigación se analizaron las relaciones existentes entre los valores espectrales de las bandas del satélite SPOT y las variables topográficas, de exposición y pendiente, generando relaciones matemáticas entre los ángulos que se forman de acuerdo a la geometría de observación y la distribución de los valores espectrales de las bandas de la imagen.

Los valores espectrales de todas las bandas son afectados por el ángulo de aproximación, mostrando una mayor influencia en el rango del infrarrojo cercano, que en la imagen usada corresponde a la banda 3. La exposición tiene un efecto mayor que la pendiente sobre los valores digitales de las bandas. En general, los valores espectrales de las bandas aumentan con la disminución del ángulo de aproximación.

La corrección de los valores espectrales de las diferentes bandas es un elemento de suma importancia si se desea realizar análisis de datos satelitales de superficies de terrenos que se encuentran en zonas cuyo relieve es fuerte.

VI SUMMARY

It had been analyzed in this investigation the relationship between spectral values of the SPOT'S satellite bands and its topographical, exposure and slope variables, generating mathematical relationship between the angles that are formed considering geometrical observation and the spectral values' distribution of the image's band.

The whole band's spectral values are affected by the approximation angle, showing a major influence in the near infrared range, as shown in band 3 of the image. Exposure has a large effect than the slope over the band's spectral value increase with the decreasing of the approximation angle.

The correction of the different bands of the spectral values in a very important element to analyze satellite information of overland founded in places where relief is hard.

VII BIBLIOGRAFIA

1. BUITEN, H.J., CLEVERS, J.P. 1993. Land observation by remote sensing theory and applications I: 9-106.
2. BURGESS, D.W., LEWIS, P., MULLER, J.P. 1994. On topographic effects in AVHRR NDVI data Remote sensing of environment 2 :1-15.
3. CHUVIECO, E. 1990. Fundamentos de teledetección espacial, 6: 242-249.
4. CIHLAR, J., MANAK, D., AND VOISIN, N. 1994. AVHRR bidirectional reflectance affect and compositing, Remote sensing environment, 48: 77-88.
5. FLEMING, M.D., HOFFER, R.M. 1979. Machine processing of Landsat MSS data and DMA topographic data for forest cover type mapping, IEEE Machine processing of remote sensed data symposium, pp. 377-390.
6. HOLBEN, B.N., JUSTICE, C.O. 1980. The topographic effect on spectral response from Nadir-Pointing Sensors, Photogrammetric Engineering and remote sensing, 46(2):115-133.
7. GUTMAN, G.G. 1991. Vegetation indices from AVHRR ; an update and future prospect. Remote sensing of environment, 35: 121-136.
8. LEPRIEUR, C.E., DURAND, J.M. 1988. Influence of topography on forest reflectance using Landsat Thematic Mapper and digital terrain data. Photogrammetric engineering and remote sensing, 54, (4):491-496
9. LILLESAND, T.M., KIEFER, R.W. 1994. Remote sensing and image interpretation. Concepts and foundations of remote sensing, 1:1-48
10. SCHOTT, J.R. 1997. Remote Sensing The image Chain Approach, 3:43-87.

11. SMITH, J.A., LIN, T.L., RANSON, K.J. 1980. The Lambertian assumption and Landsat Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 46(9):1183-1189.
12. STAR, J.L., ESTES, J. E. 1995. *Erdas Field Guide*, 7:279-318.
13. TEILLET, P.M., STAENZ, K., 1992. Atmospheric effects due to topography on MODIS vegetation index data simulated from AVIRIS imagery over mountainous terrain. *Canadian journal of remote sensing*, 18(4):283-291.



VIII APENDICE



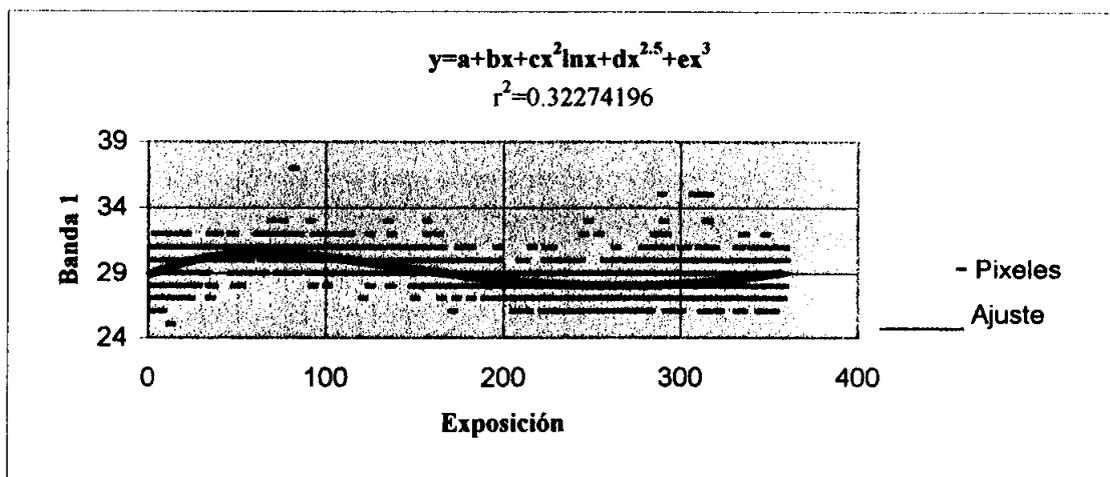


Figura 1 Efecto de la exposición sobre los valores de la banda 1 del satélite SPOT

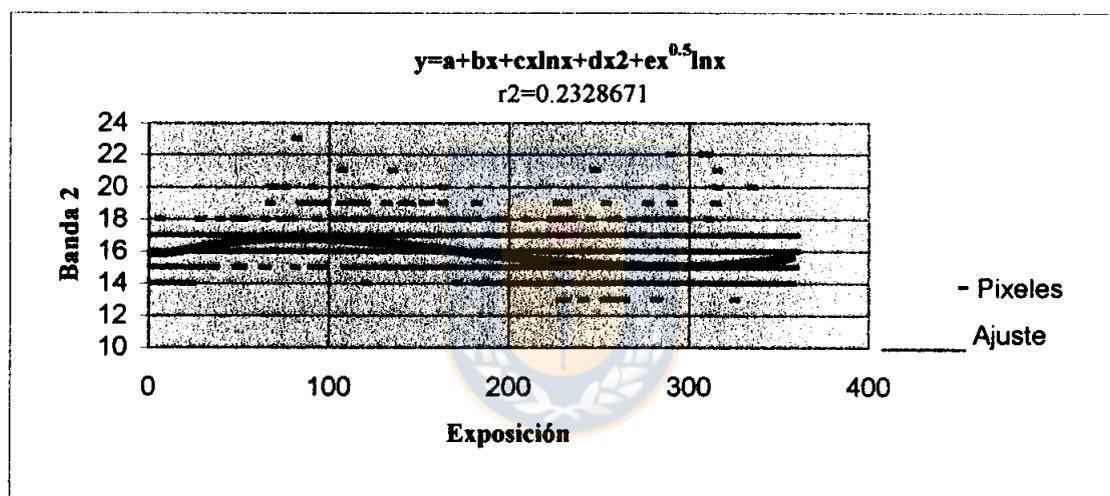


Figura 2 Efecto de la exposición sobre los valores de la banda 2 del satélite SPOT

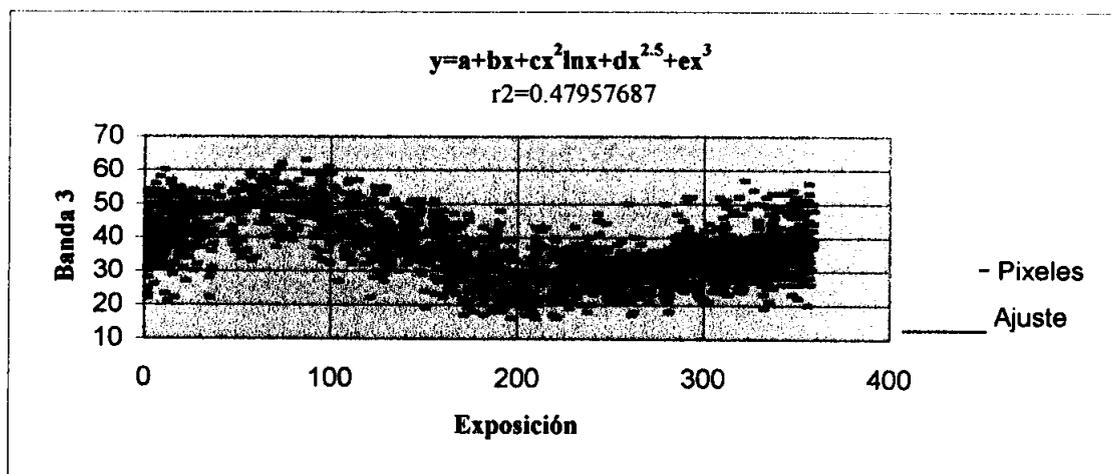


Figura 3 Efecto de la exposición sobre los valores de la banda 3 del satélite SPOT

Tabla 1 Resultado del ajuste entre el valor digital de la banda 1 del satélite SPOT y la Exposición

		$y=a+bx+cx^2\ln x+dx^{2.5}+ex^3$					
		Parametros	Valor	Std Error	Valor T	95% Lim Conf	95% Lim Conf
n	2627						
r^2	0,323	A	28,763	0,115	250,631	28,539	28,987
DF	0,321	B	0,060	0,006	10,768	0,049	0,071
Error. est	1,105	C	-4,100E-04	5,251E-05	-7,808	-5,125E-04	-3,075E-04
Valor F	301,175	D	1,705E-04	2,479E-05	6,877	1,221E-04	2,189E-04
		E	-2,740E-06	4,902E-07	-5,590	-3,698E-06	-1,783E-06

Tabla 2 Resultado del ajuste entre el valor digital de la banda 2 del satélite SPOT y la Exposición

		$y=a+bx+cx\ln x+dx^2+ex^{0.5}\ln x$					
		Parametros	Valor	Std Error	Valor T	95% Lim Conf	95% Lim Conf
n	2627						
r^2	0,233	A	13,711	0,220	62,449	13,283	14,140
DF	0,231	B	2,059	0,312	6,590	1,449	2,669
Error. est	1,016	C	-0,284	0,041	-6,971	-0,364	-0,205
Valor F	191,847	D	3,588E-04	3,793E-05	9,460	2,847E-04	4,328E-04
		E	-1,638	0,274	-5,969	-2,174	-1,102

Tabla 3 Resultado del ajuste entre el valor digital de la banda 3 del satélite SPOT y la Exposición

		$y=a+bx+cx^2\ln x+dx^{2.5}+ex^3$					
		Parametros	Valor	Std Error	Valor T	95% Lim Conf	95% Lim Conf
n	2627						
r^2	0,480	A	36,529	0,630	58,004	35,299	37,759
DF	0,479	B	0,552	0,031	18,017	0,492	0,612
Error. est	6,062	C	-0,005	2,881E-04	-17,487	-0,006	-0,004
Valor F	582,396	D	0,002	1,361E-04	16,590	0,002	0,003
		E	-4,080E-05	2,690E-06	-15,166	-4,605E-05	-3,554E-05

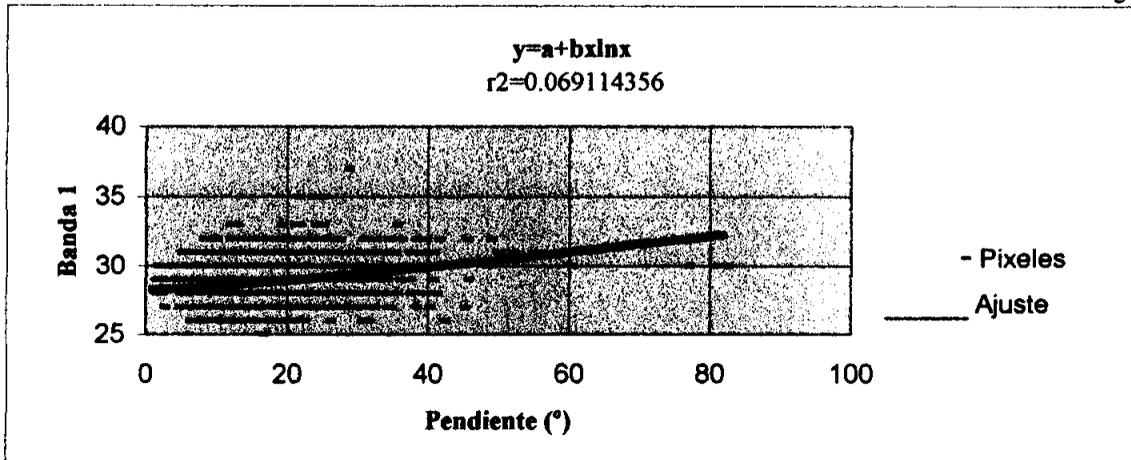


Figura 4 Efecto de la pendiente sobre los valores de la banda 1 del satélite SPOT

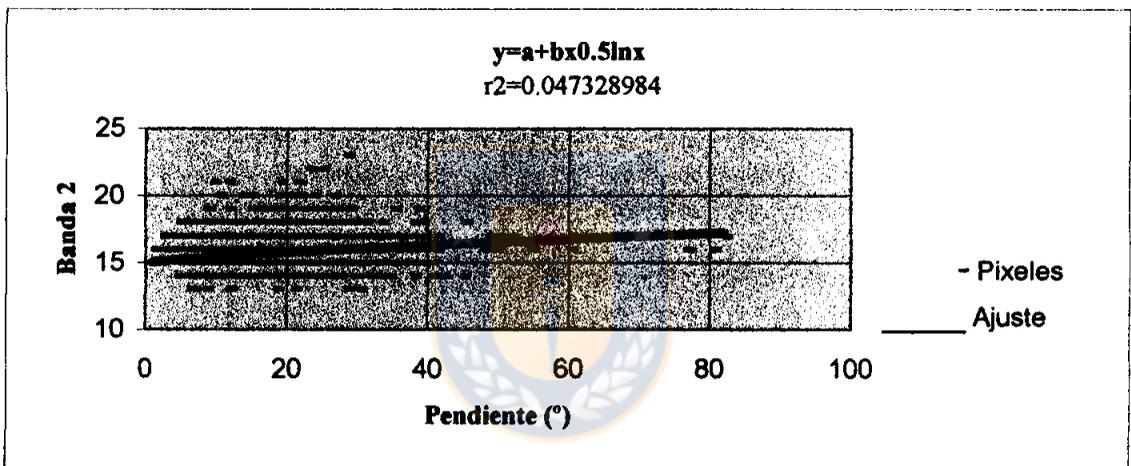


Figura 5 Efecto de la pendiente sobre los valores de la banda 2 del satélite SPOT

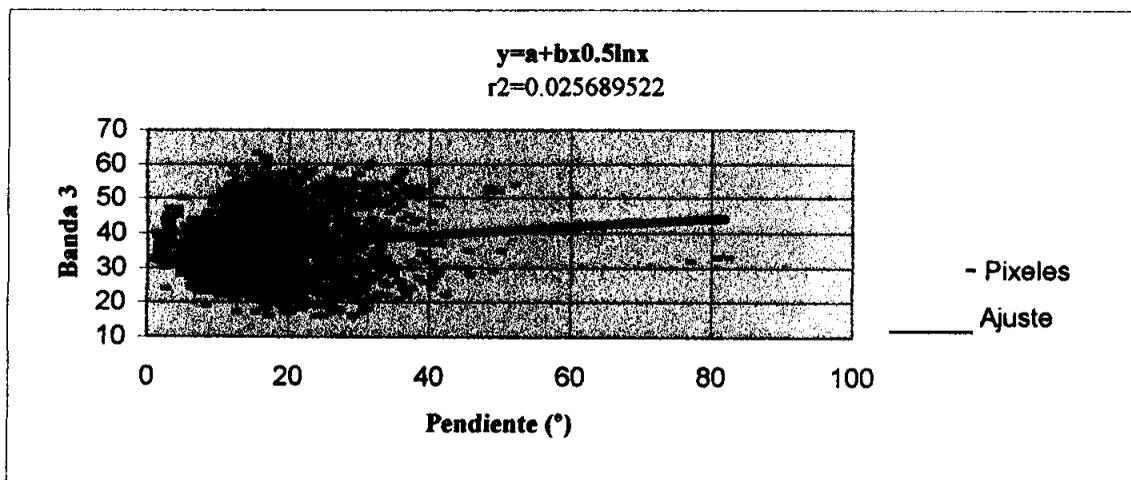


Figura 6 Efecto de la pendiente sobre los valores de la banda 3 del satélite SPOT

Tabla 4 Resultado del ajuste entre el valor digital de la banda 1 del satélite SPOT y la pendiente.

n	2627	y = a + bx					
r ²	0.069	Parametros	Valor	Std Error	Valor T	5% Lim Con	95% Lim Conf
DF	0.068	A	28.246	0.043	653.798	28.161409	28.33010654
Error. est	1.287	B	0.011	0.001	13.960	0.0095785	0.012693304
Valor F	194.895						

Tabla 5 Resultado del ajuste entre el valor digital de la banda 2 del satélite SPOT y la pendiente.

n	2627	y = a + bx					
r ²	0.047	Parametros	Valor	Std Error	Valor T	5% Lim Con	95% Lim Conf
DF	0.047	A	15.029	0.054	275.866	14.922771	15.13550439
Error. est	1.123	B	0.055	0.005	11.420	0.0453184	0.064009977
Valor F	130.411						

Tabla 6 Resultado del ajuste entre el valor digital de la banda 3 del satélite SPOT y la pendiente.

n	2627	y = a + bx					
r ²	0.026	Parametros	Valor	Std Error	Valor T	5% Lim Con	95% Lim Conf
DF	0.025	A	32.462	0.402	80.838	31.678176	33.24623867
Error. est	8.275	B	0.294	0.035	8.319	0.224652	0.36242779
Valor F	69.213						

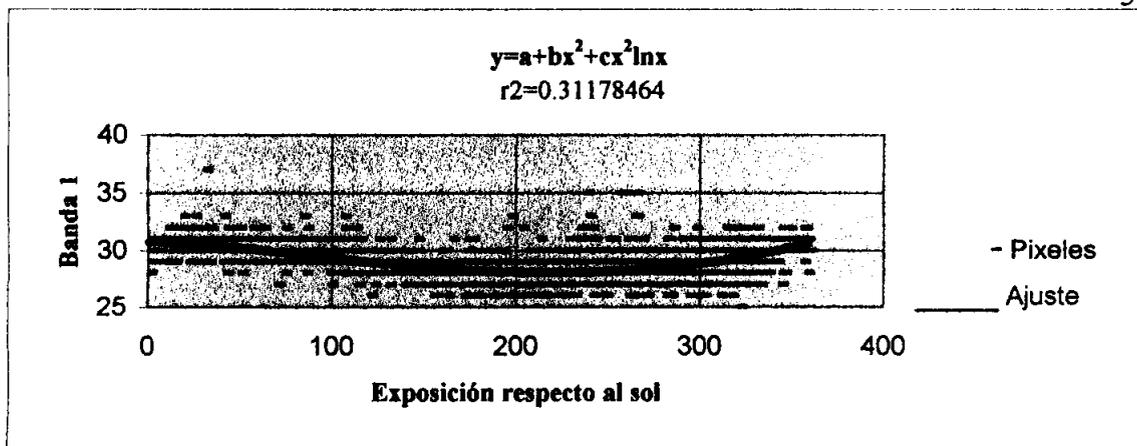


Figura 7 Efecto de la exposición respecto al sol sobre los valores de la banda 1 del satélite SPOT

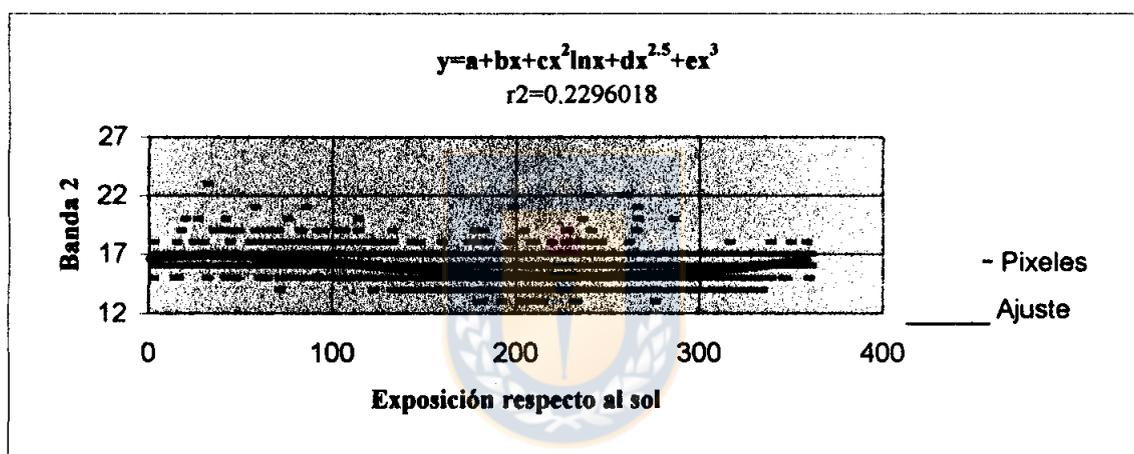


Figura 8 Efecto de la exposición respecto al sol sobre los valores de la banda 2 del satélite SPOT

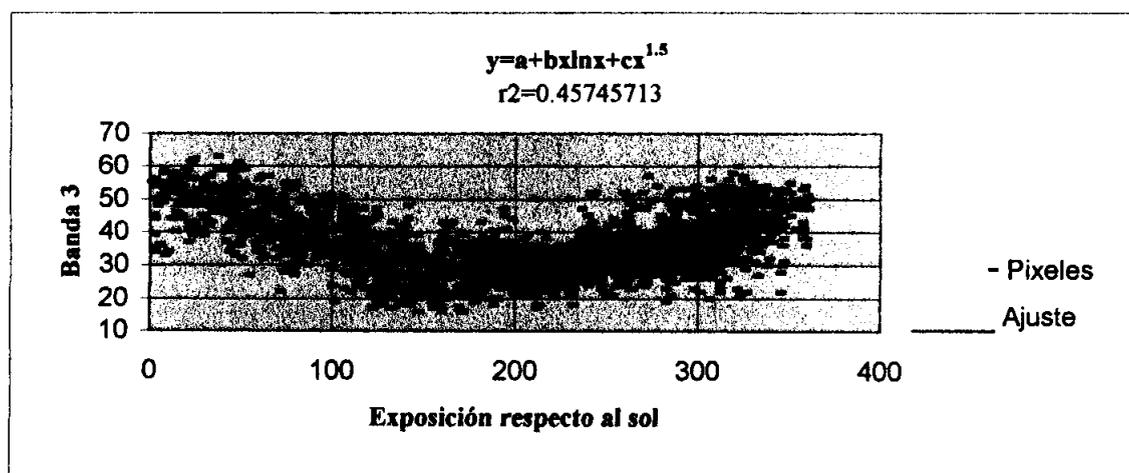


Figura 9 Efecto de la exposición respecto al sol sobre los valores de la banda 3 del satélite SPOT

Tabla 7 Resultado del ajuste entre el valor digital de la banda 1 del satélite SPOT y la exposición respecto al Sol

		$y=a+bx^2+cx^2\ln x$					
		Parametros	Valor	Std Error	Valor T	5% Lim Cor	95% Lim Conf
n	2627						
r^2	0.312						
DF	0.311	A	30.743	0.067	459.609	30.613	30.874
Error. est	1.107	B	-0.000672	0.000	-34.218	-0.001	-0.000633379
Valor F	594.380	C	0.000114	3.346E-06	34.063	0.0001074	0.000120509

Tabla 8 Resultado del ajuste entre el valor digital de la banda 2 del satélite SPOT y la exposición respecto al Sol

		$y=a+bx+cx^2\ln x+dx^{2.5}+ex^3$					
		Parametros	Valor	Std Error	Valor T	5% Lim Cor	95% Lim Conf
n	2627						
r^2	0.230						
DF	0.228	A	16.594	0.163	101.588	16.275	16.913
Error. est	1.010	B	0.017	0.006	2.842	0.005	0.029
Valor F	195.359	C	-0.0002	5.17E-05	-4.007	-0.0003	-0.00011
		D	9.05E-05	2.44E-05	3.706	4.28E-05	0.00014
		E	-1.51E-06	4.86E-07	-3.116	-2.46E-06	-5.66E-07

Tabla 9 Resultado del ajuste entre el valor digital de la banda 3 del satélite SPOT y la exposición respecto al Sol

		$y=a+bx\ln x+cx^{1.5}$					
		Parametros	Valor	Std Error	Valor T	5% Lim Cor	95% Lim Conf
n	2627						
r^2	0.457						
DF	0.457	A	55.163	0.503	109.756	54.182	56.144
Error. est	6.177	B	-0.1274	0.003	-46.931	-0.133	-0.1221
Valor F	1106.24	C	0.0387	0.00082	47.032	0.0371	0.0403

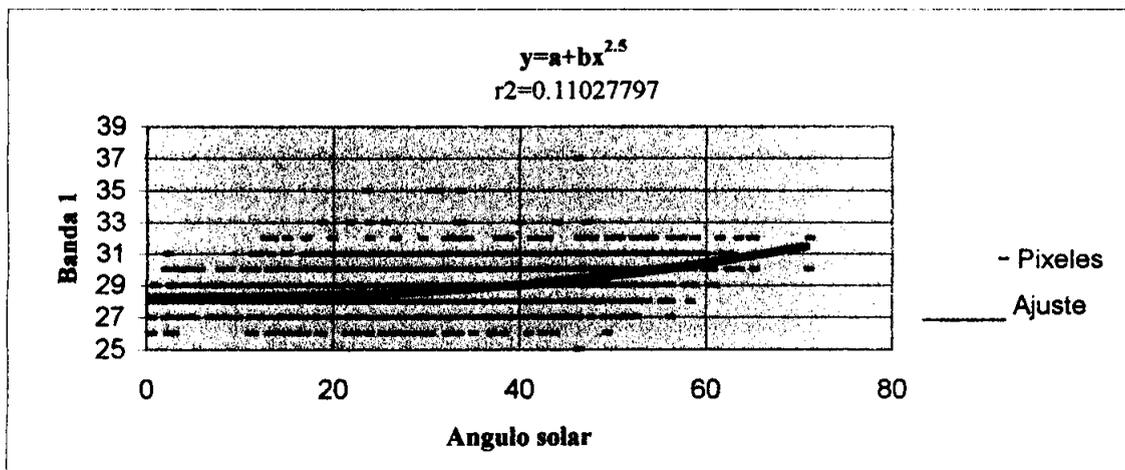


Figura 10 Efecto del ángulo solar sobre los valores de la banda 1 del satélite SPOT

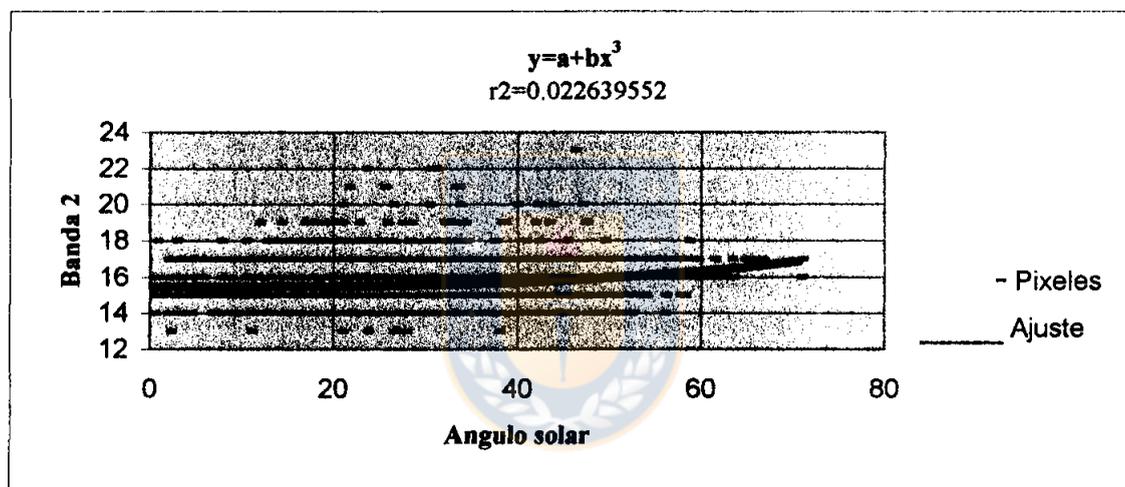


Figura 11 Efecto del ángulo solar sobre los valores de la banda 2 del satélite SPOT

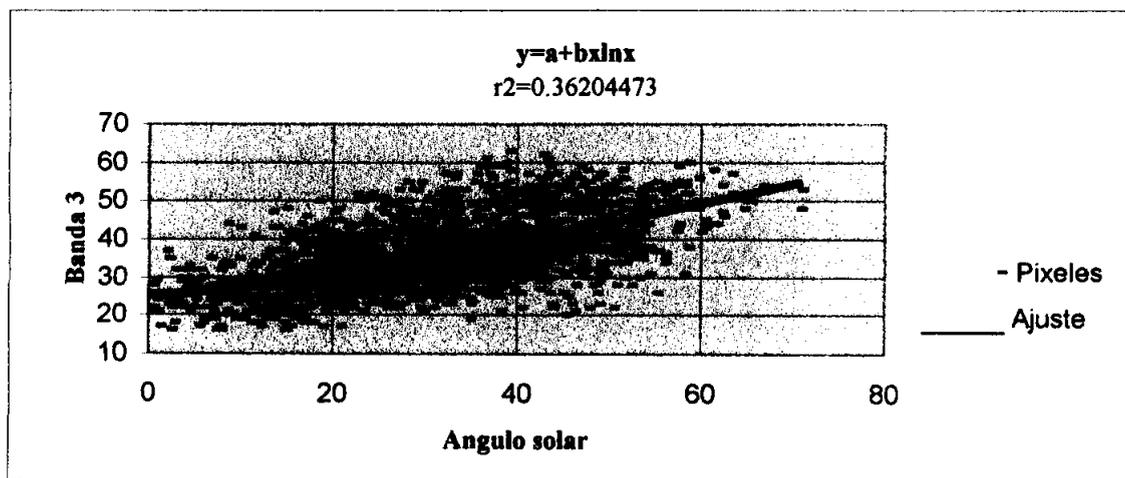


Figura 12 Efecto del ángulo solar sobre los valores de la banda 3 del satélite SPOT

Tabla 10 Resultado del ajuste entre el valor digital de la banda 1 del satélite SPOT y el Angulo solar.

		$y=a+bx^2$				
n	2627					
r^2	0.11028	Parametros	Valor	Std Error	Valor T	95% Lim Conf
DF	0.1096	A	28.233	0.03718	759.4531	28.16039127
Error. est	1.25808	B	7.7E-05	4.3E-06	18.03773	6.85097E-05
Valor F	325.36					

Tabla 11 Resultado del ajuste entre el valor digital de la banda 2 del satélite SPOT y el Angulo solar.

		$y=a+bx$				
n	2627					
r^2	0.02264	Parametros	Valor	Std Error	Valor T	95% Lim Conf
DF	0.02189	A	15.4344	0.03061	504.2913	15.37462748
Error. est	1.13716	B	4E-06	5.1E-07	7.797784	2.99435E-06
Valor F	60.8054					

Tabla 12 Resultado del ajuste entre el valor digital de la banda 3 del satélite SPOT y el Angulo solar.

		$y=a+bx \ln x$				
n	2627					
r^2	0.36204	Parametros	Valor	Std Error	Valor T	95% Lim Conf
DF	0.36156	A	25.0781	0.30046	83.466	24.49151629
Error. est	6.69638	B	0.09804	0.00254	38.59674	0.093081424
Valor F	1489.71					

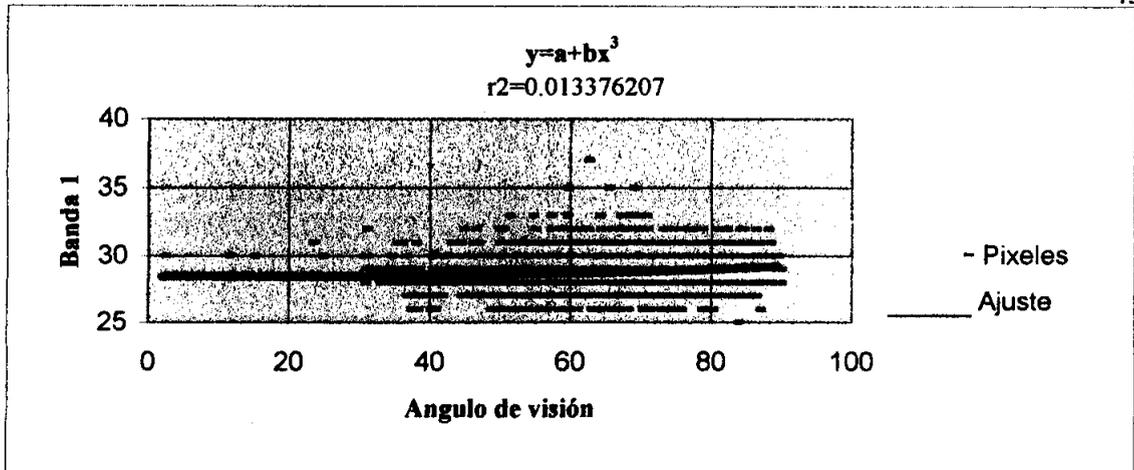


Figura 13 Efecto del ángulo de visión sobre los valores de la banda 1 del satélite SPOT

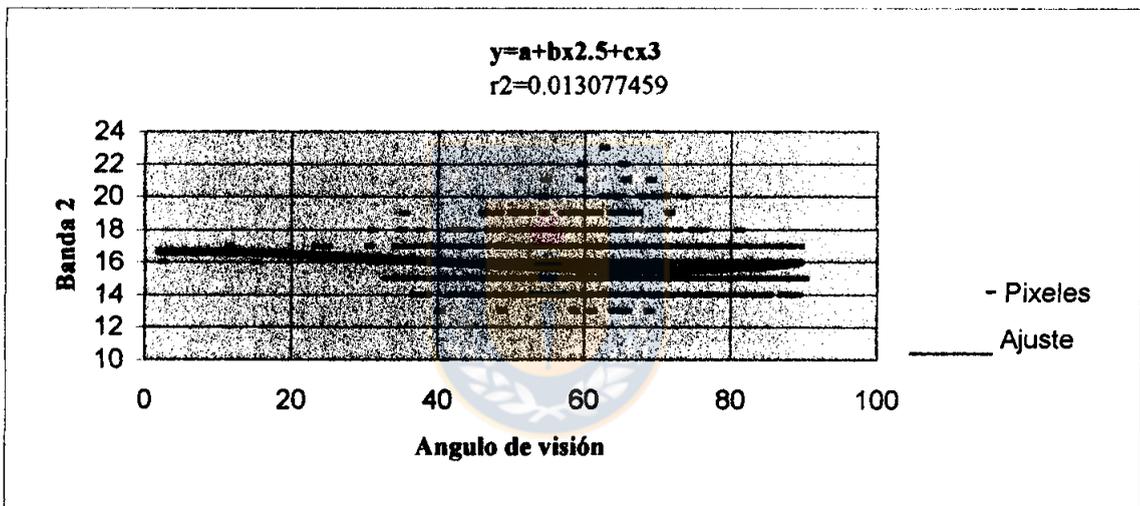


Figura 14 Efecto del ángulo de visión sobre los valores de la banda 2 del satélite SPOT

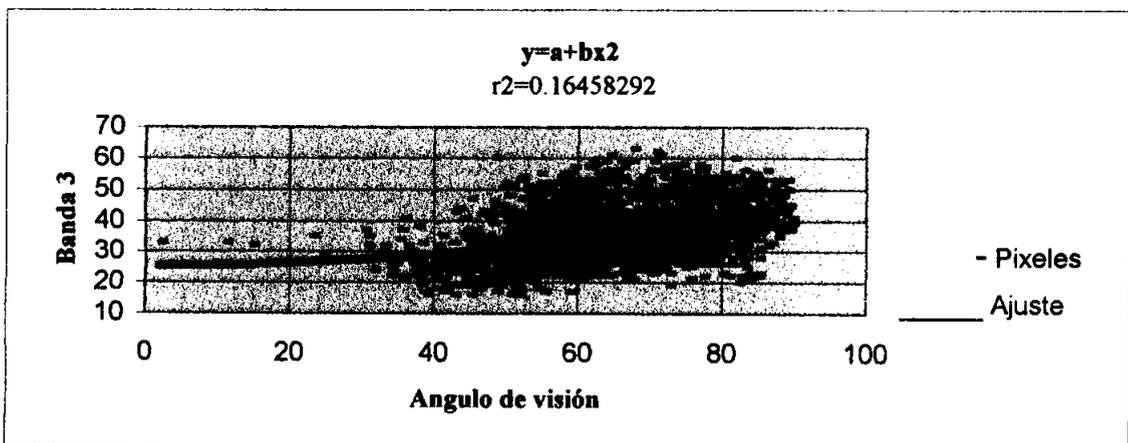


Figura 15 Efecto del ángulo de visión sobre los valores de la banda 3 del satélite SPOT

Tabla 13 Resultado del ajuste entre el valor digital de la banda 1 del satélite SPOT y el Angulo de visión.

		$y=a+bx^2$					
		Parametros	Valor	Std Error	Valor T	95% Lim Conf	95% Lim Conf
n	2627						
r^2	0.013						
DF	0.013	A	28.41	0.060	472.30	28.29506947	28.52997302
Error. est	1.325	B	1.08E-06	1.8E-07	5.97	7.23693E-07	1.42784E-06
Valor F	35.589						

Tabla 14 Resultado del ajuste entre el valor digital de la banda 2 del satélite SPOT y el Angulo de visión.

		$y=a+bx^{2.8}+cx^3$					
		Parametros	Valor	Std Error	Valor T	95% Lim Conf	95% Lim Conf
n	2627						
r^2	0.013						
DF	0.012	A	16.63	0.177	94.02	16.28688563	16.97762278
Error. est	1.143	B	-0.00017	3.0E-05	-5.60	-0.000229477	-0.000110786
Valor F	17.385	C	1.7E-05	3.09E-06	5.49683	1.09689E-05	2.30531E-05

Tabla 15 Resultado del ajuste entre el valor digital de la banda 3 del satélite SPOT y el Angulo de visión.

		$y=a+bx^2$					
		Parametros	Valor	Std Error	Valor T	95% Lim Conf	95% Lim Conf
n	2627						
r^2	0.165						
DF	0.164	A	25.19	0.478	52.66	24.25433047	26.12216373
Error. est	7.663	B	0.00236	1.0E-04	22.74	0.002159197	0.002564773
Valor F	517.143						

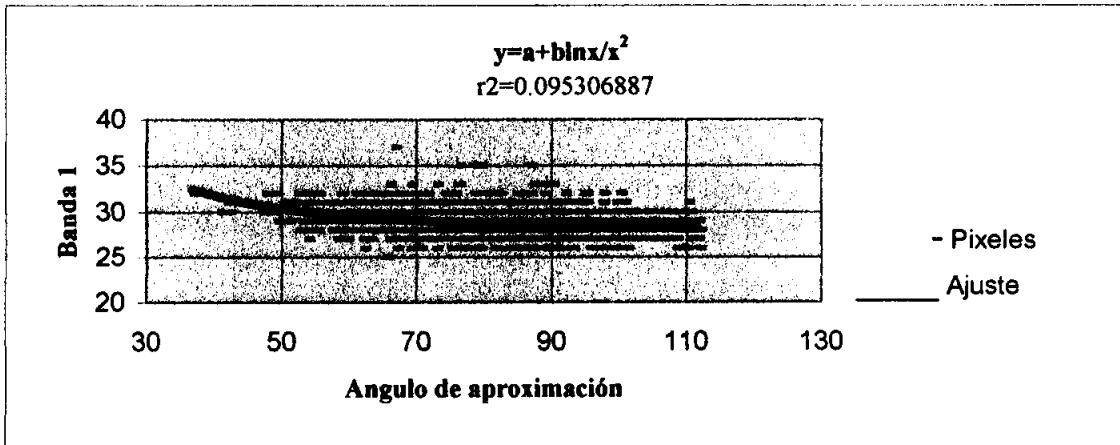


Figura 16 Efecto del ángulo de aproximación sobre los valores de la banda 1 del satélite SPOT

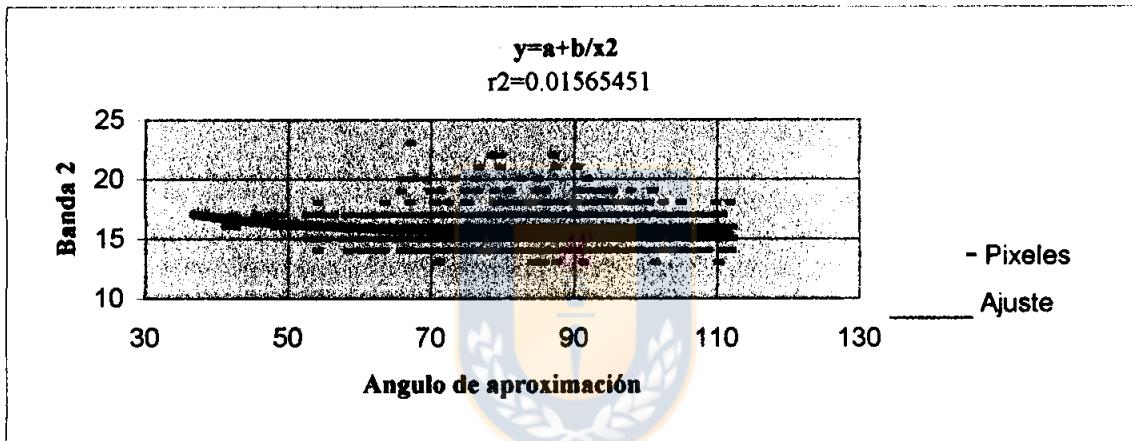


Figura 17 Efecto del ángulo de aproximación sobre los valores de la banda 2 del satélite SPOT

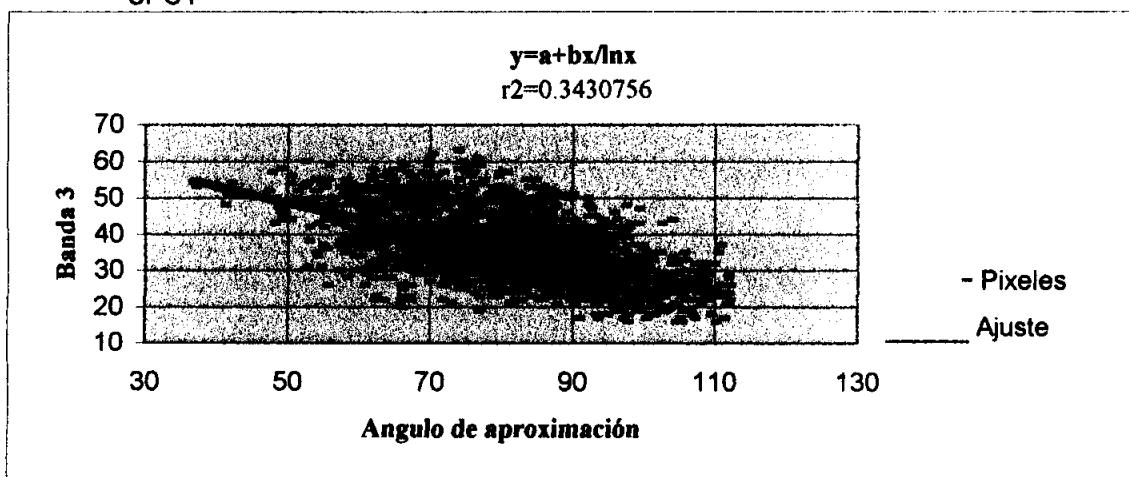


Figura 18 Efecto del ángulo de aproximación sobre los valores de la banda 3 del satélite SPOT

Tabla 16 Resultado del ajuste entre el valor digital de la banda 1 del satélite SPOT y el Angulo de aproximación.

		$y=a+blnx/x^2$					
		Parametros	Valor	Std Error	Valor T	95% Lim Conf	95% Lim Conf
n	2627						
r^2	0.095						
DF	0.095	A	27.40	0.084	324.71	27.23061865	27.56005744
Error. est	1.269	B	1.88E+03	1.1E+02	16.63	1661.364998	2103.370857
Valor F	276.536						

Tabla 17 Resultado del ajuste entre el valor digital de la banda 2 del satélite SPOT y el Angulo de aproximación.

		$y=a+b/x^2$					
		Parametros	Valor	Std Error	Valor T	95% Lim Conf	95% Lim Conf
n	2627						
r^2	0.016						
DF	0.015	A	15.19	0.066	228.65	15.06450535	15.3239865
Error. est	1.141	B	2.46E+03	3.8E+02	6.46	1714.893281	3200.075849
Valor F	41.747						

Tabla 18 Resultado del ajuste entre el valor digital de la banda 3 del satélite SPOT y el Angulo de aproximación.

		$y=a+bx/lrx$					
		Parametros	Valor	Std Error	Valor T	95% Lim Conf	95% Lim Conf
n	2627						
r^2	0.343						
DF	0.343	A	78.18	1.160	67.41	75.91534655	80.44390364
Error. est	6.795	B	-2.32	6.3E-02	-37.03	-2.442411441	-2.197731076
Valor F	1370.89						

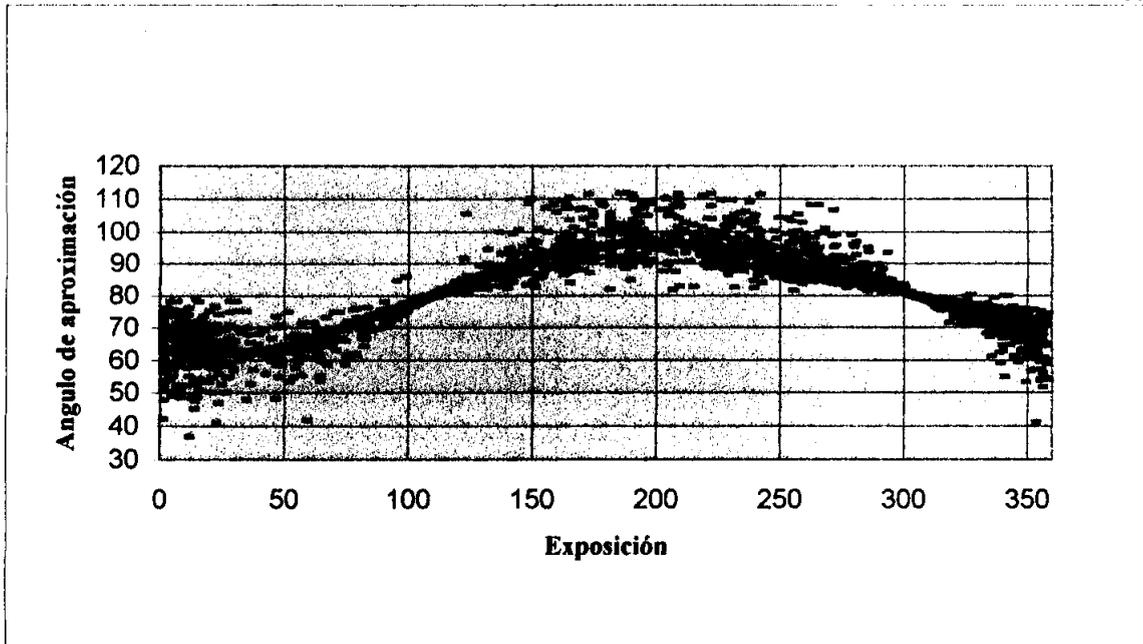


Figura 19 Valor del ángulo de aproximación respecto a la exposición

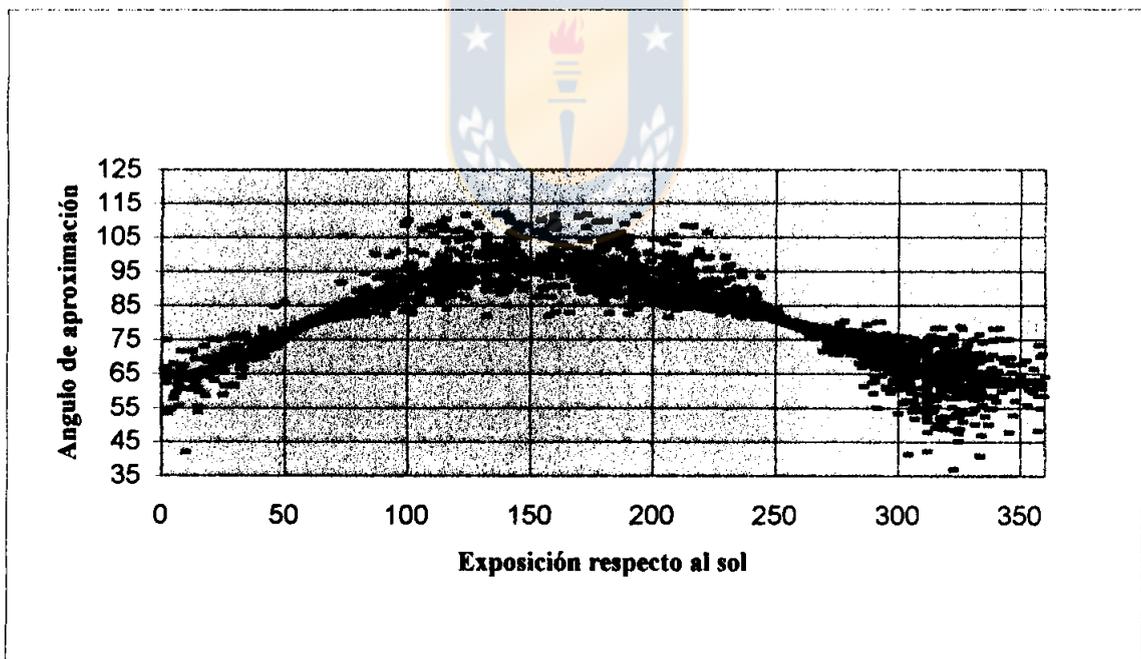


Figura 20 Valor del ángulo de aproximación respecto a la exposición respecto al sol

Tabla 19 Resultado del ajuste entre el Angulo de aproximación y Exposición.

		$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4$					
		Parametros	Valor	Std Error	Valor T	95% Lim Conf	95% Lim Conf
n	2627						
r^2	0.821						
DF	0.821	A	68.66	0.516	133.05	67.65	69.665
Error. est	4.967	B	-0.43	2.5E-02	-17.19	-0.48	-0.383
Valor F	2904.882	C	0.0065	0.0002	2.8E+01	0.006	0.0070
		D	-0.0031	0.0001	-27.61	-0.003	-0.0029
		E	5.9E-05	2.20E-06	26.56	5.4E-05	6.3E-05

Tabla 20 Resultado del ajuste entre el Angulo de aproximación y Exposición respecto al Sol.

		$y=a+bx+cx\ln x+dx^{2.5}+ex^3$					
		Parametros	Valor	Std Error	Valor T	95% Lim Conf	95% Lim Conf
n	2627						
r^2	0.822						
DF	0.822	A	67.22	1.111	60.50	65.05	69.388
Error. est	5.062	B	-1.05	1.3E-01	-8.17	-1.31	-0.802
Valor F	3025.160	C	0.3508	0.0283	1.2E+01	0.296	0.4061
		D	-0.0005	0.0000	-25.19	-0.001	-0.0005
		E	1.9E-05	7.56E-07	24.98	1.7E-05	2.0E-05

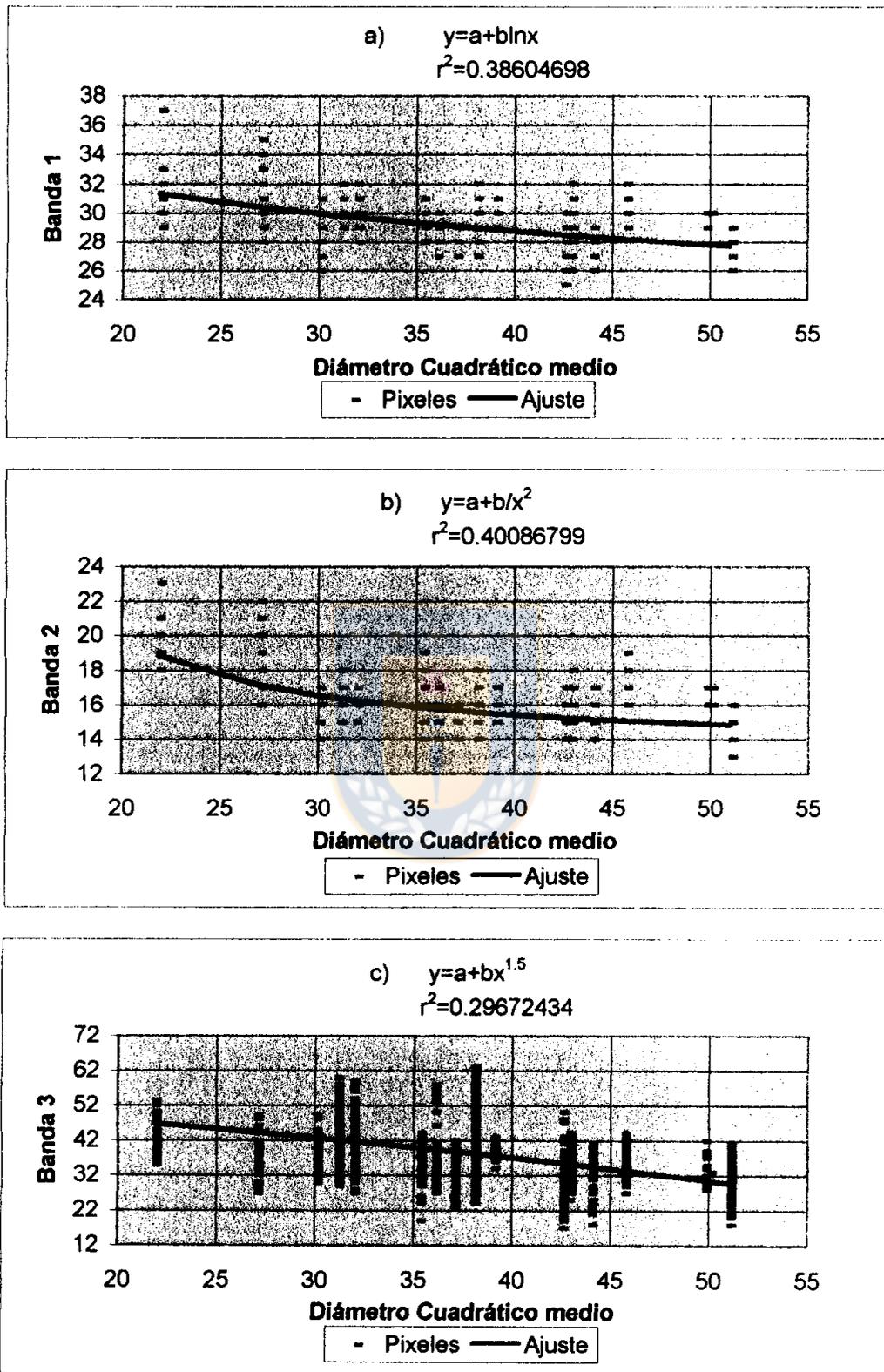


Figura 21 Valor espectral respecto al diámetro cuadrático medio
a) banda 1, b) banda 2 c) banda 3

Tabla 21 Parámetros estadísticos de los ajustes entre el diámetro cuadrático medio y las diferentes bandas 1, 2 y 3; a) banda1, b)banda2, c)banda3

a)

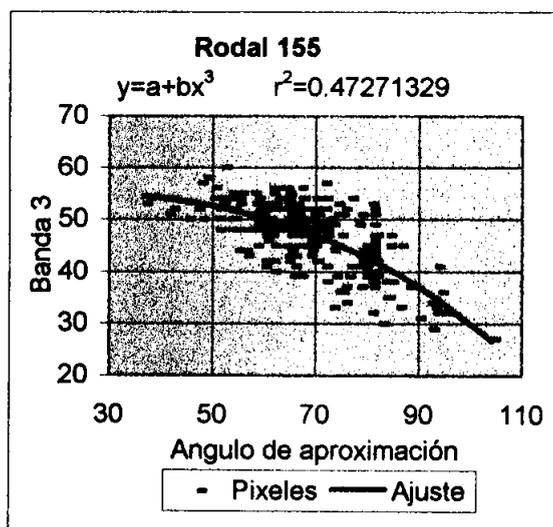
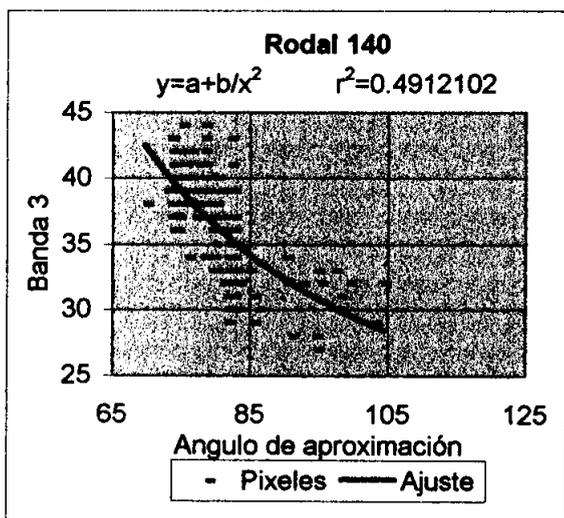
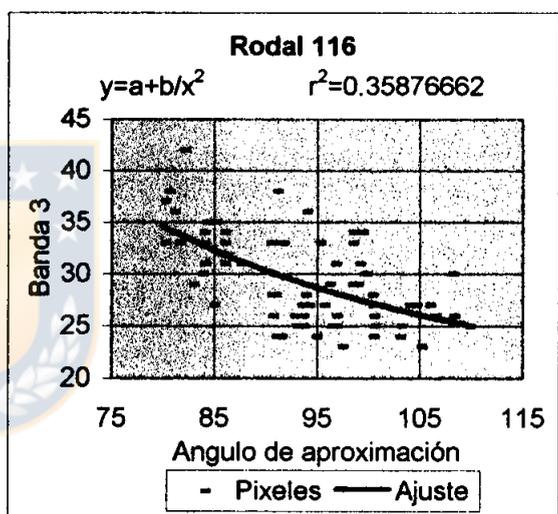
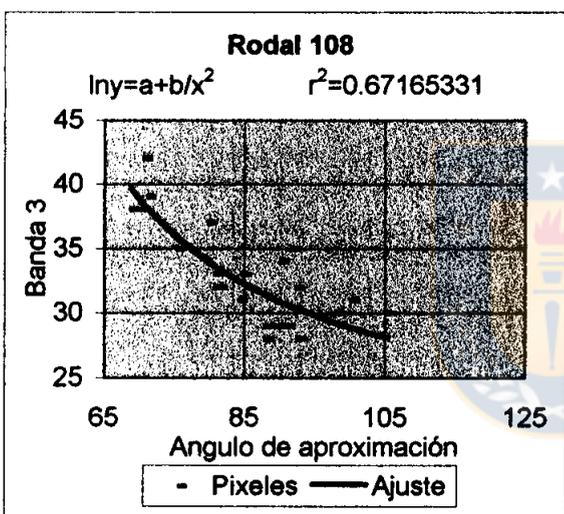
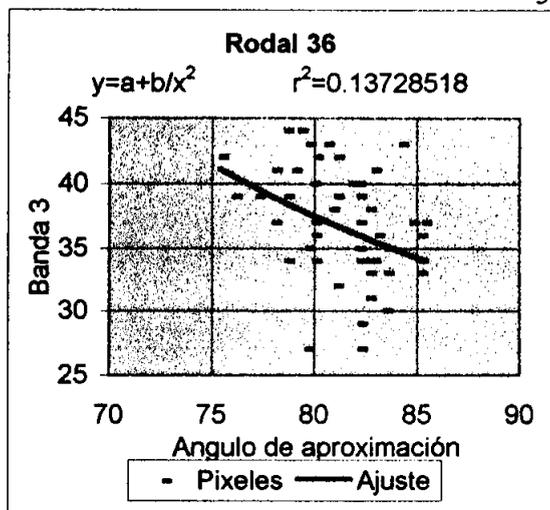
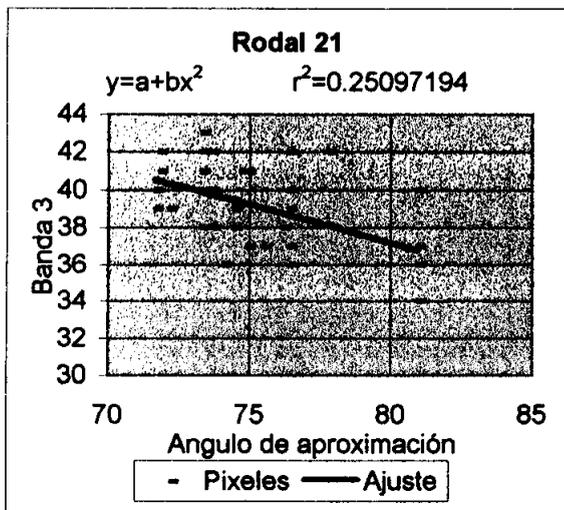
		$y=a+bx$					
		Parámetro	Valores	Error Std	Valor T	95% Lim Conf	95% Lim Conf
n	2627						
r2	0.386	A	44.506	0.4320743	103.0045	43.66104982	45.35015265
DF	0.385	B	-4.2716	0.117692	-36.29481	-4.501653766	-4.041561898
Error std.	1.058						
valor F	1317						

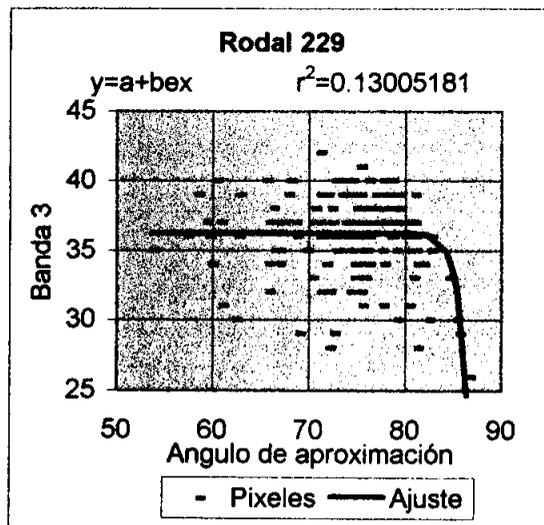
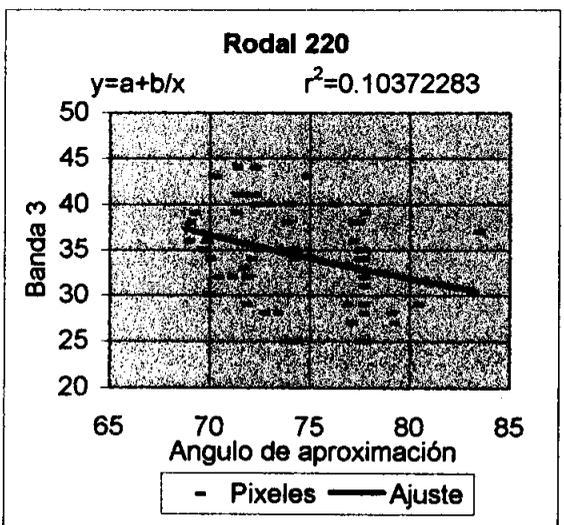
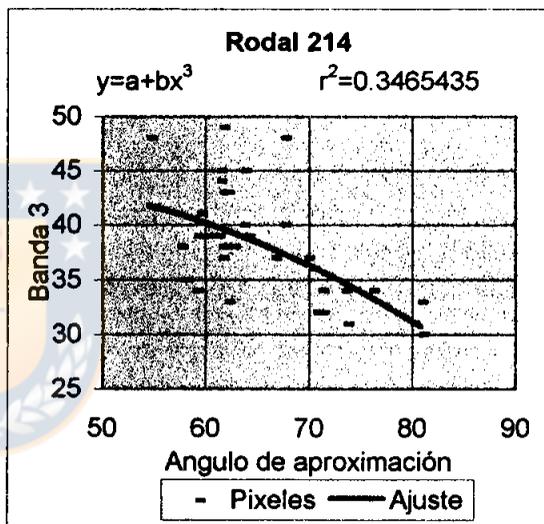
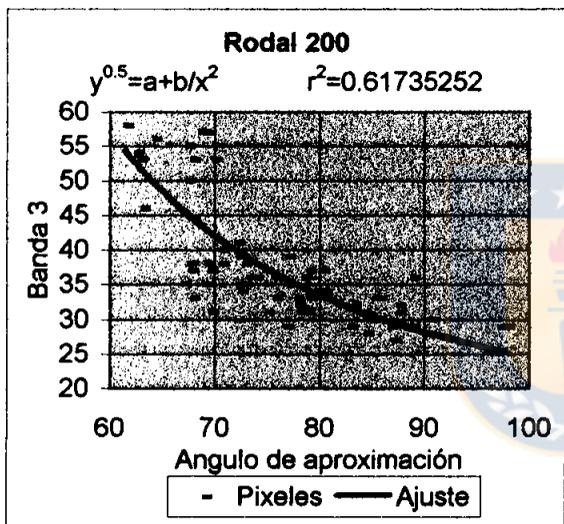
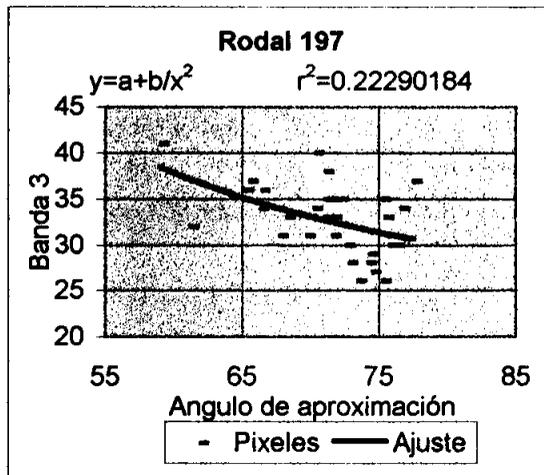
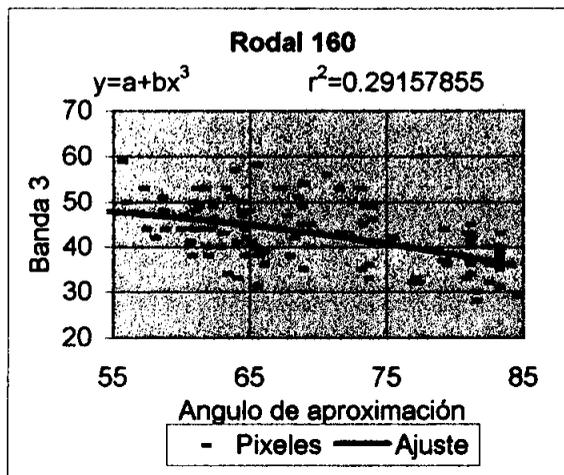
b)

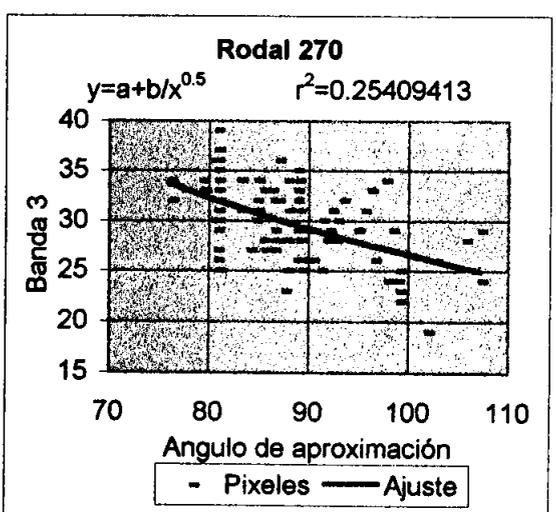
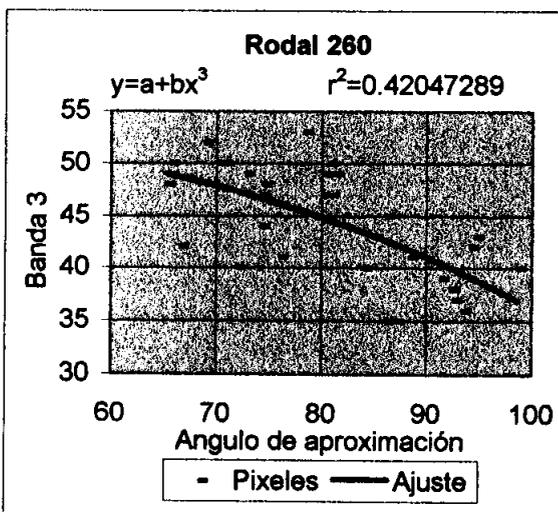
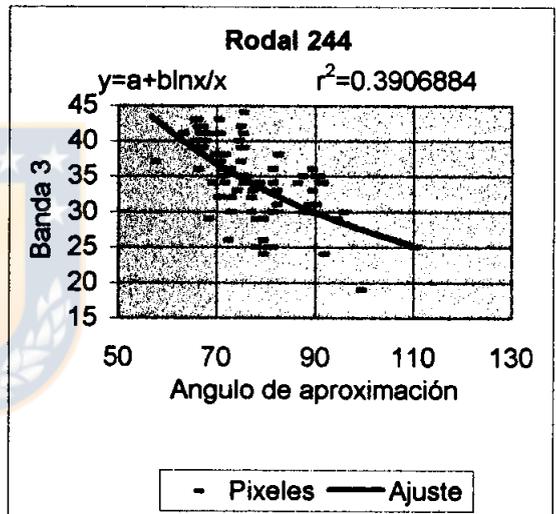
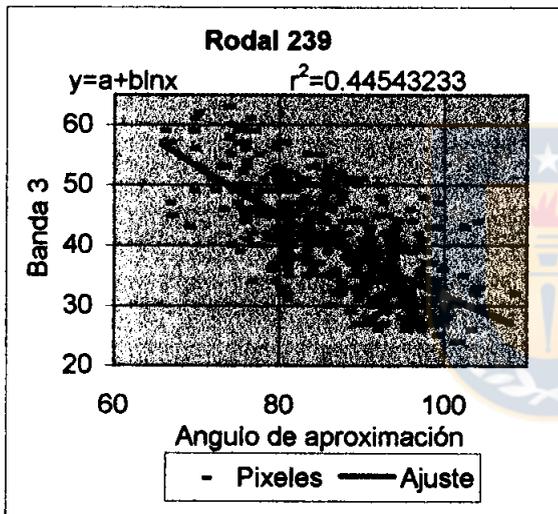
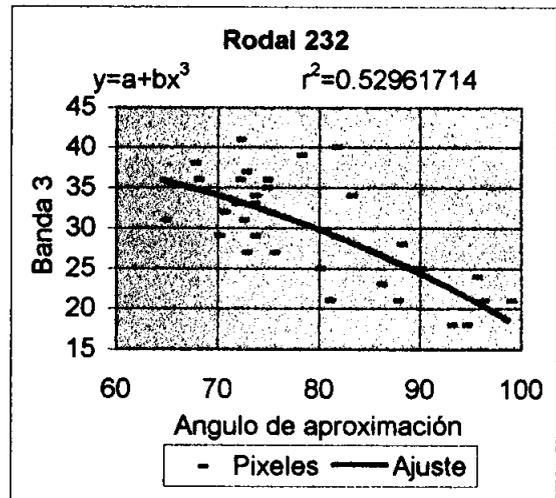
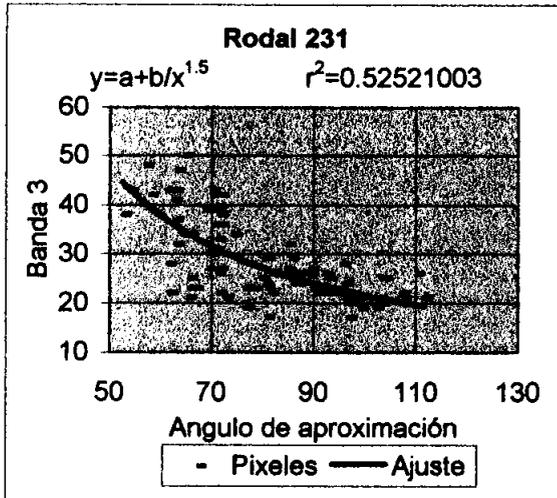
		$y=a+bx$					
		Parámetro	Valores	Error Std	Valor T	95% Lim Conf	95% Lim Conf
n	2627						
r2	0.401	A	13.949	0.0480914	290.0546	13.85513818	14.04314146
DF	0.4	B	2337.6	62.436022	37.43962	2215.540792	2459.621204
Error std.	0.864						
valor F	1402						

c)

		$y=a+bx$					
		Parámetro	Valores	Error Std	Valor T	95% Lim Conf	95% Lim Conf
n	2627						
r2	0.297	A	53.224	0.572504	92.96709	52.10498984	54.3430731
DF Adj r2	0.296	B	-0.0642	0.00216	-29.73075	-0.06844077	-0.059996667
Fit Std Err	7.174						
F-stat	883.9						







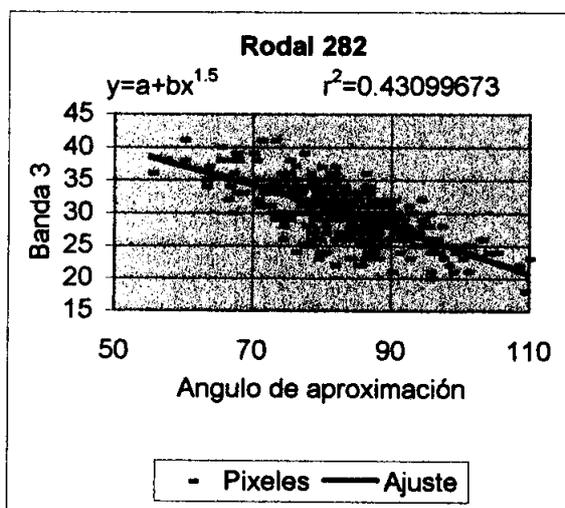
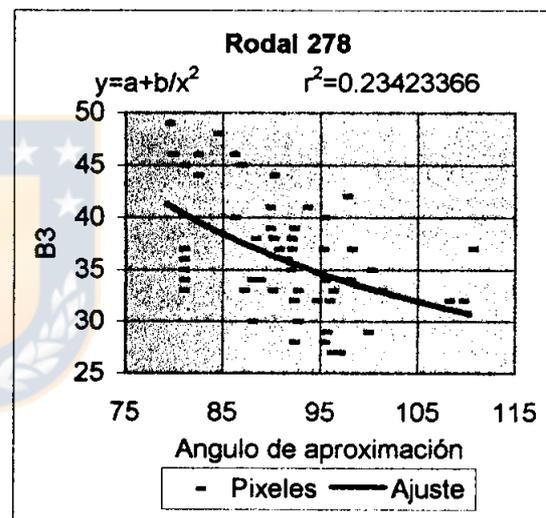
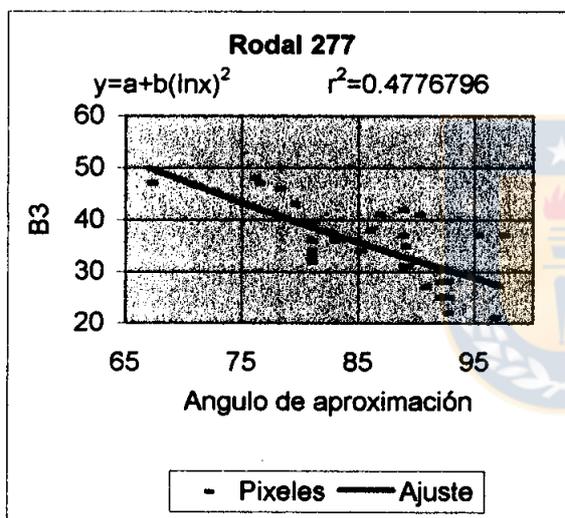
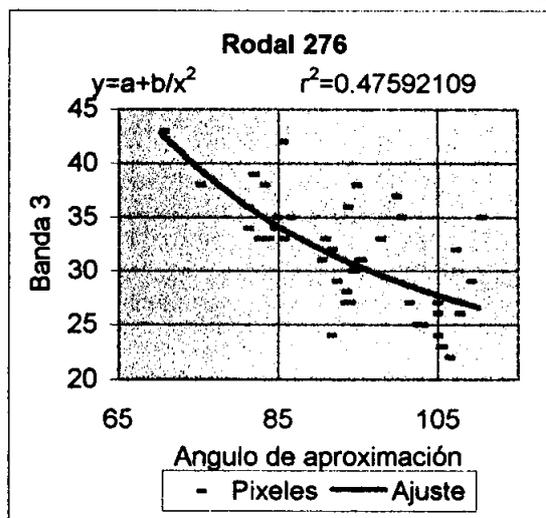
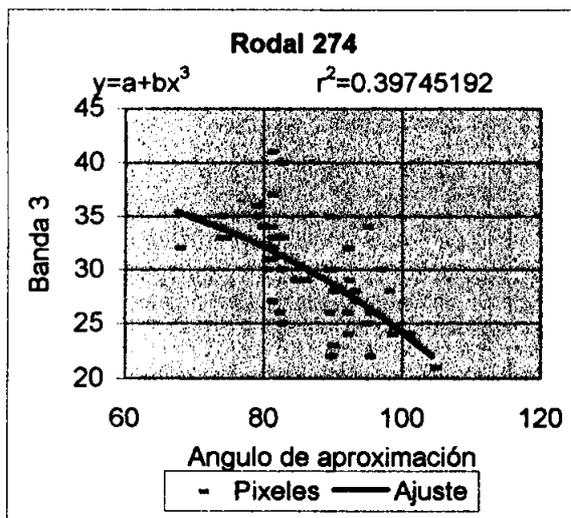


Figura 22 Valor de la banda 3 del satélite SPOT respecto al ángulo de aproximación para los distintos rodales.

Tabla 22. Parámetros estadísticos y modelos ajustados para los diferentes rodales, entre la banda 3 y el ángulo de aproximación.

Rodal	Parámetros estadísticos										Ángulo de Aproximación					Banda 3		
	Modelo	n	r ²	DF	Error	Valor F	a	b	Min	Máx	Dif	Min	Máx	Dif				
21	$y=a+bx^2$	38	0,25	0,20	2,03	10,72	54,12	-2,6E-03	72,0	81,0	9,0	34	43	9				
36	$y=a+b/x^2$	49	0,14	0,10	4,14	7,48	9,01	182398,6	75,4	85,3	9,9	27	44	17				
108	$Ln y=a+b/x^2$	26	0,67	0,64	2,26	49,09	3,08	2837,3	68,8	105,4	36,6	28	42	14				
116	$y=a+b/x^2$	76	0,36	0,34	3,43	41,40	14,30	129897,0	80,0	109,6	29,6	23	42	19				
140	$y=a+b/x^2$	144	0,49	0,48	2,69	137,09	17,12	123247,7	69,7	104,2	34,6	27	44	17				
155	$y=a+bx^3$	274	0,47	0,47	4,49	243,85	55,81	-2,6E-05	36,8	104,2	67,4	27	60	33				
160	$y=a+bx^3$	124	0,29	0,28	5,77	50,21	52,41	-2,8E-05	48,6	84,3	35,7	28	59	31				
197	$Y^{0,5}=a+b/x^2$	33	0,22	0,17	3,35	8,89	19,85	64886,2	59,1	77,5	18,5	26	41	15				
200	$y=a+b/x^2$	67	0,62	0,61	5,33	104,87	3,51	14569,6	61,4	97,8	36,4	27	58	31				
214	$y=a+bx^3$	38	0,35	0,31	4,04	19,09	46,75	-3,0E-05	54,6	80,7	26,2	30	49	19				
220	$y=a+b/x$	60	0,10	0,07	4,85	6,71	-1,77	2688,0	68,8	83,3	14,5	25	44	19				
229	$y=a+bex$	179	0,13	0,12	2,62	26,46	36,24	-3,2E-37	53,7	86,5	32,9	26	42	16				
231	$y=a+b/x^{1,5}$	95	0,53	0,51	5,57	102,88	7,26	14223,0	52,6	111,5	58,9	17	50	33				
232	$y=a+bx^3$	32	0,53	0,50	4,68	33,78	42,63	-2,5E-05	54,6	98,7	44,1	18	41	23				
239	$y=a+blnx$	404	0,45	0,44	6,35	322,89	306,53	-59,7	65,8	108,2	42,4	24	63	39				
244	$y=a+blnx/x$	86	0,39	0,38	4,27	53,86	-2,21	641,6	56,8	109,5	52,7	19	44	25				
260	$y=a+bx^3$	31	0,42	0,38	4,11	21,04	53,93	-1,8E-05	65,4	98,7	33,3	35	53	18				
270	$y=a+b/x^{0,5}$	111	0,25	0,24	3,29	37,13	-21,91	484,8	76,0	107,2	31,2	19	39	20				
274	$y=a+bx^3$	56	0,40	0,37	3,47	35,62	40,45	-1,6E-05	67,5	104,4	36,9	21	41	20				

276	$y=a+b/x^2$	43	0,48	0,45	3,88	37,23	15,36	135648,3	70,3	110,0	39,7	22	43	21
277	$y=a+b(\ln x)^2$	31	0,48	0,44	5,36	26,52	172,26	-6,91978	67,0	97,3	30,3	21	48	27
278	$y=a+b/x^2$	58	0,23	0,21	4,79	17,13	19,52	136736,3	79,2	110,3	31,1	27	49	22
282	$y=a+bx^{1,5}$	467	0,43	0,43	2,76	352,22	48,21	-2,4E-02	55,1	109,7	54,6	18	41	23



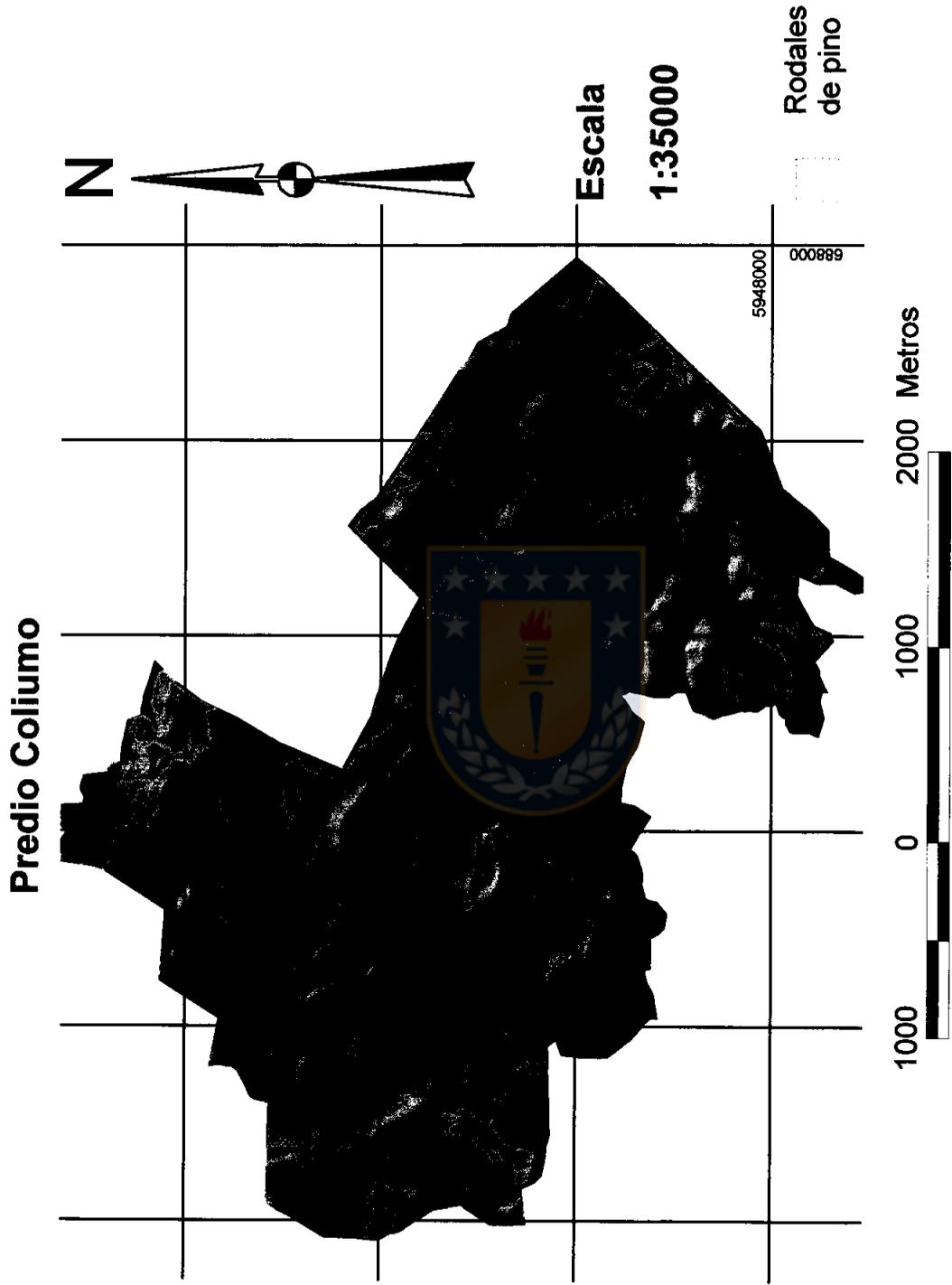


Figura 23 Imagen satelital del área de estudio, predio Coliumo, del 8 de septiembre de 1990.

