

**UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS**  
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA  
E. A. P. DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA

# **Corrección del sombreado topográfico en imágenes landsat etm+, aplicado al inventario de cuerpos de agua**

TESIS para optar el Título Profesional de: INGENIERO GEÓGRAFO  
AUTOR

**Erick Garcia Gonzáles**  
**LIMA-PERÚ 2006**



|                                                     |    |
|-----------------------------------------------------|----|
| ..                                                  | 1  |
| AGRADECIMIENTO: ..                                  | 3  |
| RESUMEN .                                           | 5  |
| INTRODUCCIÓN .                                      | 7  |
| CAPÍTULO I: GENERALIDADES .                         | 9  |
| 1.1. ANTECEDENTES .                                 | 9  |
| 1.2. OBJETIVOS ..                                   | 9  |
| 1.2.1. OBJETIVOS GENERALES ..                       | 10 |
| 1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS ..                     | 10 |
| CAPÍTULO II: ASPECTOS CONCEPTUALES .                | 11 |
| 2.1. LA TELEDETECCIÓN ..                            | 11 |
| 2.1.1. DEFINICIÓN .                                 | 11 |
| 2.1.2. ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA .                   | 12 |
| 2.1.3. INTERACCIÓN DE LA ENERGÍA CON LOS OBJETOS .. | 18 |
| 2.2. LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA .       | 24 |
| 2.2.1. DEFINICIÓN DE SIG ..                         | 24 |
| 2.2.2. MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN ..            | 25 |
| 2.3. SIMULACIÓN DE PROCESOS EN UN SIG .             | 36 |
| 2.3.1. MODELOS DE ILUMINACIÓN SIMPLES ..            | 36 |
| 2.3.2. MODELOS DE ILUMINACIÓN COMPLEJOS .           | 36 |
| 2.4. CONEXIÓN ENTRE LA TELEDETECCIÓN Y LOS SIG ..   | 43 |
| 2.4.1. NECESIDADES DE LOS SIG ..                    | 43 |
| 2.4.2. APOYO DE LOS SIG A LA TELEDETECCIÓN .        | 44 |
| 2.5. LA REDUCCIÓN DEL SOMBREADO TOPOGRÁFICO ..      | 44 |
| 2.5.1. CORRECCIÓN DEL COSENO .                      | 45 |
| 2.5.2. CORRECCIÓN DE MINNAERT .                     | 45 |
| 2.5.3. CORRECCIÓN C ..                              | 46 |

|                                                                       |           |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>CAPITULO III: LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .</b> | <b>51</b> |
| <b>3.1. DELIMITACIÓN GEOGRÁFICA .</b>                                 | <b>51</b> |
| <b>3.1.1. UBICACIÓN Y LOCALIZACIÓN . .</b>                            | <b>51</b> |
| <b>3.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS .</b>                                 | <b>52</b> |
| <b>3.2.1. GEOLOGIA .</b>                                              | <b>52</b> |
| <b>3.2.2. CLIMATOLOGIA . .</b>                                        | <b>52</b> |
| <b>3.2.3. SUELOS .</b>                                                | <b>53</b> |
| <b>3.2.4. GEOMORFOLOGIA Y FISIOGRAFIA . .</b>                         | <b>53</b> |
| <b>3.2.5. HIDROGRAFIA E HIDROLOGIA .</b>                              | <b>53</b> |
| <b>CAPITULO IV: MATERIALES Y METODOS DE INVESTIGACIÓN . .</b>         | <b>55</b> |
| <b>4.1. MATERIALES .</b>                                              | <b>55</b> |
| <b>4.1.1. HARDWARE Y SOFTWARE UTILIZADOS .</b>                        | <b>55</b> |
| <b>4.2. INFORMACIÓN UTILIZADA .</b>                                   | <b>56</b> |
| <b>4.2.1. INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA . .</b>                            | <b>56</b> |
| <b>4.2.2. IMÁGEN DE SATÉLITE .</b>                                    | <b>56</b> |
| <b>4.3. METODOLOGÍA .</b>                                             | <b>58</b> |
| <b>4.3.1. ETAPAS DENTRO DEL PROCESO . .</b>                           | <b>58</b> |
| <b>CAPITULO V: DETECCIÓN Y DELIMITACIÓN DE CUERPOS DE AGUA .</b>      | <b>77</b> |
| <b>5.1. ETAPAS DENTRO DE LA CLASIFICACIÓN .</b>                       | <b>77</b> |
| <b>5.1.1. INTEGRACIÓN DE LA INFORMACIÓN DENTRO DE UN SIG .</b>        | <b>77</b> |
| <b>5.1.2. METODOS DE CLASIFICACIÓN EMPLEADOS .</b>                    | <b>78</b> |
| <b>5.1.3. VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS .</b>                          | <b>83</b> |
| <b>5.1.3. PRODUCCIÓN CARTOGRÁFICA .</b>                               | <b>84</b> |
| <b>CAPITULO VI: DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .</b>                     | <b>87</b> |
| <b>6.1. DISCUSIÓN . .</b>                                             | <b>87</b> |
| <b>CAPITULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES . .</b>               | <b>89</b> |
| <b>7.1. CONCLUSIONES .</b>                                            | <b>89</b> |
| <b>7.2. RECOMENDACIONES .</b>                                         | <b>90</b> |
| <b>GLOSARIO .</b>                                                     | <b>93</b> |





---

*A mis amados padres, y a mi hermana, por su apoyo y su amor plasmado en ayuda efectiva para realizar mis estudios.*



## AGRADECIMIENTO:

A mi asesora de tesis, la Geog. Zoila Rodríguez Sánchez; por su predisposición permanente en aclarar mis dudas y por sus substanciales sugerencias durante la redacción de la Tesis.

A la Ing. Edith Rojas Perea, de la Oficina de Evaluación e Información de Recursos Naturales (OEIRN) del Inrena por su estímulo en desarrollar dicha investigación y para seguir creciendo intelectualmente, por su amistad.

Al Ing. Roque Fernández Gutiérrez, Oficina de Evaluación e Información de Recursos Naturales (OEIRN) del Inrena, por la información cartográfica y la imagen de satélite cedidas gentilmente para el desarrollo de la investigación.

Al Ing. Mario Aguirre Núñez jefe de la de la Dirección de Recursos Hídricos (IRH) del Inrena, por creer en esta investigación y aceptar el piloto para una aplicación concreta.

Al Ing. Oscar Bravo jefe de la Dirección de Gestión y Manejo de Cuencas Hidrográficas (DIGECH) del Inrena, por las facilidades otorgadas para el desarrollo de la tesis.

A mis amigos en especial a Edson por su apoyo en la generación del glosario de la tesis.

Finalmente a mis padres quienes me infundieron la ética y el rigor que guían mi transitar por la vida y a mi querida hermana Giselle por su apoyo incondicional.



## RESUMEN

Las imágenes captadas por los sensores a bordo de los satélites de observación terrestre antes de que puedan ser utilizadas tienen que pasar por una serie de correcciones que dependerán del uso final que se quiera hacer de ellas. Esta investigación trata sobre la corrección del sombreado topográfico, la cual trata de disminuir las sombras presentes en la imagen principalmente en zonas de relieve abrupto.

Las sombras dificultan la interpretación visual de cubiertas de interés así como la clasificación digital como en nuestro caso que pretendemos discriminar cuerpos de agua, que por su baja respuesta espectral se confunden con las sombras presentes en la imagen de satélite.

Se han analizado tres de los principales métodos de los muchos que se han propuesto para este fin aplicándolos a una sub-escena de una imágenes Landsat ETM+ perteneciente a la cuenca alta del río Chillón, mediante el empleo de programas informáticos de tratamiento digital de imágenes de satélite y de sistemas de información geográfica, haciendo uso de sus lenguajes de programación y del álgebra de mapas lo cual ha permitido tener un control detallado durante el proceso de corrección.



# INTRODUCCIÓN

La corrección del sombreado topográfico, es un procedimiento que se efectúa sobre las imágenes de satélite con el fin de disminuir la diferencia de iluminación causadas por la topografía y la ubicación del sol para posiciones concretas, esto con el objetivo final de disminuir la variabilidad entre cubiertas de interés situadas principalmente en áreas de sombra o baja iluminación, este tipo de corrección es necesaria en las imágenes de satélite de la región andina de nuestro país debido a sus características geográficas y a la cantidad de recursos que posee.

Existen trabajos publicados sobre este tema, sin dar muchos detalles sobre la formulación de los algoritmos y su consecuente aplicación, quedándose a veces un poco oculta la manera en que proceden éstos, ya que solo vemos resultados y no las dificultades que el proceso conlleva en si.

La motivación de realizar la presente investigación fue la dificultad para identificar y delimitar los lagos y lagunas existentes en una imagen de satélite que abarca parte de la cuenca alta del río Chillón, ya que en los primeros intentos de separación de cuerpos de agua en una imagen de pseudocolor las sombras que estaban presentes en la escena interferían al momento de asignar los píxeles a la clase cuerpos de agua debido a la baja respuesta que presentan las sombras en todas las bandas de espectro que cubre el sensor ETM+ y que se asemeja al comportamiento típico del agua en estas regiones del espectro.

La solución entonces es corregir el sombreado que presentan las imágenes en zonas de relieve abrupto, la idea general es construir un modelo digital de elevación (DEM) con

una adecuada resolución y simular las condiciones de iluminación que se presentaron el día de la toma de la imagen, esto expresado de manera simplificada porque lo que se pretende es tener un factor de corrección y no una medida exacta de la irradiancia solar en esa fecha a fin de corregir el problema con algoritmos apropiados. Al término de la corrección se debe lograr disminuir la iluminación en aquellas zonas expuesta hacia la fuente de iluminación y aumentarlas en aquellas que se encontraban ocultas del sol.

La hipótesis plantea que el uso de un factor de suavizado en la pendiente aplicado a los métodos de corrección de sombreado topográfico tiende a mejorar los resultados, cuando no se cuenta con un modelo de iluminación difusa y solo se toma en cuenta la radiación directa proveniente del sol permitiendo una mejor identificación y delimitación de los cuerpos de agua presentes en la imagen de satélite.

Los resultados obtenidos al realizar la clasificación digital de cuerpos de agua con la imagen corregida fueron muy superiores a los realizados antes de la corrección de las sombras, ya que se lograron disminuir los píxeles que se confundían con los del agua y no lo eran, a la vez que apoyándonos de un factor de suavizado en la pendiente se consigue afinar más los resultados obtenidos en el proceso de clasificación digital.

# CAPÍTULO I: GENERALIDADES

## 1.1. ANTECEDENTES

Esta corrección está incluida de manera simplificada en algunos programas de tratamiento digital de imágenes de satélite y en pocos trabajos publicados sobre este tema en castellano, sin dar muchos detalles sobre la formulación de los algoritmos y su consecuente aplicación quedando a veces oculta la manera en que se procesaron éstos, ya que solo vemos resultados y no los pasos y las dificultades que el proceso conlleva en si. Pero al mismo tiempo nos dan una idea de las nuevas técnicas en el procesamiento digital de imágenes de satélite que se aplican en otros países (EEUU, Canadá, Australia, Alemania, etc.), como es el caso concreto de la corrección del sombreado topográfico, el cual es necesario tener en cuenta en el procesamiento de imágenes de satélite de la región andina de nuestro país debido a sus características topográficas, geográficas y a la cantidad de recursos que posee.

## 1.2. OBJETIVOS

### **1.2.1. OBJETIVOS GENERALES**

---

Generación de una metodología de trabajo para la corrección por sombreado topográfico en las imágenes de satélite aplicando tres métodos: corrección del coseno, corrección de minnaert y la corrección C, comparando los resultados obtenidos de manera que se pueda mejorar la identificación y delimitación de los cuerpos de agua existentes dentro de la cuenca alta del río Chillón y su aplicación a otras cuencas de similares características topográficas y geográficas.

### **1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

---

- Comparar los resultados obtenidos después de la aplicación de los tres métodos empleados para la corrección del sombreado topográfico en las imágenes de satélite de manera estadística y visual.
  - Obtener un mejor resultado en la fase de clasificación digital de cuerpos de agua con la imagen corregida por el sombreado topográfico.
  - Demostrar la utilidad de los programas de SIG que cuentan con funciones de álgebra de mapas, además de un lenguaje de programación propio donde puede ser programada la corrección del sombreado topográfico sin recurrir a programas de elevado costo.
  - Demostrar el uso de la teledetección como un medio rápido y eficiente en la identificación y delimitación de cuerpos de agua manteniendo la información cartográfica actualizada e incluida dentro de un sistema de información geográfica (SIG).

## CAPÍTULO II: ASPECTOS CONCEPTUALES

### 2.1. LA TELEDETECCIÓN

#### 2.1.1. DEFINICIÓN

---

La Teledetección puede ser definida como un proceso mediante el cual es posible reunir información acerca de un objeto, un área o fenómeno sin estar en contacto con éste. Nuestros ojos son un excelente ejemplo de un dispositivo de teledetección. Nosotros somos capaces de reunir información acerca de nuestro alrededor midiendo la cantidad de reflectancia de la porción visible de la energía de algún objeto en la superficie terrestre causada por alguna fuente externa de energía (tal como el sol o un foco de luz), a diferencia de un termómetro, el cual tiene que estar en contacto con el fenómeno que quiere ser medido y de esta forma este no es un dispositivo de teledetección.

Dada esta definición general, el termino teledetección ha sido mayormente asociado a la medición de la interacción entre los materiales de la superficie terrestre y la energía electromagnética, sin embargo en un intento de ser más específicos en esta definición

esta podría volverse más complicada, ya que la energía medida en el medio ambiente no siempre es electromagnética (ejemplo; sonar) y algunos otros procedimientos de medición de energía natural son causadas por emisiones (ejemplo; la región del térmico), entonces hablaríamos mas de un proceso de interacción de algún tipo de energía proveniente desde alguna fuente independiente.

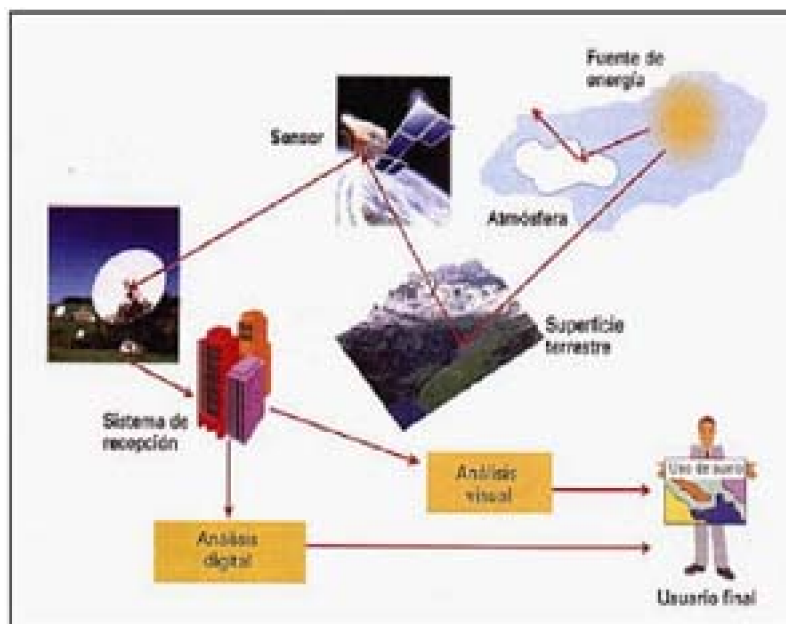


*Figura N° 1: Procesos dentro de la Teledetección*

Los Procesos que ocurren dentro de la teledetección, primero debe de existir la fuente de energía en este caso la energía solar, la superficie terrestre refleja ésta de diferentes maneras siendo captada por el satélite quien la recibe y la envía a la antena receptora ubicada en la estación terrestre en donde se procesa y se convierte en una imagen que luego será distribuida a los usuarios finales ya sea en medio digital (CD, DVD) para ser procesada y analizada en un computador o impresa para una interpretación visual según el requerimiento del especialista. (Ver figura N°1)

## **2.1.2. ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA**

---

La radiación electromagnética es una forma de energía que se propaga mediante ondas que se desplazan por el espacio a la velocidad de la luz (300000 Km/s) transportando cantidades discretas de energía (cuantos).

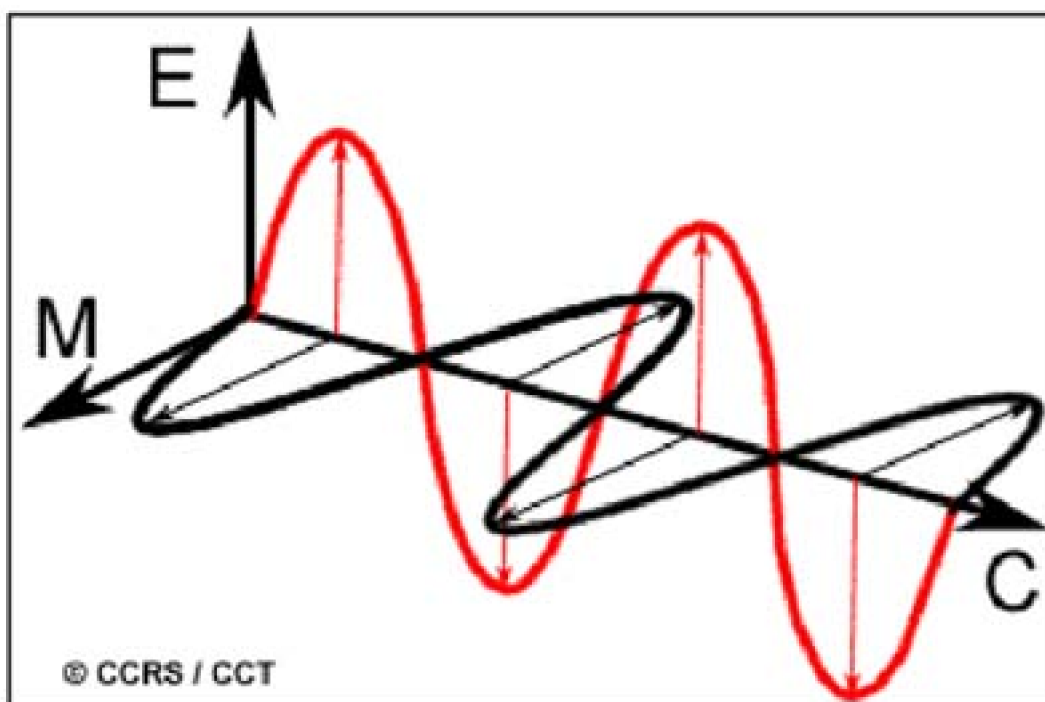


*Figura N° 2: La Radiación Electromagnética*

La radiación electromagnética se puede representar gráficamente de un campo eléctrico (E), el cual es perpendicular a la dirección en la cual la radiación viaja, y un campo magnético (M) orientado en un ángulo recto al campo eléctrico. Ambos campos viajan a la velocidad de la luz (c). (Ver figura N°2)

#### **2.1.2.1. Espectro Electromagnético**

Como se mencionó anteriormente, la radiación electromagnética es un tipo de energía que se propaga por ondas, estas ondas se caracterizan por tener longitudes muy diferentes, desde los rayos X y gamma con longitudes de onda menores de 100 Amstrongs hasta las ondas de televisión y radio con longitudes mayores de un metro. El conjunto de todas las longitudes de onda se denomina espectro electromagnético. Dentro del espectro electromagnético se distinguen una serie de regiones en función de la longitud de onda. Las regiones más utilizadas por las diferentes técnicas de teledetección son:

- Espectro Visible (0.4-0.7  $\mu\text{m}$ ). Es la región del espectro electromagnético que nuestros ojos, pueden detectar. Esta es realmente una porción muy pequeña del espectro total. Las longitudes de ondas del visible cubren un rango aproximado que va desde el 0.4 al 0.7  $\mu\text{m}$ , la longitud de onda mas larga del visible es la roja y la mas corta es la violeta, esta región es la que comúnmente nosotros percibimos como un determinado color: violeta 0.400-0.446  $\mu\text{m}$ ; azul 0.446-0.500  $\mu\text{m}$ ; verde 0.500-0.578  $\mu\text{m}$ ; amarillo 0.578-0.592  $\mu\text{m}$ ; anaranjado 0.592-0.620  $\mu\text{m}$ ; y rojo 0.620-0.700  $\mu\text{m}$ , como vemos es solo una parte del espectro la que puede ser asociada con el término color.

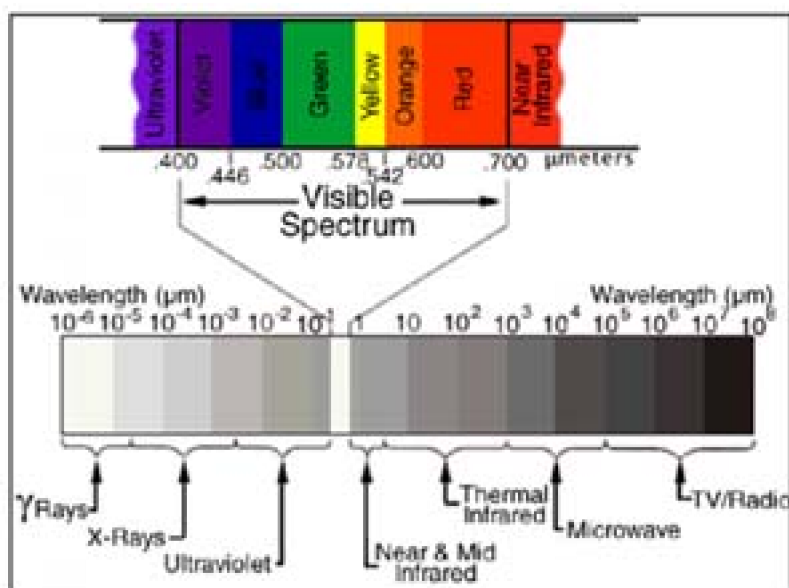


Figura N° 3: El Espectro Electromagnético

La Figura N°3, muestra la división del espectro electromagnético por longitud de onda allí se puede apreciar a la región del visible que ocupa una pequeña porción con respecto a todo el espectro.

- La región Infrarroja (IR). La cual cubre el rango aproximado de longitudes de onda desde 0.7 al 100  $\mu\text{m}$  - más de cien veces el ancho del espectro visible. La región del infrarrojo puede ser dividida en dos categorías basadas en sus propiedades de radiación, el Infrarrojo Reflejado y el Emitido o Infrarrojo Térmico. La radiación en el Infrarrojo Reflejado es usada por los sensores remotos de manera muy similar a la porción del visible. El rango que cubre va aproximadamente desde 0.7-3.0  $\mu\text{m}$ . La región Térmica es bastante diferente a la región Infrarroja y Visible, ya que esta energía es básicamente la radiación emitida por la superficie terrestre en forma de calor, la región térmica cubre aproximadamente un rango de longitudes de onda que van desde 3.00-1.00  $\mu\text{m}$ .

#### 2.1.2.2. Mecanismos de Interacción

Todos los objetos (independientemente de la radiación que emitan) van a recibir radiación emitida por otros cuerpos, fundamentalmente del sol, que, en función del tipo de objeto que estemos considerando, puede seguir tres caminos:

- Reflejarse, la radiación es reenviada de vuelta al espacio.
- Absorberse, la radiación pasa a incrementar la energía del objeto.
- Transmitirse, la radiación se transmite hacia abajo a otros objetos.



*Figura N°4: Comportamiento de la Radiación Electromagnética*

La radiación electromagnética proveniente del sol al llegar a un objeto ubicado sobre la superficie terrestre en este caso una hoja se puede reflejar, absorber o transmitir. (Ver figura N°4)

La fracción de energía que se refleja se denomina reflectividad o albedo ( $\rho$ ); la fracción de energía que se absorbe se denomina absorptividad ( $\alpha$ ); la fracción de energía que se transmite se denomina transmisividad ( $\tau$ ), de modo que la suma de estas tres debe ser igual a la unidad.

La interacción de la radiación con la atmósfera y con los objetos terrestres, es decir los valores de  $\rho$ ,  $\alpha$  y  $\tau$  de un cuerpo concreto, va a depender de las características de ese cuerpo.

### **2.1.2.3. Efectos Atmosféricos**

La atmósfera es un factor importante al considerar los flujos de radiación entre el sol y la superficie terrestre y entre ésta y los satélites. En el espacio exterior no hay pérdida de radiación por interferencia con ningún medio material, sólo atenuación debida a la ley del cuadrado de la distancia. Los gases y aerosoles que componen la atmósfera tienen un efecto triple sobre la radiación:

1.- Absorción; de la energía en determinadas bandas del espectro. Cada uno de los gases atmosféricos tiene capacidad para absorber radiación en diferentes longitudes de onda. Los principales responsables son:

- Ozono ( $O_3$ ): Absorbe radiación ultravioleta.
- Dióxido de carbono ( $CO_2$ ): Absorbe radiación en 13-17.5  $\mu m$ .

- Vapor de agua (H<sub>2</sub>O): Absorbe radiación en 5.5-7  $\mu\text{m}$  y por encima de 27  $\mu\text{m}$ .

Esto deja, por otro lado, regiones del espectro en las que no se produce absorción, son las denominadas ventanas atmosféricas. Por tanto la teledetección sólo va a ser en principio viable en estas ventanas, las Principales ventanas aparecen en:

- Visible e infrarrojo cercano (0.3-1.35  $\mu\text{m}$ )
- Infrarrojo cercano (1.5-1.8 $\mu\text{m}$ ; 2-2.4  $\mu\text{m}$ )
- Infrarrojo medio (2.9-4.2  $\mu\text{m}$ ; 4.5-5.5  $\mu\text{m}$ )
- Infrarrojo térmico (8-14  $\mu\text{m}$ )
- Microondas, por encima de 20  $\mu\text{m}$  la atmósfera es prácticamente transparente.

Problema aparte supone la aparición de partículas líquidas o sólidas que reflejan gran parte de la radiación solar que reciben. Las nubes emiten su propia radiación en el infrarrojo térmico, diferente a la terrestre debido a su menor temperatura, con lo que ocultan la superficie terrestre en ambas regiones del espectro. Debido a la saturación en vapor de agua del aire dentro de las nubes su capacidad de absorber radiación en la banda de absorción del vapor de agua dependerá de su espesor. Incluso en las ventanas atmosféricas, la transmitancia nunca va a ser del 100% y así la radiancia que llega al satélite es siempre algo menor que la que sale de la Tierra.

2.- Dispersión; Es el mecanismo por el cual la radiación electromagnética es reflejada o refractada por gases o partículas situados en la atmósfera. De este modo disminuye la radiancia directa y aumenta la difusa. Los principales causantes de la dispersión atmosférica son los gases y aerosoles (partículas sólidas o líquidas) que la componen, debido a la elevada variabilidad espacio-temporal de algunos de los gases y de los aerosoles resulta difícil establecer modelos generales para cuantificar su influencia final en una imagen.

En la figura N°5, podemos ver como la energía proveniente del sol al entrar en contacto con la atmósfera sufre el efecto de dispersión, el cual hace que la radiación directa disminuya, aumentándose la radiación difusa.

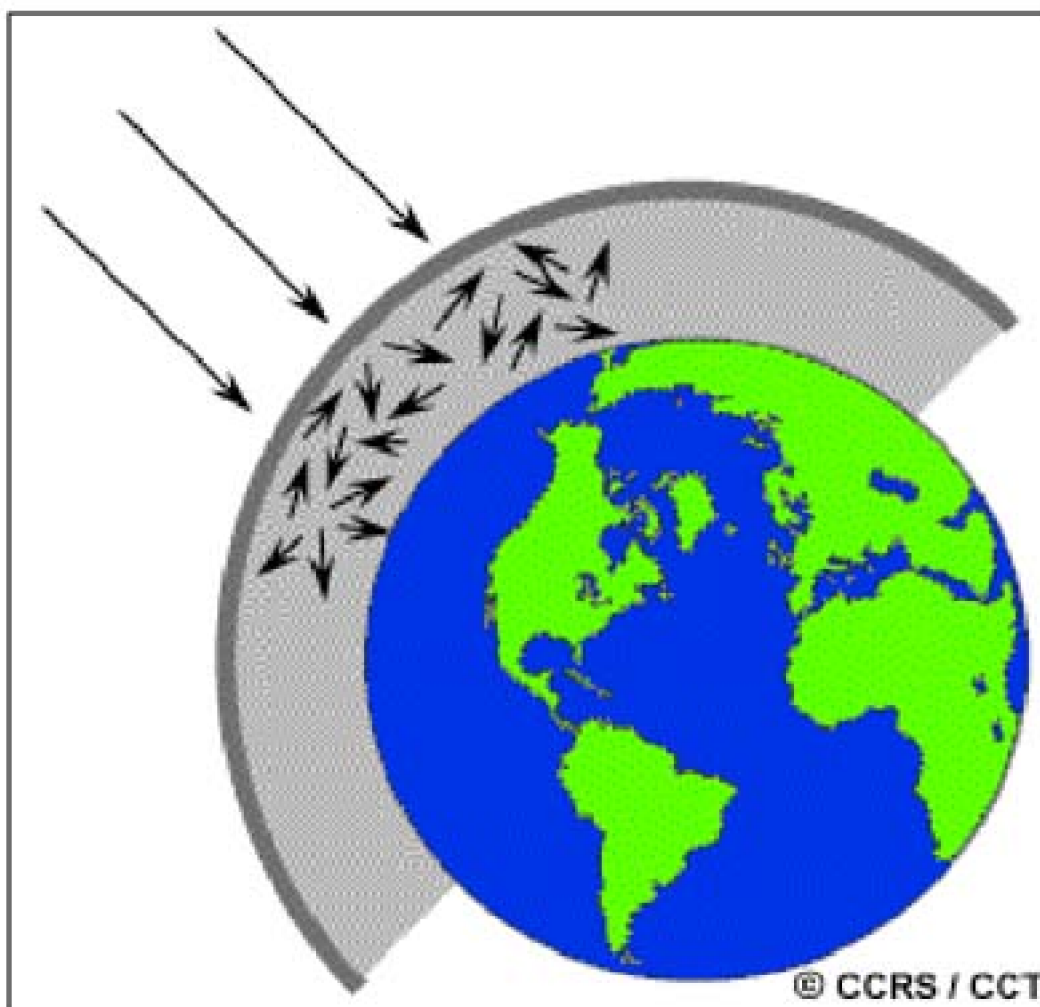


*Figura N°5: Interacción de la Radiación Solar con la Atmósfera Terrestre*

Existen tres tipos fundamentales de dispersión:

- Dispersión de Rayleigh, ocurre cuando la longitud de onda es más corta que el tamaño de los objetos responsables de la dispersión. Afecta por tanto a las longitudes de onda muy cortas y causa el color azul del cielo.
- Dispersión de Mie, ocurre cuando la longitud de onda es del mismo orden de magnitud que los objetos dispersores: vapor de agua, polvo y aerosoles.
- Dispersión no selectiva, ocurre cuando la longitud de onda es mucho más larga que los objetos, la producen las gotas de agua y las grandes partículas de polvo. Este tipo de dispersión causa niebla y nubes que aparecen blancas ante nuestros ojos debido a que la luz azul, verde y roja es dispersada en iguales cantidades aproximadamente. (ver figura N°6)



*Figura N°6: Dispersión No Selectiva*

3.-Emisión atmosférica; Cuando se trabaja en el infrarrojo térmico, el objetivo fundamental es estimar la temperatura de la superficie terrestre, sin embargo los datos que llegan al satélite incluyen emisión tanto de la superficie como de las diferentes capas de la atmósfera. Resulta difícil distinguir un efecto del otro, sin embargo se han hechos avances significativos en este sentido.

### **2.1.3. INTERACCIÓN DE LA ENERGÍA CON LOS OBJETOS**

---

Para la identificación de objetos y procesos en la superficie terrestre, lo que nos interesa es la reflectividad de estos objetos respecto a las diferentes longitudes de onda. Cada tipo de material, suelo, vegetación, agua, etc. reflejará la radiación incidente de forma diferente, lo que permitirá distinguirlo de los demás, si medimos la radiación reflejada. A partir de medidas de laboratorio se ha obtenido la reflectividad para distintas cubiertas en diferentes longitudes de onda.

El gráfico que para cada longitud de onda nos da la reflectividad en tanto por ciento de un determinado objeto, se conoce como grafico de firmas espectrales y este porcentaje constituye una marca de identidad de dicho objeto. (Ver figura N°7)

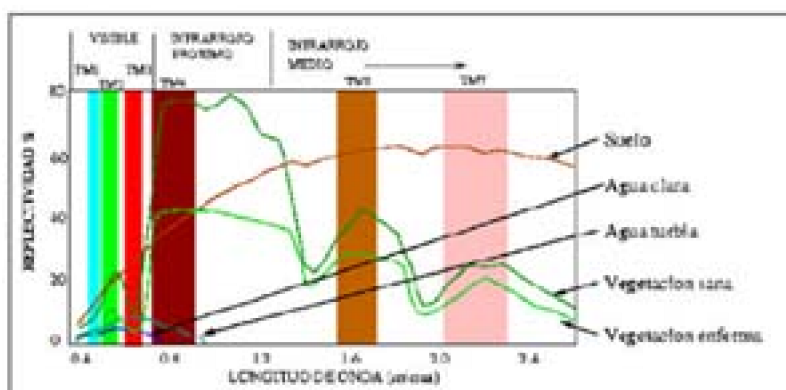


*Figura N°7: Principales Firmas Espectrales*

De la figura N°7, por ejemplo podemos distinguir entre suelo y vegetación, e incluso entre los diferentes tipos de suelo o los diferentes tipos de vegetación.

En el caso de la radiación visible, las diferencias en cuanto a la reflexión para las diferentes longitudes de onda, se traduce en lo que llamamos colores.

Existen dos tipos de superficies (ver figura N°8), aquellas que reflejan la radiación solar direccionalmente con un ángulo igual al ángulo incidente (superficies especulares) y aquellas que reflejan la radiación hacia todas direcciones (superficies lambertianas).

En la naturaleza la mayor parte de las superficies tienden a comportarse de un modo intermedio, aunque suele asumirse que el comportamiento es lambertiano. En el espectro visible sólo el agua en calma presenta un comportamiento especular.

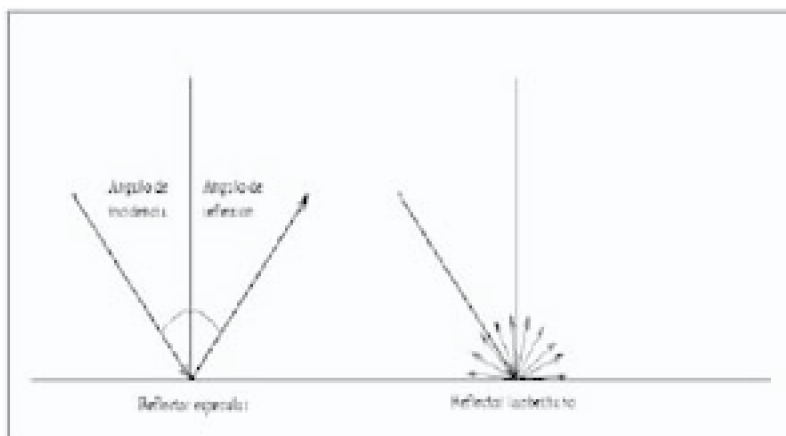


*Figura N°8: Superficies Especulares y Lambertianas*

La reflexión especular ocurre principalmente en superficies lisas, mientras que las Lambertianas en rugosas, pero en la naturaleza la mayor parte de las superficies tienen un comportamiento intermedio entre ambas.

El comportamiento Lambertiano de las superficies junto a la dispersión atmosférica, tienen el efecto de producir una imagen más borrosa de la que se contemplaría directamente sobre la superficie terrestre. La razón es que las respuestas espectrales de píxeles contiguos se contaminan unas a otras.

### **2.1.3.1. Comportamiento del Agua**

El agua clara tiene una excelente propiedad en cuanto a transmisión de la radiación electromagnética en el espectro visible y de absorción en el infrarrojo. En la curva de reflectancia aparece un pico en el verde que va reduciéndose hasta el infrarrojo. Esta falta de reflectividad en el infrarrojo va a ser la clave para distinguir entre áreas de tierra y agua.

El carácter tridimensional de las superficies de agua hace que en su respuesta espectral aparezca un componente debido a la superficie, otro a la columna de agua y un tercero al fondo. Por tanto variaciones tanto en la columna de agua como en los materiales del fondo van a alterar su respuesta; un fondo de arena clara proporciona mayor reflectancia que otro compuesto por materia orgánica en descomposición.

La profundidad a la que la luz puede penetrar depende de la longitud de onda. En el agua clara la profundidad de penetración son 10 m entre 0.5 y 0.6 $\mu$  cayendo hasta 10 cm en 0.8 - 1.1 $\mu$ . Por tanto al incrementarse la profundidad del agua la reflectancia, en cualquier longitud de onda, desciende.

Cuando el agua contiene turbidez, las consecuencias sobre la respuesta espectral van a depender del tipo de turbidez. Si se trata de fitoplancton, aparecen importantes alteraciones en el verde (aumenta) y en el azul (disminuye). Estos resultados han permitido el desarrollo de diversas ecuaciones empíricas. Si se trata de sedimentos inorgánicos la reflectividad aumenta, especialmente en el rojo.

La reflectividad en la nieve es completamente diferente a la del agua, es muy alta en todas las longitudes de onda, especialmente en el caso de la nieve fresca, pudiendo incluso saturar los sensores.

Es posible confundir en una imagen la cobertura de nieve con cobertura nubosa(al fin y al cabo formadas por partículas de hielo) con la salvedad de que la reflectividad de la nieve cae hasta cero para longitudes de onda mayores de 1.4 $\mu$  mientras que la de las nubes sigue siendo alta haciendo es posible su discriminación en esta región del espectro electromagnético.

### **2.1.3.2. Comportamiento de la Vegetación**

La vegetación sana tiene una reflectividad baja en el visible aunque con un pico en el color verde debido a la clorofila, este pigmento aparece en concentraciones entre 5 y 10 veces mayores que otros como el caroteno. La reflectividad es muy alta en el infrarrojo reflejado o próximo debido a la escasa absorción de energía por parte de las plantas en esta banda. En el infrarrojo medio hay una disminución especialmente importante en aquellas longitudes de onda en las que el agua de la planta absorbe la energía. Durante el otoño, las hojas pierden los cloroplastos (órganos que contienen la clorofila) ya que dejan de ser necesarios al cesar la actividad fotosintética, por tanto deja de ser la clorofila el pigmento principal y las plantas adquieren un color pardo-amarillento debido a la cada vez mayor importancia relativa de carotenos y otros pigmentos.

La curva de reflectividad tan contrastada en la vegetación sana se debilita en el caso

de la vegetación enferma en la que disminuye el infrarrojo y aumenta la reflectividad en el rojo y azul. Se observa también que la reflectividad de una planta depende de su contenido en agua. Cuando el contenido de agua aumenta disminuye la reflectividad ya que aumenta la absorción de radiación por parte del agua contenida en la planta.

La cantidad de energía de los fotones que viajan con longitudes de onda mayores (infrarrojo cercano) es demasiado baja para ser aprovechada por la vegetación por lo que sólo se absorbe en torno al 5%, el resto se transmite (40%) o refleja (55%). Sin embargo, la energía transmitida acabará llegando a otra hoja situada por debajo, y por tanto el 55% de ese 40% se volverá a reflejar.

Este proceso, repetido en diferentes capas hace que se incremente el tanto por ciento de energía reflejada por un dosel vegetal.

El envejecimiento de la planta conlleva a una reducción en la reflectividad en el infrarrojo.

Las variaciones en la estructura interna de las hojas son la causa principal de que los patrones de respuesta espectral sean diferentes de unas especies a otras.

En cuanto al infrarrojo medio, el agua presente en los tejidos vegetales absorbe la radiación en diversas longitudes de onda hasta alcanzar valores de  $\alpha = 0.9$  que afectan incluso a las longitudes de onda vecinas de aquellas en las que se produce máxima absorción. En general cuanto menor sea el contenido de agua de una planta, mayor será su reflectividad en el infrarrojo medio.

La figura N°9, muestra un grafico con las firmas espectrales del agua y la vegetación, como vemos es obvia la diferencia en el comportamiento de estas dos cubiertas ante la incidencia de la radiación solar, lo que las hace fácil de discriminar.

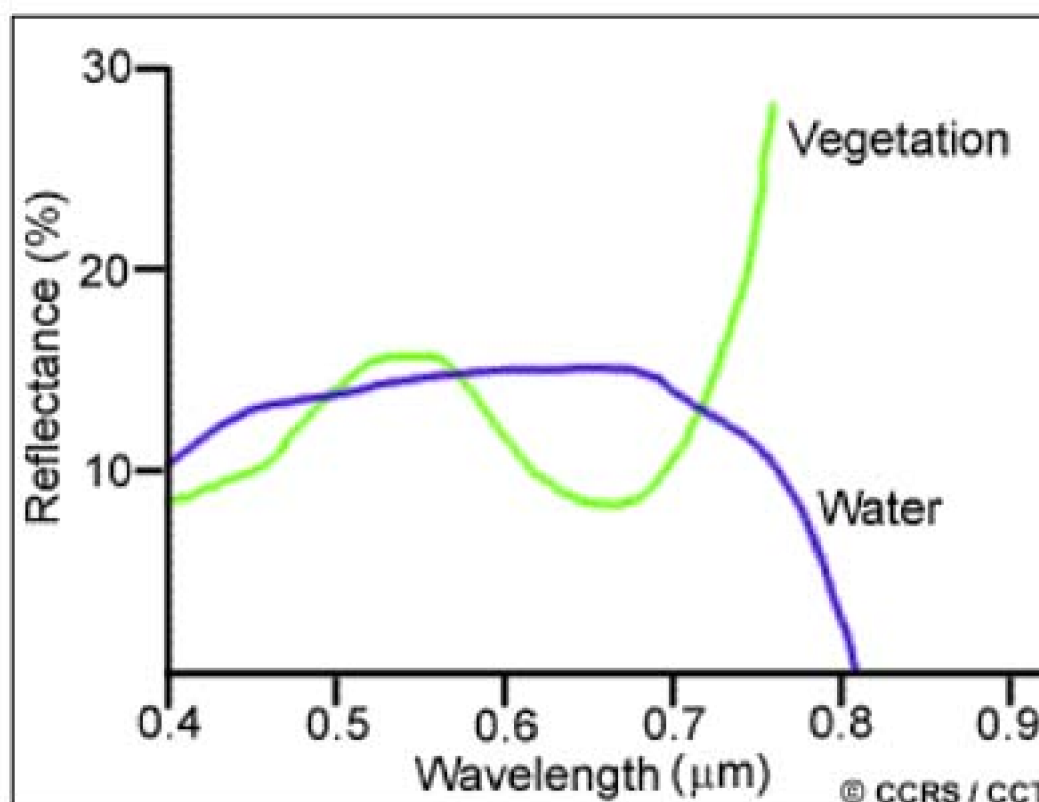


Figura N°9: Firma Espectral del Agua y la Vegetación

### 2.1.3.3. Comportamiento del Suelo

Las propiedades espectrales del suelo son relativamente simples, la transmisión de energía es nula, por tanto toda la energía es absorbida o reflejada. La reflectividad es relativamente baja para todas las longitudes de onda del visible, aumentando hacia el infrarrojo. Hay una cierta dependencia entre reflectividad y contenido en agua del suelo, cuanto mayor es el segundo, mayor es la primera. Este aumento se ve interrumpido en aquellas regiones en las que el agua absorbe energía, por tanto cuanto mayor sea el contenido de agua en el suelo, mayor va a ser la disminución en reflectividad de estas regiones.

Otros factores que afectan la respuesta espectral del suelo son la textura con una mayor reflectividad al aumentar el tamaño medio de las partículas de suelo (los suelos arenosos tienen mayor reflectividad que los arcillosos). Los minerales de la arcilla tienen, por su parte, una caída en reflectividad entorno a 2.2μ que no tienen las arenas.

El contenido en materia orgánica también afecta a la reflectividad, cuanto mayor sea su contenido y cuanto menos descompuesta se encuentre más oscuro resulta el suelo (menor reflectividad). La composición química y mineralógica también va a influir en la respuesta espectral, así por ejemplo el contenido en óxidos de hierro va a incrementar la reflectividad en el rojo.

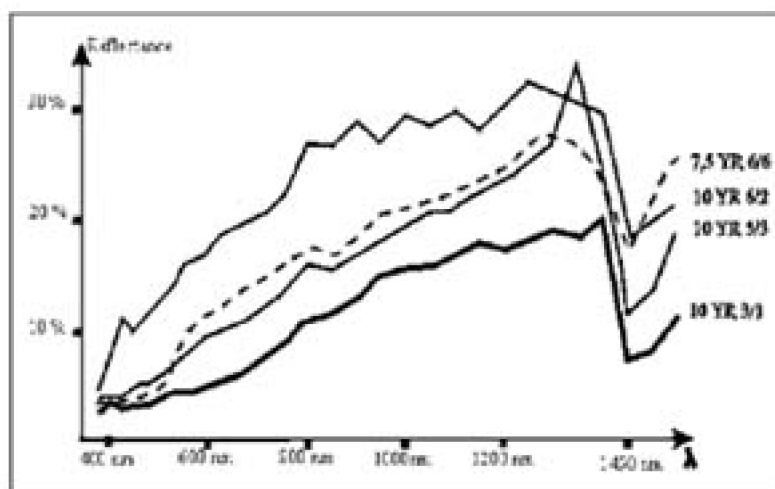


*Figura N°10: Diferentes Firmas Espectrales para Distintos Colores de Suelos*

En la figura N°10, vemos un gráfico de firmas espectrales para distintos colores de suelos, estos colores son tomados de la tabla de Munsell, como vemos los diferentes tipos de suelos se caracterizan por un incremento en la reflectividad desde el visible hacia el infrarrojo cercano y teniendo bajos valores en el infrarrojo medio.

La fuerte correlación entre muchos de los factores que influyen sobre la respuesta espectral del suelo, imposibilita el que puedan sacarse conclusiones claras del análisis de una imagen de unas zonas cuyas características edáficas se desconocen. En todo caso se ha comprobado que las áreas de suelo desnudo de una misma imagen siguen una serie de pautas reconocibles. La más estudiada es que si se hace una representación gráfica con la reflectividad en el rojo en abscisas y la reflectividad en el infrarrojo cercano en ordenadas, (Ver figura N°11), las zonas de suelo desnudo aparecen formando una línea que se conoce como línea del suelo.

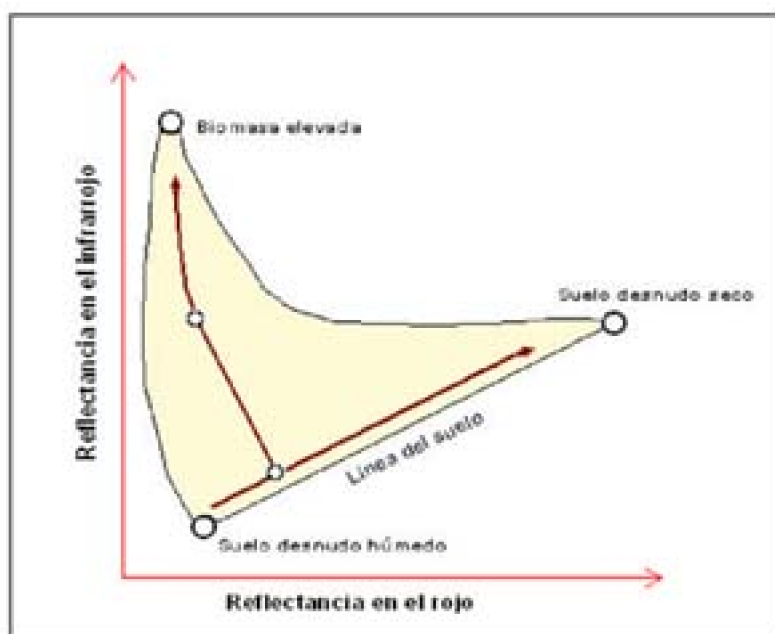


*Figura N°11: Grafico de la línea del suelo*

## 2.2. LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

### 2.2.1. DEFINICIÓN DE SIG

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es un sistema asistido por computadora para la adquisición, almacenamiento, análisis y despliegue de información geográfica. Hoy en día, una gran variedad de software y herramientas están disponibles para poder llevar a cabo esta actividad. Sin embargo estos pueden diferir significativamente uno del otro, en parte debido a la manera en que ellos representan y trabajan la información geográfica, así como al relativo énfasis que ellos ponen en varias de estas operaciones.



*Figura N°12: Componentes de un SIG*

En la figura N°12, se ven los componentes de un Sistema de Información Geográfica. Un SIG tiene como elementos bases para su desarrollo a las personas encargadas de diseñarlo y manejarlo, a la información, la cual estará almacenada en un computador

(Hardware), y será consultada y analizada por medio de un software, dentro del cual se podrán realizar tarea y análisis diversos según los objetivos que se pretenden conseguir por medio del SIG. La adecuada interrelación entre todas las partes que lo conforman llevará al buen funcionamiento de éste.

### 2.2.2. MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN

---

Un modelo digital de elevación es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno.

Un terreno real puede describirse de forma genérica como una función bivariable continua  $z = f(x,y)$  donde  $z$  representa la altitud del terreno en el punto de coordenadas  $(x,y)$  y " $f$ " es una función que relaciona la variable con su localización geográfica.

En la practica, la función no es continua sino que se resuelve a intervalos discretos, por lo que el MDE esta compuesto por un conjunto finito y explicito de elementos. Los valores de  $x$  e  $y$  suelen corresponder con las abscisas y ordenadas de un sistema de coordenadas plano, habitualmente un sistema de proyección cartográfica.

La generalización inherente a la discretización del modelo implica una perdida de información que incrementa el error del MDE y, en consecuencia, se propaga a los modelos derivados. Por este motivo, se han ensayado numerosas opciones en la búsqueda de una forma de representar y almacenar la altitud que equilibre la perdida de información y algunos efectos secundarios indeseables como el excesivo tamaño de los archivos o la dificultad de manejo.

Un MDE se puede representar principalmente, mediante dos modelos de datos: la matriz de alturas (organización raster) y la estructura TIN (red de triángulos irregulares). Ambos están basados en el empleo de puntos para la representación de la información que constituye el Modelo Digital de Elevación. En los dos casos el modelo se genera a partir de una muestra de datos puntuales repartidos de algún modo, en muchas ocasiones aleatoriamente sobre el plano. Otra posibilidad diferente es recoger una muestra de las altitudes reales empleando las curvas de nivel existentes en un mapa fuente y a partir de estas obtener el Modelo Digital de Elevación.

Debido a que una de las aplicaciones más extendidas de los MDE es la visualización tridimensional del relieve (ver figura N°13), los modelos TIN (red irregular de triángulos) han sido ampliamente utilizados. Sin embargo cuando el objetivo es el análisis de la superficie terrestre es preferible la utilización del modelo raster.

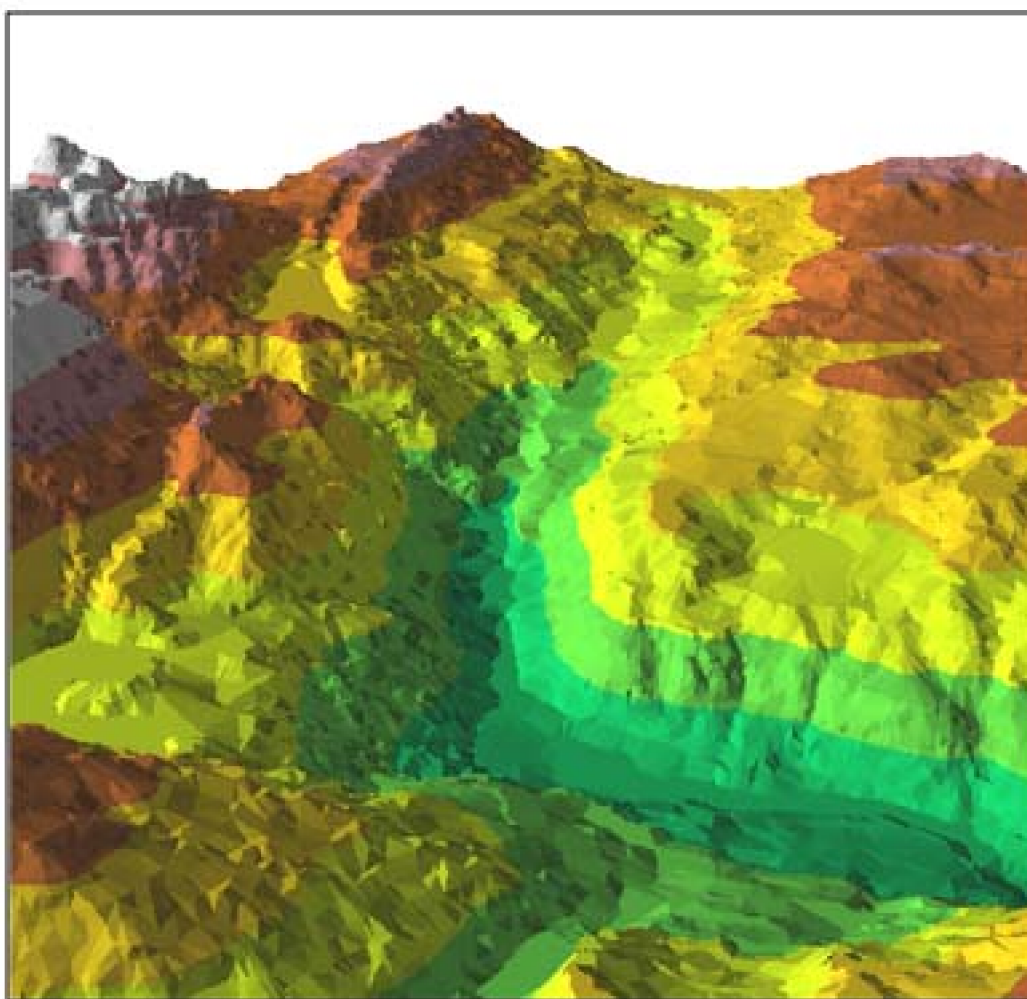


*Figura N°13: Vista en Perspectiva de un MDE*

#### **Criterios de selección de la estructura del MDE.**

La elección del tipo de estructura tiene importantes implicaciones debido a que las formas de tratamiento numérico pueden ser muy diferentes. Algunos autores han hecho notar que las diferencias teóricas son reducidas si la resolución es similar ya que se trata en todos los casos de una distribución de puntos acotados. Sin embargo, esto es fijar la atención sólo en los elementos primarios del modelo cuando la diferencia fundamental estriba, en la forma de estructurar los datos, en la complejidad de la referenciación interna o topología de los objetos representados y en los procesos de tratamiento que estas circunstancias permiten o exigen. Las alternativas prácticas en este momento (por su uso masivo) se reducen básicamente a dos: matrices regulares y TIN. El modelo de contornos presenta serias dificultades de tratamiento directo; la consecuencia ha sido que, en el caso de los MDE, puede considerarse en la práctica como una estructura aceptable para la captación de información, pero no funcional para el tratamiento de los datos topográficos. Las ventajas relativas de unas estructuras frente a otras han sido tratadas repetidamente en la literatura. Las conclusiones son claras en algunos aspectos puntuales y dependen estrechamente de aspectos prácticos más que teóricos. Dolton y Dueker (1986) analizan el uso de estos modelos en microordenadores y sus

conclusiones, aunque más bien aplicadas a los procesos propios de los SIG, son bastante orientadoras: los modelos matriciales tienen a su favor facilitar las labores de análisis (cálculo) pero son poco flexibles debido a lo rígido de su estructura; recíprocamente, los modelos vectoriales facilitan las tareas de inventario pero presentan dificultades para realizar procesos de análisis debido a la complejidad de su manejo.

Carter (1988) concluye que la alternativa matricial ofrece una representación adecuada de la forma general de la superficie en áreas de fuerte relieve pero da peores resultados en la definición de detalles en áreas de relieve suave. La representación vectorial de contornos y la de redes irregulares de triángulos tienen a su favor la posibilidad de aumentar el grado de detalle en zonas concretas donde las pequeñas variaciones del relieve pueden no ser detectables con una estructura matricial (obviamente, esta dificultad podría eliminarse mediante el uso, aún reducido en la práctica, de estructuras matriciales escalables).

En general, la descripción vectorial es más adecuada para variables discretas, que por su naturaleza están limitadas por fronteras lineales claras, mientras que las descripciones raster se adaptan mejor para la representación espacial de variables continuas, para las que no se pueden definir bordes de una forma neta, así como para otras con una naturaleza estadística o probabilística (Berry, 1988).

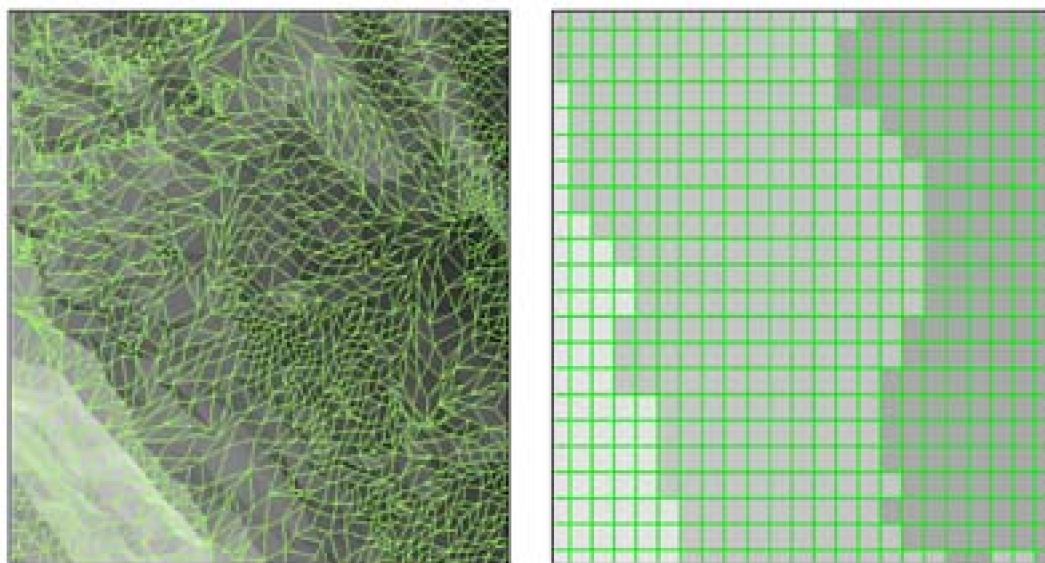


*Figura N°14: Estructura TIN y Estructura Matricial*

En la figura N°14, vemos la diferencia en la forma y disposición de acuerdo al terreno de dos de las estructuras más comunes para la generación de MDT, como lo son la red irregular de triángulos (TIN) y la estructura raster (modelo matricial).

A continuación se presenta el cuadro N°1, que describe las ventajas y desventajas más significativas en la construcción de un modelo digital de elevación, empleando una estructura del tipo TIN o una estructura matricial (raster).

#### **Cuadro N° 1: TIN vs. Grid**

|                    | <b>TIN</b>                                                                | <b>GRID</b>                                                                                         |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>VENTAJAS</b>    | Capacidad para describir superficies en diferentes niveles de resolución. | Fácil almacenamiento y manipulación de los datos.                                                   |
|                    | Eficiencia en el almacenamiento de los datos.                             | Fácil integración con bases de datos raster.                                                        |
| <b>DESVENTAJAS</b> | En muchos casos requiere inspección visual y un control manual de la red. | Inhabilidad para usar diferentes tamaños de celdas para representar áreas de diferente complejidad. |

### **2.2.2.1. Métodos de Interpolación**

La construcción de un MDE entendido como una matriz regular a partir de información vectorial es básicamente un problema de interpolación y los algoritmos de interpolación empleados para este tipo de estructura de datos difieren significativamente si el formato de salida sería un TIN (red de triángulos irregulares). Los algoritmos de interpolación deben tener en cuenta, asimismo, las diversas estructuras auxiliares para introducir variantes en los mecanismos de cálculo.

El planteamiento global del problema podría ser, como sigue: dado un conjunto de puntos con coordenadas (x,y,z), distribuidos irregularmente, generar un nuevo conjunto de puntos localizados en los nodos de una red regular de forma que la superficie interpolada sea una representación de la original con una pérdida mínima de información.

En el caso de la creación de una estructura TIN, en lugar de interpolar, se realiza una selección de puntos descartando los que no aportan una información relevante para la descripción de la altitud.

Sin embargo, en un modelo vectorial como el que forma el mapa topográfico digitalizado, acceder directamente a un dato por su posición espacial no es sencillo. Por este motivo, la localización de los datos incluidos en el entorno del punto problema es una operación clave, que debe ser bien diseñada dado el enorme número de datos que suele componer el mapa original. Las estrategias de búsqueda es más un problema informático que uno geográfico. A continuación veremos los principales métodos de busque para la generación de un DEM.

#### **Interpolación en función de la distancia**

Es un método de interpolación conocido por sus siglas en ingles de IDW (Inverse distance weighted), este método determina los valores de las celdas mediante una interpolación lineal asignando pesos en base a la distancia (el peso es una función inversa de la distancia) entre el punto problema y los puntos que participan dentro del proceso de interpolación.

El IDW permite controlar la influencia de los puntos conocidos sobre los puntos que serán determinados, basándose en la distancia al punto de salida. La interpolación puede ser cambiada según el valor del peso de local a global. Un valor alto en el peso dará una menor influencia de los puntos cercanos, por ejemplo, los puntos más cercanos tendrán más influencia en la interpolación y la superficie tendrá mayor detalle o sea será menos

suavizada. El valor de peso generalmente es un valor real positivo generalmente para empezar un valor de 2.

Las características de la superficie interpolada también pueden ser controladas limitando la cantidad de puntos de entrada para el cálculo de cada punto de salida. Esto puede hacerse estableciendo el número de puntos que entraran en el cálculo o mediante el uso de un radio de búsqueda, dentro del cual todos los puntos incluidos en este serán tomados en cuenta en la interpolación.

El valor de salida dentro de una celda interpolada usando IDW es limitado al rango de valores usados. Debido a que el IDW usa una distancia media pesada, la media no puede ser mayor que el más alto o menor que el más bajo punto de entrada. Por lo tanto, este no puede crear líneas de cumbres o valles si es que estos valores extremos no han sido muestreados (Watson y Philip, 1985).

Los mejores resultados del IDW son obtenidos cuando la muestra es lo suficientemente densa con respecto a las variaciones locales que se están intentando simular. Si el muestreo es muy disparejo o esparcido, los resultados podrían ser los no deseados en la superficie final (Watson y Philip, 1985). También es posible especificar "Líneas de barreras" este argumento es usado para especificar la localización de elementos lineales conocidos que van a interrumpir la continuidad de la superficie. Estos elementos no tienen un valor de elevación, acantilados, fallas, o malecones son un ejemplo de barreras. Las barreras limitan el conjunto de puntos de entrada usados para interpolar el valor de la celda de salida usando solo aquellos puntos que estén a los lados de la barrera. Cuando se especifican líneas de barreras el tiempo de procesamiento puede aumentar significativamente.

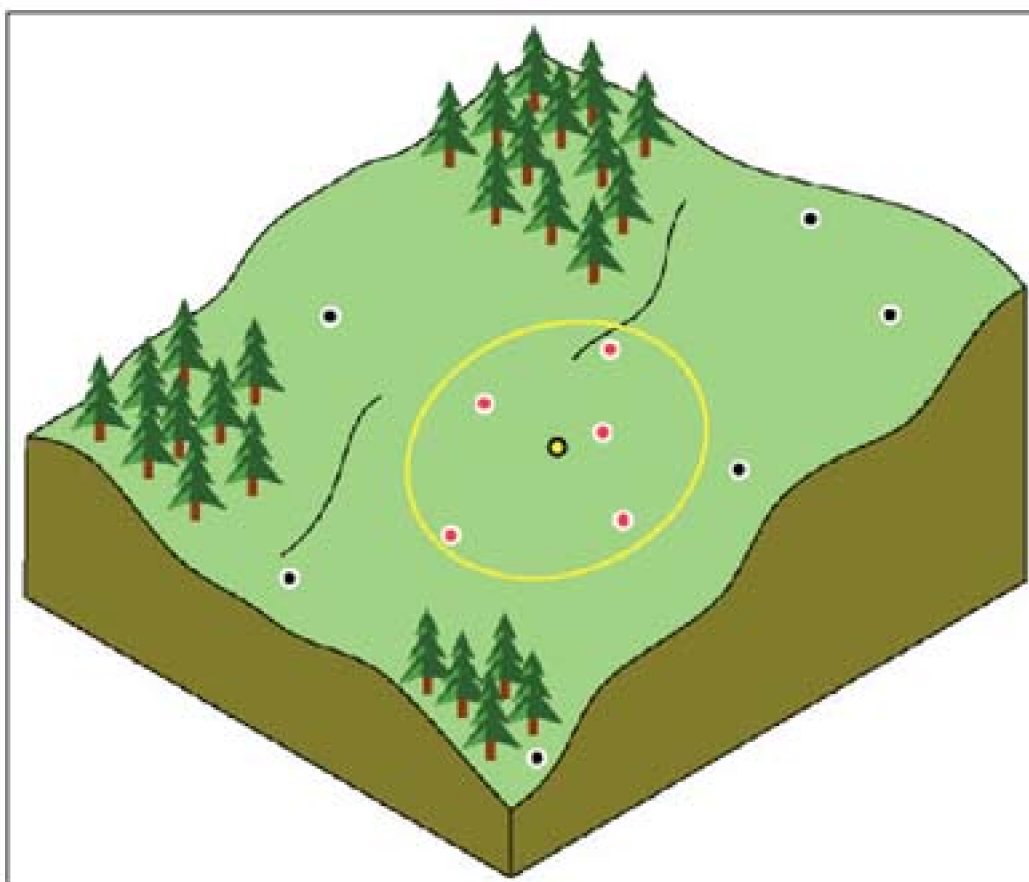


*Figura N°15: Interpolación en Base a la Distancia*

La interpolación en base a la distancia (IDW), establece un radio de búsqueda desde el punto dato y en función a la distancia asigna un peso correspondiente a los puntos problemas, es decir a mayor distancia un menor peso será dado a los puntos mas distantes, de esta manera se obtendrán las demás cotas del terreno.

#### **La Variable Regionalizada (Kriging).**

El kriging es un método de interpolación que se diferencia básicamente de los anteriores en que se asume que la altitud puede describirse como una variable regionalizada. Esta hipótesis supone que la variación espacial de la variable a representar puede ser explicada al menos parcialmente mediante funciones de correlación espacial: la variación espacial de los valores de  $z$  pueden deducirse de los valores circundantes de acuerdo con unas funciones homogéneas en toda el área. Con este método, las funciones pueden deducirse analizando la correlación espacial entre los datos en función de la distancia entre ellos. En efecto, en el caso de los MDE, es razonable suponer que el valor de la altitud en un punto está relacionado de alguna manera con el valor de los puntos vecinos, distribuidos a distancias variables. Puede suponerse, asimismo que la "Influencia" de los puntos más lejanos es menor que la de los más próximos. El Kriging estima esta dependencia mediante una estadística que es la semivarianza entre datos separados por distancias diferentes.

La semivarianza adquiere valores diferentes en función de la distancia entre los

datos (a más separación, menos correlación entre los valores de altitud). La función que relaciona la semivarianza  $\gamma$  con la distancia  $h$  se denomina semivariograma (ver figura N°16), y muestra, por tanto, la variación de la correlación entre los datos en función de la distancia.

El Kriging permite obtener dos valores de interés. En primer lugar, el semivariograma, que permite conocer el valor de la distancia  $h$  para la cual los datos pueden considerarse ya independientes entre sí. Este valor de distancia pone un límite superior al área del entorno alrededor del punto problema, ya que la inclusión de puntos situados a distancias mayores no aportaría información de interés. El otro parámetro estimado es el valor del error esperado para cada punto, que es función de los valores de semivarianza observados para los datos y que puede ser calculado sin dificultad.

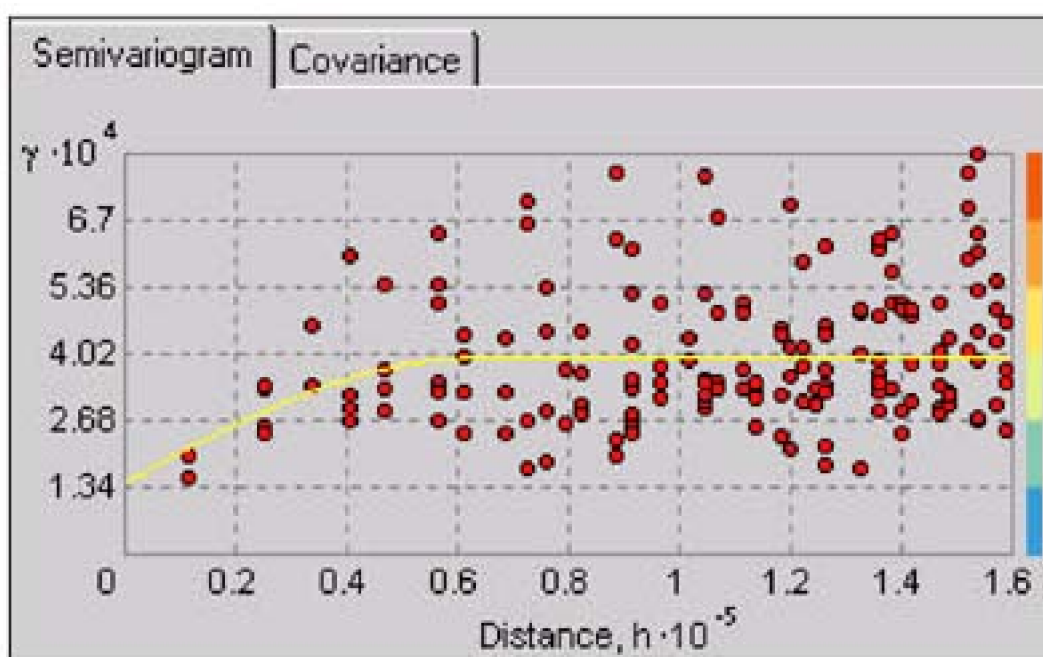


*Figura N°16: Semivariograma*

En la figura N°16, se muestra el ejemplo de un semivariograma, en donde la varianza real se ajusta a una distribución teórica, a partir del valor 0.6 de  $h$  la distancia se vuelve carente de interés al momento de la interpolación.

Aunque el Kriging es un método de estimación óptimo desde el punto de vista estadístico, presenta algunas dificultades a la hora de ser utilizado como método de construcción de los MDE. Lo más importante es que la teoría exige que el semivariograma sea de validez general para toda el área del MDE; esto quiere decir que la interdependencia entre los datos debe ser función exclusivamente de la distancia entre ellos -de su posición relativa- y no de su localización espacial absoluta. Los patrones de variación de  $z$  deben ser, por tanto, homogéneos. Esta condición no suele cumplirse y, además, no permite el tratamiento de discontinuidades topográficas que supongan cambios bruscos, como rupturas de pendiente.

Las variables en las que está indicado el uso del Kriging son aquellas cuya

distribución tiene una fuerte componente aleatoria o que son resultados de un conjunto de procesos sometidos a la interacción de múltiples variables concurrentes. Por ejemplo, en la distribución de un contaminante atmosférico influyen complejas causas meteorológicas a muy diferentes escalas y sometidas a fenómenos de turbulencia. A pesar de que la modelización de estos procesos puede ser muy compleja, los valores puntuales pueden ser descritos satisfactoriamente mediante el Kriging.

#### **La Red de Triángulos Irregulares (TIN).**

Los TINs representan una superficie como un conjunto de puntos localizados irregularmente y formando parte de una red de triángulo en cuyos vértices (nodos) están almacenados los valores de z, conectados por los lados del triángulo para formar caras triangulares contiguas pero sin que exista superposición entre estas. Los lados de los TINs pueden ser usados para capturar la posición de elementos lineales que jueguen un papel importante en generación de la superficie tales como cursos de aguas o líneas de cumbre.

Debido a que los nodos pueden ser ubicados irregularmente sobre la superficie, los TINs pueden tener una alta resolución en áreas donde la superficie es altamente variable o donde más detalle es deseado y una baja resolución en áreas donde la altitud es menos variable o es de bajo interés.

La información de entrada para la construcción de un TIN permanece en la misma posición, tales como los nodos y lados del TIN. Esto le permite al TIN preservar toda la precisión de la data de entrada mientras simultáneamente modela los valores entre los puntos conocidos. Se puede incluir a la vez características adicionales que mejoren el resultado de la superficie como picos, vías, ríos, etc., conocidas como líneas de quiebre o Breaklines.

Los modelos TIN son menos disponibles que las superficies raster y tiende a ser más costosos en su construcción y proceso. El costo de obtener una buena fuente de datos puede ser muy alto, y el procesamiento de los TINs tiende a ser menos eficientes que el procesamiento de la información raster debido a su compleja estructura de datos. Los TINs son típicamente usados para modelamientos de alta precisión de pequeñas áreas, tales como aplicaciones de ingeniería, donde son muy útiles debido a que permiten el cálculo del área planimétrica, área de superficie y volumen.

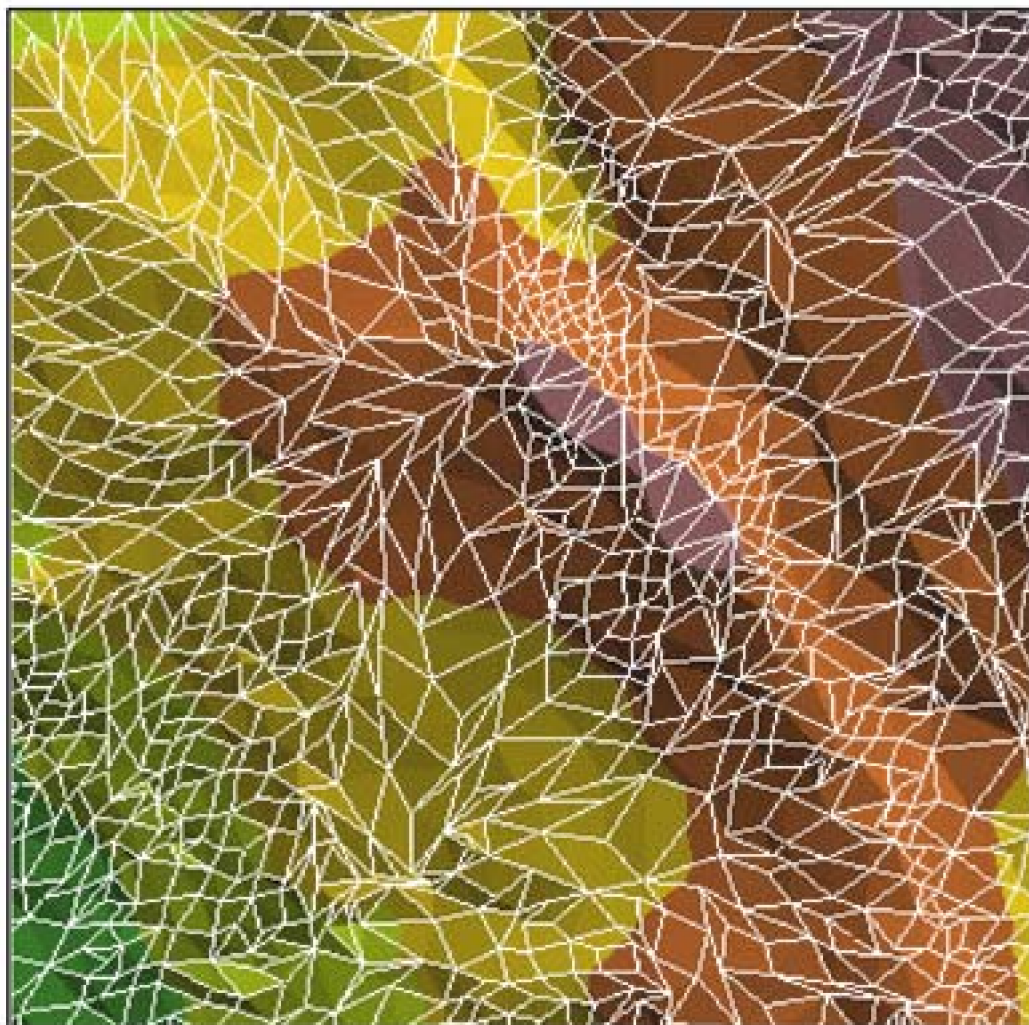


*Figura N°17: Modelo TIN*

La figura N°17, muestra un ejemplo de un modelo digital del terreno creado con el método de la red irregular de triángulos (TIN), se aprecia claramente la red de triángulos que viene a ser la estructura base para el cálculo de las elevaciones.

#### **2.2.2.2. Modelo de Pendiente**

La pendiente se expresa como el cambio en elevación sobre la distancia, y en un punto del terreno se define como el ángulo existente entre el vector normal a la superficie en ese punto y la vertical, usualmente es expresada como un porcentaje pero también puede ser calculada en grados. Su estimación es sencilla a partir del MDE y se basa en el cálculo de la pendiente de un plano de ajuste en cada punto o celda del modelo esto para un modelo raster.

Conceptualmente consiste en ajustar a un plano los valores de  $z$  en ventanas de  $3 \times 3$  calculando el valor de la pendiente para la celda central de esta manera se prosigue para todo el modelo, esto se puede entender también como un tipo de filtrado sobre el DEM raster.

Existen diferentes manera de proceder a su cálculo a continuación mostramos como ejemplo el procedimiento utilizado dentro del programa Arcview de ESRI y su modulo de análisis espacial denominado SpatialAnalyst:

$$\text{Pendiente} = \text{ATAN}(\text{rise\_run}) * 57.29578 \dots \dots \dots (1)$$

$$\text{rise\_run} = \text{SQRT}(\text{SQR}(\text{dz/dx}) + \text{SQR}(\text{dz/dy})) \dots \dots (2)$$

Donde los valores de los deltas dz/dx y dz/dy representa el vector gradiente en dicha superficie para "X" e "Y" y son calculados usando una ventana movable de 3x3 sobre el DEM de origen. (Ver figura N°18)

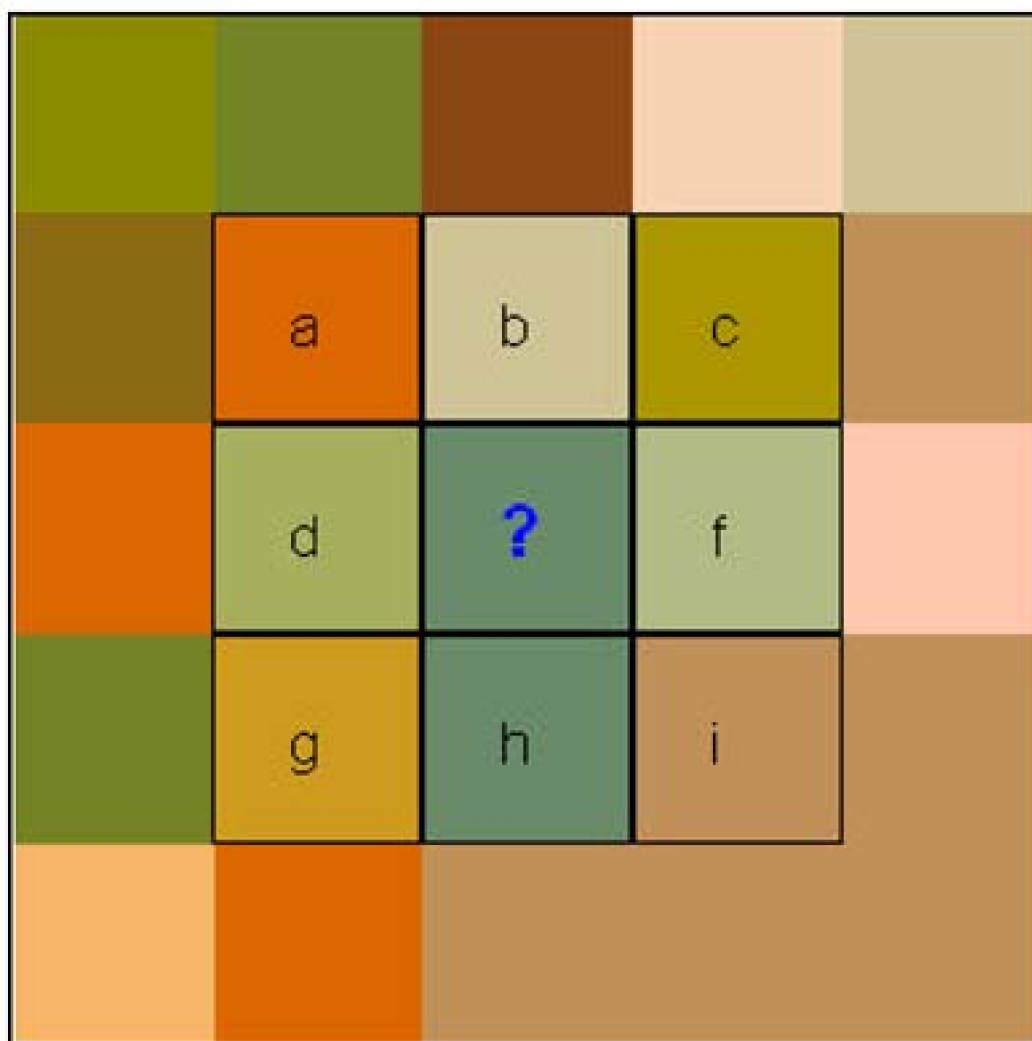


*Figura N°18: Calculo raster de la Pendiente*

La figura N°18 Viene a ser la ventana movable para el cálculo de los valores del gradiente en un modelo de elevación raster, de donde se extrae:

$$(\text{dz/dx}) = ((a + 2d + g) - (c + 2f + i)) / (8 * \text{x\_mesh\_spacing}) \dots \dots (3)$$

$$(\text{dz/dy}) = ((a + 2b + c) - (g + 2h + i)) / (8 * \text{y\_mesh\_spacing}) \dots \dots (4)$$

Una vez calculado los valores del gradiente (formula 3 y 4) se reemplaza en la

formula 2 y finalmente en la formula 1 obteniéndose el modelo raster de pendiente.

### 2.2.2.3. Modelo de Orientación

La orientación en un punto puede definirse como el ángulo existente entre el vector que señala el Norte y la proyección sobre el plano horizontal del vector normal a la superficie en ese punto. Como en el caso de la pendiente, el valor de orientación se estima directamente a partir de los valores del gradiente del MDE.

Su estimación es sencilla a partir del MDE para el caso de un MDE raster se procede:

$$\text{Orientación} = \text{ATAN}(\text{rise\_run}) * 57.29578 \dots (5)$$

$$\text{rise\_run} = ((dz/dx) / (dz/dy)) \dots (6)$$

Donde los deltas  $dz/dx$  y  $dz/dy$  son calculados de la misma manera que para la pendiente (ver figura N°18, es decir usando una ventana movable de 3x3 sobre el DEM de origen).

Con los valores del gradiente calculado se procede a reemplazar en la formula 6 y finalmente en la formula 5, obteniéndose el modelo raster de orientaciones.

Además hay que tener en cuenta algunas consideraciones en el valor de la orientación si  $dz/dx$  y  $dz/dy$  son iguales a cero, entonces el aspecto se codificara por convención en 361 o -1, que significara la existencia de un área plana además el algoritmo debe de considerar algunos casos especiales que se presentan con el valor de la tangente, el aspecto esta expresado en grados a partir del norte, en dirección horaria, de 0 a 360 grados. El norte es 0 grados. Un valor de 90 grados es este, 180 grados es sur y 270 grados es oeste, cualquiera valor fuera de este rango como 361 o -1 como ya se mencionó son utilizados por algunos algoritmos para asignar superficies planas como cuerpos de agua.

### 2.2.2.4. Modelo de Iluminación

Es una manera de determinar la hipotética iluminación de una superficie. Se parte igualmente de un DEM, la distancia de la fuente de iluminación a la superficie es considerada infinita, existen algoritmos que toman en cuenta para el calculo de este tipo de modelos los efectos de ocultamiento y auto-ocultamiento topográfico estos son los modelos mas realistas que se pueden construir. Las celdas en sombra son asignadas con el valor cero dentro del modelo, a la vez estos modelos tienen un variado uso desde dar el efecto de tres dimensiones a un tema raster que se superponga, hasta la generación de modelos mas complejos combinándolo con otras variables de interés.

Este tipo de modelo será tratado con mayor profundidad en los capítulos siguientes ya que precisamente éste es el principal modelo que va a permitir efectuar la corrección de iluminación en las imágenes de satélite y siendo el objetivo central de la investigación.

## 2.3. SIMULACIÓN DE PROCESOS EN UN SIG

### 2.3.1. MODELOS DE ILUMINACIÓN SIMPLES

---

Los modelos de iluminación simples son aquellos conocidos por su carácter didáctico y utilizados principalmente al momento de visualizar el relieve de un determinado modelos de elevación digital , lo cual ayuda enormemente a la interpretación de éste, la opción más sencilla parte de simular una fuente de iluminación (el sol en este caso), ubicada en el infinito y mediante los valores de azimuth y elevación solar para una determinado momento del día es posible conseguir este objetivo, si la fuente de iluminación se define de manera certera y el modelo analizado en nuestro caso un modelo de elevación digital raster tiene una adecuada resolución, los resultados pueden ser lo bastante convincente, los sistemas de información geográfica mediante sus múltiples funciones de análisis han logrado mediante diversos algoritmos simular la apariencia de una superficie cuando es iluminada por una fuente de luz y hacer de la construcción de este tipo de modelos un proceso generalmente rápido y sin demasiadas complicaciones, claro según el resultado esperado y el tipo de trabajo para el cual se requiere el modelo.

Los factores a considerar para la construcción de un modelo de iluminación simple son los siguientes:

Iluminación emitida por la fuente de energía: iluminación directa, que varía según la latitud del lugar la hora y la época del año.

Punto de vista del observador: normalmente cenital cuando hablamos de dos dimensiones y con otros ángulos cuando hablamos de modelos en perspectiva.

Comportamiento de la superficie ante el flujo de iluminación: se considerará un comportamiento lambertiano o perfectamente difusor.

Existen diferentes programas en el mercado los cuales permiten realizar este tipo de modelos partiendo de los conceptos mencionados anteriormente, entre ellos el ArcGis, ArcView con sus módulos 3D y Spatial Analyst, Erdas Imagine, en fin una gama amplia, en donde la elección dependerá mas bien por el tipo de procedimientos y algoritmos empleados para su construcción y la facilidad para la programación de modelos más complejos.

### 2.3.2. MODELOS DE ILUMINACIÓN COMPLEJOS

---

Cuando se busca una representación más realista de la iluminación de la superficie con el objetivo de relacionarla con otras variables como es el caso de las imágenes de satélite, se hace necesario entonces construir modelos que tomen en cuenta otros factores que influyen en la iluminación.

Para la construcción de estos modelos de iluminación más complejos tenemos que considerar los siguientes aspectos:

Iluminación emitida por la fuente de energía: iluminación directa, que varía según la latitud del lugar, la hora y la época del año; además la iluminación difusa que depende del ángulo de incidencia solar, la altitud y la dispersión y absorción atmosférica; y finalmente la iluminación reflejada que es causada por el terreno circundante, dependiendo de la topografía y el albedo de cada superficie.

Punto de vista del observador: normalmente cenital  $90^\circ$  cuando hablamos de dos dimensiones y con otros ángulos cuando hablamos de modelos en perspectiva  $45^\circ$ ,  $30^\circ$ .

Comportamiento de la superficie ante el flujo de iluminación: se debe tener en cuenta el comportamiento de la superficie que puede variar desde superficies Lambertianas o perfectamente difusoras hasta superficies especulares.

En lo que respecta a la fuente de iluminación se suele considerar la iluminación directa y si se cuenta con información meteorológica de radiación solar para la fecha de toma de la imagen de satélite se puede modelar también una fuente de iluminación hemisférica que simule la radiación difusa, si esto es así se debe ponderar adecuadamente la cantidad de radiación directa y difusa dentro del modelo. Por ejemplo, en los lugares en sombra a los cuales no les llega la radiación directa proveniente del sol, la iluminación que llegue será producto de la iluminación difusa y reflejada.

El punto de vista del observador se mantendrá en una posición cenital a no ser que se desee tener una vista en perspectiva.

En cuanto al comportamiento de la superficie ante la incidencia del vector solar podemos mencionar lo siguiente: podemos considerar un comportamiento perfectamente difusor, es decir, que la iluminación de dicha superficie no varía con el ángulo de incidencia del observador; irradia a todos lados la misma cantidad de energía proveniente de la fuente de luz, el caso opuesto sería una superficie de comportamiento especular donde la luz reflejada lo hace en único ángulo de salida igual al ángulo de incidencia, este comportamiento lo muestran superficies en estado de reposo como los cuerpos de agua, pero en la naturaleza la realidad es más compleja, la mayoría de las superficies terrestres tienen un comportamiento intermedio es decir entre especular y perfectamente difusor por lo que se hace necesario calcular un factor  $K$  propuesto tempranamente en un trabajo por Minnaert, en donde  $K$  está en función entre otros factores de la longitud de onda y el tipo de superficie.

### **2.3.2.1. Trayectoria Solar**

Los parámetros que definen la trayectoria del sol constituyen datos externos imprescindibles para llevar a cabo la modelización de la radiación solar. En la creación de modelos de iluminación simples, tratado anteriormente, la localización de la fuente de luz direccional podía elegirse arbitrariamente, ya que sólo se trataba de construir una imagen realista del terreno iluminado. En el caso de la construcción de un modelo de iluminación complejo, la localización aparente del sol depende de una serie de parámetros de los cuales los más importantes son: latitud del punto problema, declinación solar (variable

según la época del año) y ángulo horario (dependiente de la hora del día), la localización del sol se suele dar en coordenadas esféricas: azimut ( $Z$ ) y altura sobre el horizonte ( $A$ ), cuyas expresiones de cálculo son las siguientes:

$$\text{Sen } A = (\text{sen } D \cos L) + (\cos D \text{ sen } L \cos H)$$

$$\text{Cos } Z = ((\cos L \text{ sen } D) - (\cos D \text{ sen } L \cos H)) / \cos A$$

Donde  $D$  representa la declinación solar,  $L$  la latitud geográfica del punto problema (positiva en el hemisferio Norte y negativa en el Sur) y  $H$  el ángulo horario.

La declinación solar para una determinada época del año puede determinarse a partir de tablas o, aproximadamente, mediante expresiones:

$$D = 23.5 \text{ sen}(0.986(284 + d))$$

Donde  $d$  es el ordinal del día del año, comenzando el 1 de enero. En este caso se asume que la expresión encerrada entre paréntesis, de la cual se calcula el seno, está expresada en grados sexagesimales. Refiriéndonos siempre al hemisferio Norte, el ángulo horario suele tomarse como cero en el mediodía, cuando el azimut solar es de  $180^\circ$  por tanto, el sol está situado al Sur. Los ángulos son negativos hacia el Este y positivos hacia el Oeste, con intervalos de  $15^\circ$  por hora.

### **2.3.2.2. Radiación Directa**

La radiación que incide sobre una superficie directamente del Sol, sin sufrir cambios de dirección, se conoce como radiación directa mientras que aquella que llega después de ser reflejada o incluso la radiación infrarroja emitida por las moléculas después de sufrir un calentamiento por efecto de absorción de radiación solar, se conoce como radiación difusa. (Ver figura N°19)

Tendremos, por lo tanto, que la radiación solar a ras de tierra estará formada por una componente directa, pues llega hasta nosotros sin sufrir desviaciones, y otra difusa, que se difunde por todo el hemisferio celeste, aparentando que es éste quien la irradia. La suma de estas dos componentes en un plano horizontal se denomina "reacción global". La componente difusa puede variar desde un 15% sobre el global en un día claro, a un 100% en un día nublado.

Si no existiese aire, evidentemente toda la radiación sería directa y si mirásemos el cielo, hacia un lugar diferente al ocupado por el Sol, nuestro ojo no recibiría radiación alguna (el cielo se observaría de color negro). Tampoco podríamos, por ejemplo, leer un libro con luz natural, a no ser que el propio libro estuviese expuesto directamente a la luz del Sol.

Las nubes difunden la radiación solar más fuertemente que el aire seco, por lo que en un día nublado toda la radiación que podemos obtener será radiación difusa. En un típico día despejado la radiación directa es varias veces superior a la difusa. De acuerdo a lo anterior, resulta evidente que la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra tendrá una distribución espectral distinta a la existente fuera de la atmósfera debido, no sólo a la absorción y reflexión, sino también a otros factores (altitud del lugar, zona geográfica, etc.) Así, la curva de la distribución espectral dentro de la atmósfera está

situada por debajo de la curva correspondiente a la radiación encima de la atmósfera. Además, si bien se produce una absorción de energía para todas las longitudes de onda, nos encontramos que para ciertas longitudes las pérdidas son mayores. Esto es debido a un fenómeno de absorción selectiva de estas longitudes de onda por algunos factores atmosféricos. Tenemos, por ejemplo, que las radiaciones de muy pequeña longitud de onda son absorbidas por el ozono mientras que las radiaciones de la zona del infrarrojo son amortiguadas por la presencia en la atmósfera de vapor de agua, anhídrido carbónico y otras partículas atómicas.

### 2.3.2.3. Radiación Difusa

La radiación difusa es aquella recibida de la atmósfera como consecuencia de la dispersión de parte de la radiación del sol en la misma (ver figura N°19). Esta energía puede suponer aproximadamente un 15% de la radiación global en los días soleados, pero en los días nublados, en los cuales la radiación directa es muy baja, la radiación difusa supone un porcentaje mucho mayor. Por otra parte, las superficies horizontales son las que más radiación difusa reciben, ya que "ven" toda la semiesfera celeste, mientras que las superficies verticales reciben menos porque solo "ven" la mitad de la semiesfera celeste.



*Figura N°19: Interacción Radiación-Tierra*

En la figura N°19, podemos ver como se comporta la radiación solar al entrar en contacto con la atmósfera y la superficie terrestre.

#### 2.3.2.4. Superficies Perfectamente Difusoras

Una superficie perfectamente difusora es aquella que emite o refleja el flujo luminoso en forma tal que presenta el mismo brillo independientemente del ángulo de visión. Tal superficie se denomina Lambertiana porque responde a la ley de Lambert. Ninguna superficie es perfectamente difusora, pero muchas superficies, especialmente las opacas, se aproximan bastante. Como ejemplo de una superficie no Lambertiana podemos citar a un espejo, estando tal tipo de superficie en el extremo opuesto de una superficie Lambertiana, denominándose superficie especular.

Dada una única fuente de luz directa, la reflectancia o radiancia de una superficie Lambertiana viene expresada según (Horn y Sjöberg, 1979):

$$L = (E/\pi) \times \rho \times \cos i$$

De acuerdo con la notación anterior, la reflectancia  $L$  depende básicamente de tres factores:

- Irradiancia,  $E$ , medida en  $\text{Wxm}^{-2}$  y que representa el flujo incidente por unidad de área.
- Angulo de incidencia,  $i$ , del vector iluminación sobre la superficie.
- Albedo de la superficie,  $\rho$ , porcentaje de luz reflejada y complementario del coeficiente de absorción, con valores entre 0 (absorción total) y 1 (absorción nula).

La reflectancia o radiancia se mide en  $\text{W x m}^{-2} \times \text{sr}^{-1}$  y puede verse que es máxima cuando  $i = 90^\circ$ , es decir, cuando la superficie es perpendicular al vector solar, y cuando el albedo es la unidad.

Los valores de  $E$ ,  $\pi$  y  $\rho$  son constantes que pueden ser omitidas, ya que el valor de  $E$  puede ser relativo ya que no se pretende cuantificar éste, sino sólo obtener un factor de corrección. y  $\rho$  el albedo no se considera una variable influyente ya que se desea modelizar la reflectancia sin tener en cuenta el tipo de superficie, se supone una absorción nula  $\rho = 1$ .

Lo que si se necesita calcular es el valor del coseno del ángulo de incidencia y procede de la siguiente forma (ver figura N°20):

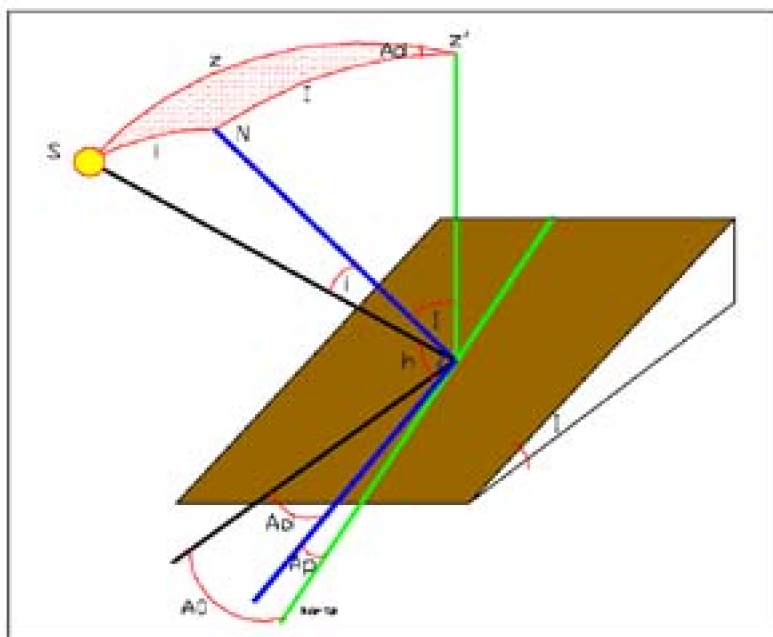


Figura N°20: Coseno del Ángulo de Iluminación

El ángulo  $i$  está en función de la distancia cenital  $z$ , azimut solar  $A_0$ , del azimut de una superficie inclinada  $A_p$  y de la inclinación de una superficie  $I$ . La diferencia entre el azimut del sol  $A_0$  y el azimut de una superficie inclinada  $A_p$  que contiene a la normal de la superficie que es llamada de  $A_d$  ( $A_d = A_0 - A_p$ ).

Las relaciones entre los varios ángulos pueden verse en la figura N°21:

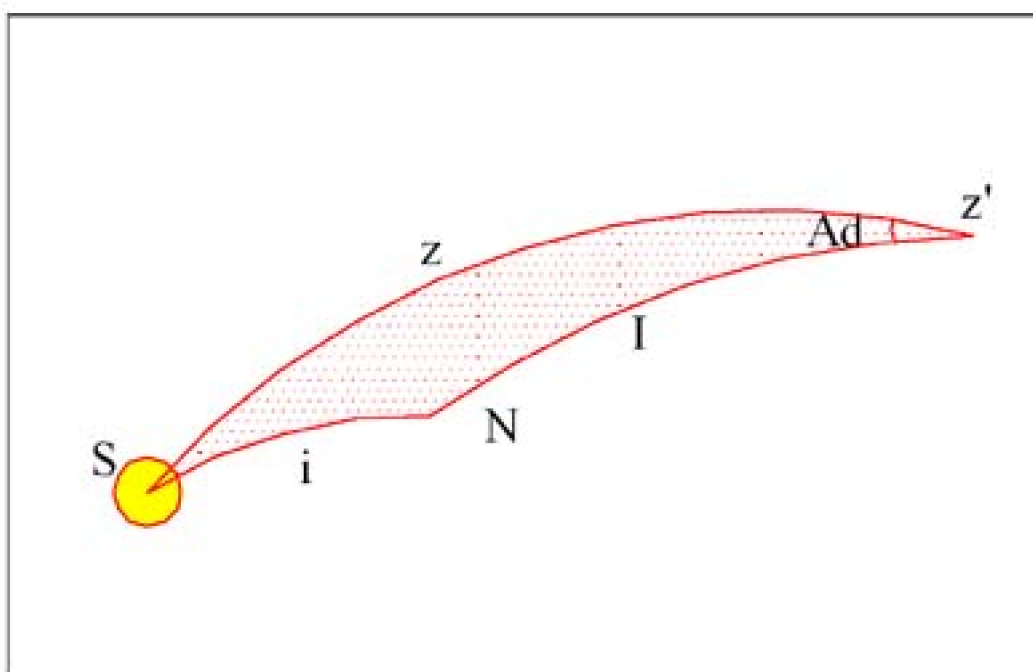


Figura N°21: Triangulo Esférico y Ángulos de Interés

Donde  $Z'$  es el cenit,  $Z$  es la distancia cenital,  $i$  es el ángulo entre el sol y la normal a

la superficie,  $i$  la inclinación de la superficie, y  $Ad$  es la diferencia entre  $A_p$  el azimut de la superficie inclinada y  $A_0$  el azimut del sol.

A partir del triángulo formado por el cenit, la normal y el sol, extraído de la Figura N°21, se obtiene:

$$\cos(i) = \sin Z \times \sin I \times \cos Ad + \cos Z \times \cos I$$

○:

$$\cos(i) = \cos \theta_s \times \sin \theta_n \times \cos(\phi_s - \phi_n) + \sin \theta_s \times \cos \theta_n$$

Donde:

$$\theta_s = \text{Elevacion Solar}$$

$$\theta_n = \text{Pendiente de la Superficie}$$

$$\phi_s = \text{Azimut Solar}$$

$$\phi_n = \text{Orientacion de la Superficie}$$

Este cálculo se puede realizar mediante filtrados en la imagen, o usando el álgebra de mapas para datos raster. El valor del coseno de  $i$  puede ser negativo, lo que indica una situación de auto-ocultamiento; en este caso, se toma el valor 0 y la reflectancia es nula.

El uso de una única fuente de luz directa produce imágenes interpretables pero con unos contrastes duros, para solucionar este problema y dar a la imagen una apariencia más real, es posible incorporar una fuente de luz hemisférica no direccional que simule la iluminación difusa. La reflectancia de una fuente de luz hemisférica se calcula por una expresión más simple que la anterior y depende sólo de la irradiancia de la fuente  $E$ , y de la pendiente del terreno  $\theta_n$ , (Horn y Sjöberg, 1979):

$$L = (E/2) \times (1 + \cos \theta_n)$$

Para la construcción del modelo de reflectancia, las componentes directas y difusas deben equilibrarse en función de las condiciones reales de iluminación para la fecha de toma de la imagen si se cuenta con ese dato. En el caso de días despejados, la componente directa dominara pero puede hacerse prácticamente nula cuando se simula la iluminación en días nublados.

### 2.3.2.5. Superficies de Minnaert

El terreno real no es una superficie perfectamente difusora. Por este motivo si se desea una representación mas exacta de la realidad, es necesario considerar las ecuaciones que describen la reflectancia en superficies de Minnaert, descritas hace más de medio siglo (Minnaert, 1961). La expresión de la reflectancia para una fuente de luz directa es:

$$L = (E(k+1)/2\pi) \times \rho \times \cos i \times \cos^{k-1} e$$

Donde para una vista cenital, el ángulo  $e$  es la pendiente del terreno. El factor  $K$  controla la difusividad y está físicamente limitado en el rango 0-1. Es fácil comprobar que si  $k$  es igual a 1 tenemos el caso lambertiano analizado antes.

El problema de la simulación de la iluminación mediante estos algoritmos aparte de su complejidad, es la necesidad de fijar un valor para el coeficiente  $k$ , algunas pruebas realizadas de forma empírica han demostrado que el valor de  $k$  en una misma zona varía en función de la longitud de onda.

### 2.3.2.6. Ocultamiento Topográfico

La existencia de zonas en sombra es una variable de gran interés en regiones montañosas, donde el relieve puede ser el factor determinante más importante del clima local.

El ocultamiento topográfico se produce por el relieve circundante, cuando la topografía interrumpe la línea visual del sol hasta el punto analizado. La detección de zonas en ocultamiento topográfico es un poco compleja ya que se produce cuando el entorno de un punto proyecta una sombra sobre él, para unas posiciones determinadas del sol.

### 2.3.2.7. Auto-Ocultamiento Topográfico

El que un punto esté en auto-ocultamiento, se produce cuando el vector normal a la superficie forma un ángulo superior a los 90° con el vector solar, como sería el caso, por ejemplo, de una ladera orientada al norte, con pendiente de 45° cuando el sol ilumina desde el sur, elevado solamente 30° sobre el horizonte. La existencia del auto-ocultamiento se deduce directamente del ángulo de incidencia.

## 2.4. CONEXIÓN ENTRE LA TELEDETECCIÓN Y LOS SIG

### 2.4.1. NECESIDADES DE LOS SIG

Como hemos descrito un sistema de información geográfica SIG se basa principalmente en la información que este pueda manejar ya que el término de geográfico es solo un calificativo para designar a este tipo de información, el SIG por sí solo no puede generar información así que éste dependerá de la información que se agregue de diversas fuentes entre ellas la teledetección. Esta información satelital puede servir para cartografiar diversas variables medio ambientales como la temperatura del agua del mar, contenido de clorofila, cobertura de nieve, rendimiento de cultivos, ocupación del suelo, etc. El resultado final ya sea una imagen o un mapa puede ser incluido dentro de un SIG,

algo que es importante es validar la información que se ingresa ya que esta será la base para el desarrollo de cualquier análisis por mas simple que sea, hasta el desarrollo de modelos complejo he allí que la fiabilidad de la información es de suma importancia para lograr resultados que vayan de acuerdo con la realidad.

## **2.4.2. APOYO DE LOS SIG A LA TELEDETECCIÓN**

---

En muchos casos se hace necesaria la información geográfica manejada por un SIG para realizar diversos procesos en la imágenes de satélite ya sea desde la fase de corrección (Pre-procesamiento) hasta la fase de clasificación digital más aun hoy en día con los avances en la clasificación y segmentación de imágenes como los modelos de clasificación orientados a objetos, los clasificadores en árbol, las redes neuronales que precisamente necesitan de la información manejada por un SIG y que es indispensable para realizar ciertos procedimientos como veremos a continuación.

Previamente a la clasificación, algunos campos de interés son la incorporación de un DEM en sectores de topografía accidentada, de cara a refinar la corrección geométrica y radiométrica de las imágenes, paliando la distorsión en ellas incluidas por el relieve: efecto de sombra y geometrías de adquisición, fundamentalmente; durante la etapa de clasificación los datos auxiliares pueden ser de gran ayuda, tanto en la correcta delimitación de los campos de entrenamiento (si se opta por la clasificación supervisada), como en el reconocimiento temático de grupos espectrales (cluster), en caso de emplear la clasificación no supervisada. Puesto que las áreas de entrenamiento sirven para definir estadísticamente a las clases que se intentan identificar, resulta clave delimitarla apropiadamente, ya sea a partir del trabajo de campo, ya de una cartografía temática de la zona, suficientemente fiable. Si se opta por la clasificación no supervisada, la información almacenada en un SIG puede facilitar la adscripción temática de los grupos espectrales definidos por el ordenador.

Las variables auxiliares pueden emplearse también como nuevas bandas para la clasificación, aportando una dimensión no-espectral para la discriminación de determinadas clases. (Franklin et al., 1986)

Después de la clasificación a los SIG les atañe como primera aportación la propia verificación de las clasificaciones. La información almacenada en estos sistemas permite diseñar los campos test, para construir la matriz de confusión, de cara a valorar cuantitativamente la precisión alcanzada en la clasificación.

Un último aspecto es la visualización de los resultados. La integración de la teledetección y los SIG, permite ampliar las posibilidades graficas de la cartografía convencional. Experiencias en esta línea son la realización de perspectivas tri-dimensionales, a partir de una imagen original o clasificada y de un modelo de elevación digital.

## **2.5. LA REDUCCIÓN DEL SOMBREADO**

---

## TOPOGRÁFICO

### 2.5.1. CORRECCIÓN DEL COSENO

En este método, se asume que la superficie tiene un comportamiento Lambertiano, es decir que es una superficie perfectamente difusora, por lo que refleja la misma cantidad de energía en todas las direcciones, debido a esto la corrección Lambertiana intenta corregir solo por diferencias en la iluminación causada por la orientación de la superficie.

Las ecuaciones usadas en el método del coseno son:

$$ND_C = \frac{ND_O}{\cos i} \quad , \quad ND_C = ND_O \times \frac{\cos ref}{\cos i}$$

Donde:

$ND_O$  y  $ND_C$  son los niveles digitales observado y corregido respectivamente,  $\cos i$  es el coseno del ángulo de incidencia solar y  $\cos ref$  es el coseno del ángulo de incidencia para una superficie horizontal.

Aunque la asunción de una superficie Lambertiana es simple y conveniente para efectuar la corrección topográfica, existen problemas en las imágenes corregidas por este método debido a que éstas tienden a ser sobre corregidas en la mayoría de veces, sobre todo en las áreas de fuerte pendiente que no están expuestas directamente hacia la luz solar ya que aparecen más iluminadas que las que dan propiamente al sol esto debido a la influencia de la radiación difusa, que es la que llega en las áreas en sombra (McDonald et al., 1999). Las áreas en que el coseno del ángulo de incidencia es muy pequeño tienden a ocasionar una desproporción en el brillo final de la imagen. Por tanto los métodos no-Lambertianos han sido desarrollados con la idea de modelar mejor la iluminación en una superficie.

### 2.5.2. CORRECCIÓN DE MINNAERT

Minnaert propuso en 1961 que las superficies observadas no reflejan la energía solar incidente uniformemente en todas las direcciones, si no más bien él formuló un modelo no lambertiano el cual supone la reflexión parcialmente dependiente del ángulo de visión, formado por el eje visual y la normal a la superficie. En este caso, las funciones de reflectancia adoptan formas diferentes, dependientes de los ángulos  $i$ ,  $e$  y de un coeficiente  $k$  cuyo valor está comprendido entre cero y la unidad (Woodham y Lee, 1985). La superficie lambertiana es un caso extremo, en el que  $k = 1$ .

La adopción de superficies de Minnaert trae consigo la necesidad de fijar un valor al parámetro  $k$ . Este parámetro se muestra en la práctica dependiente, no sólo del tipo de superficie, sino también de la longitud de onda de la luz y de las coordenadas del vector

solar (Woodham y Lee, 1985).

En el estudio de Smith et al. (1980), la constante de Minnaert, k, fue derivada por linealización de la ecuación siguiente:

$$ND_c = \frac{ND_o \times \cos e}{\cos^k i \times \cos^k e}$$

$$\log(ND_o \times \cos e) = \log ND_c + k \log(\cos i \times \cos e)$$

Donde:

$ND_o$  y  $ND_c$  son los niveles digitales observado y corregido respectivamente,  $\cos i$  y  $\cos e$  son respectivamente el coseno del ángulo de incidencia solar y el coseno de la pendiente también conocido como ángulo de exitancia.

El valor de k puede ser encontrado por regresión de un conjunto de valores de niveles digitales con valores de pendiente y orientación conocidos, procurando que todas las observaciones sean realizadas en coberturas del mismo tipo. K vendría as ser la pendiente de esta regresión.

### 2.5.3. CORRECCIÓN C

---

El fundamento matemático estadístico de la corrección C se basa en el análisis de regresión simple. Por ejemplo si se realiza un análisis de regresión entre cada una de las bandas de la imagen que se quiere corregir y el modelo de iluminación construido para la fecha de adquisición se verá que existe una elevada correlación ente ambas variables, de allí se deduce que a mayor nivel digital le corresponderá una mayor iluminación solar, la idea de este método es pues realizar un ajuste semi-empírico de manera que disminuya la correlación existente entre ambas variables, así el incremento del valor del nivel digital se debe más a la respuesta de la radiación ante una determinada cubierta de interés que al aporte de la fuente de iluminación.

Para entender los fundamentos del método imaginemos una ecuación de la forma:

$y = x$ , a medida que la "x" aumenta en una unidad la "y" lo hace en una unidad también.

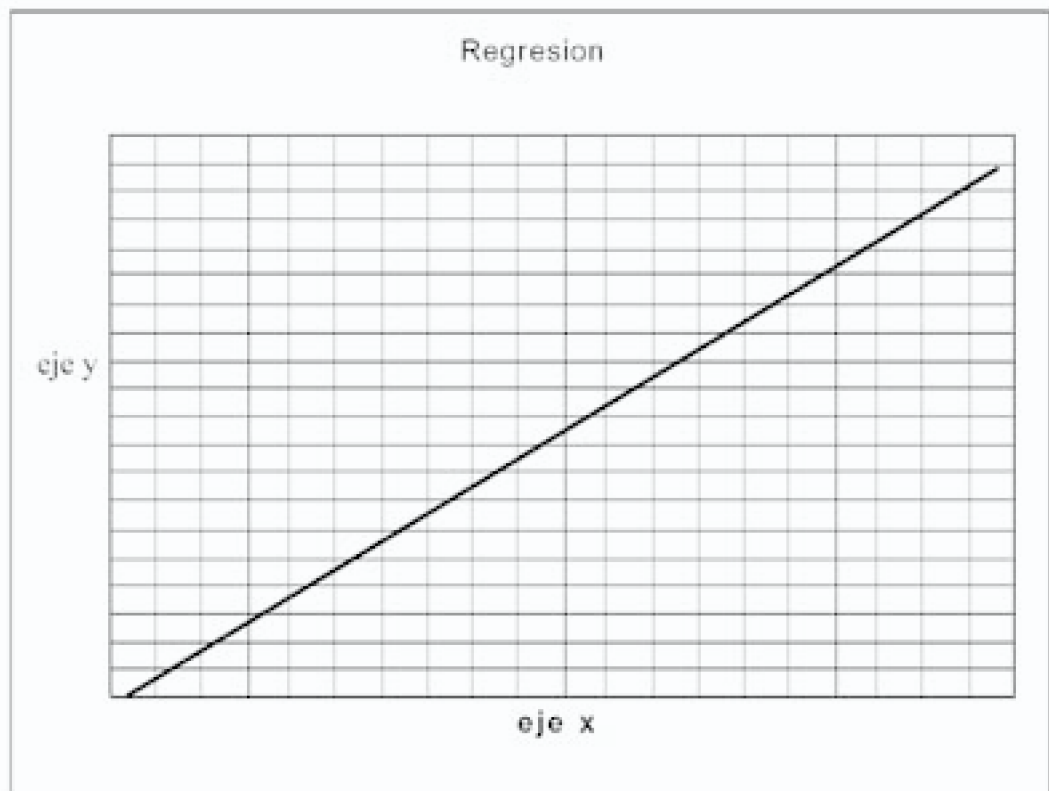


*Figura N°22: Grafica de la recta I*

Ahora que pasa si la ecuación fuera de la siguiente forma:

$$y = 0.001x$$

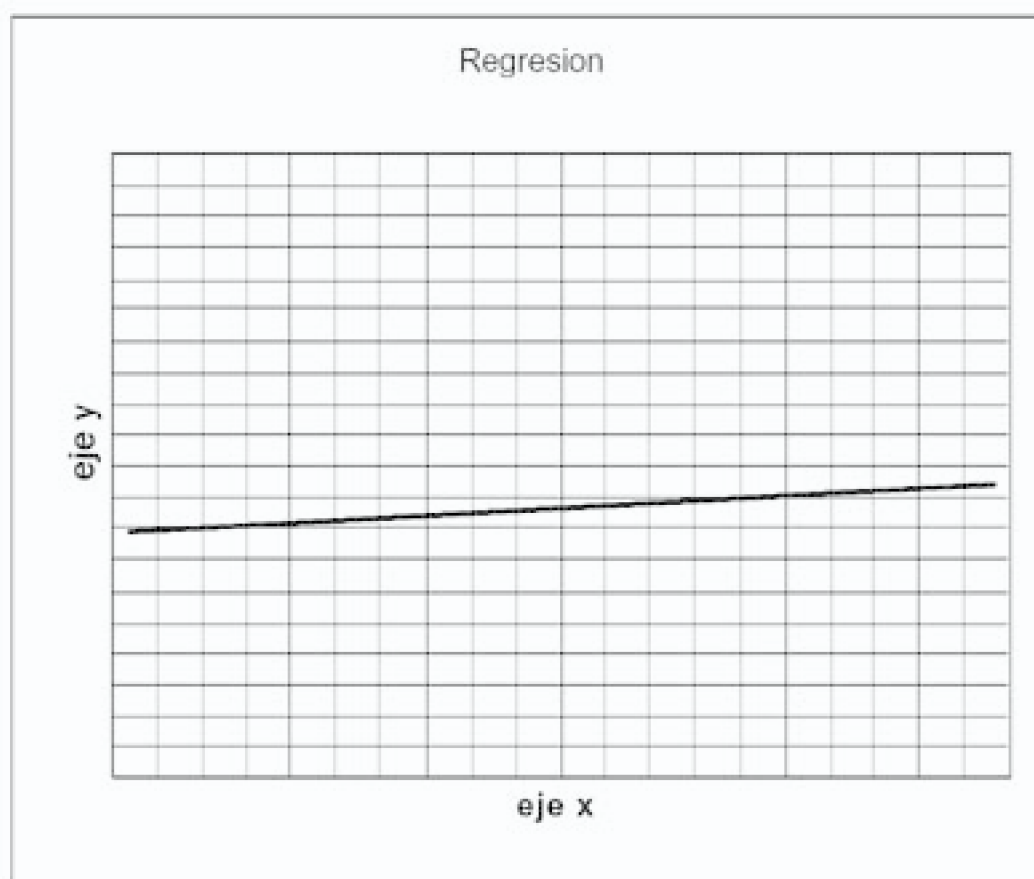


Figura N°23: Grafica de la recta II

A medida que la “x” cambia la “y” lo hará pero lentamente es decir el valor de esta variable no aumentara demasiado se mantendrá constante y la grafica que obtendríamos seria algo parecida a la de arriba. Entonces la idea final seria tratar de mantener la “x” “variante y la “y” estable en la medida de lo posible como logramos esto, de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 y &= b + mx & \rightarrow & & x &= \frac{y - b}{m} \\
 x &= \frac{y}{m} - \frac{b}{m} & \rightarrow & & x &= \frac{y}{m} - C \\
 m &= \frac{y}{x + C} & \Leftrightarrow & & ND_c &= ND_o \times \left( \frac{\cos ref + C}{\cos i + C} \right)
 \end{aligned}$$

Donde m es la pendiente y se tratara de mantener constante y hemos defino la constante “C” como la división del intercepto y la pendiente de la regresión lineal. El valor

calculado para cada  $m$  será el valor del nuevo  $Y'$  el cual como vemos tratara de mantenerse constante esto según la bondad del ajuste.

A continuación veremos un ejemplo numérico sencillo del fundamento de la corrección C:

Tenemos dos variable  $x$  e  $y$ .

|     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $x$ | 1.77 | 1.60 | 1.82 | 1.52 | 1.67 | 1.77 | 1.87 | 1.65 | 1.57 | 1.70 |
| $y$ | 70.3 | 68   | 81.6 | 61.2 | 70.7 | 76.2 | 80.7 | 72.5 | 59.8 | 65.7 |

De la tabla obtenemos la siguiente ecuación de regresión y el siguiente grafico (ver figura N°24):

$$Y = -27.21 + 57.78x$$

Y el coeficiente de correlación viene a ser:

$r = 0.78$ , existe una buena correlación entre esta dos variable.

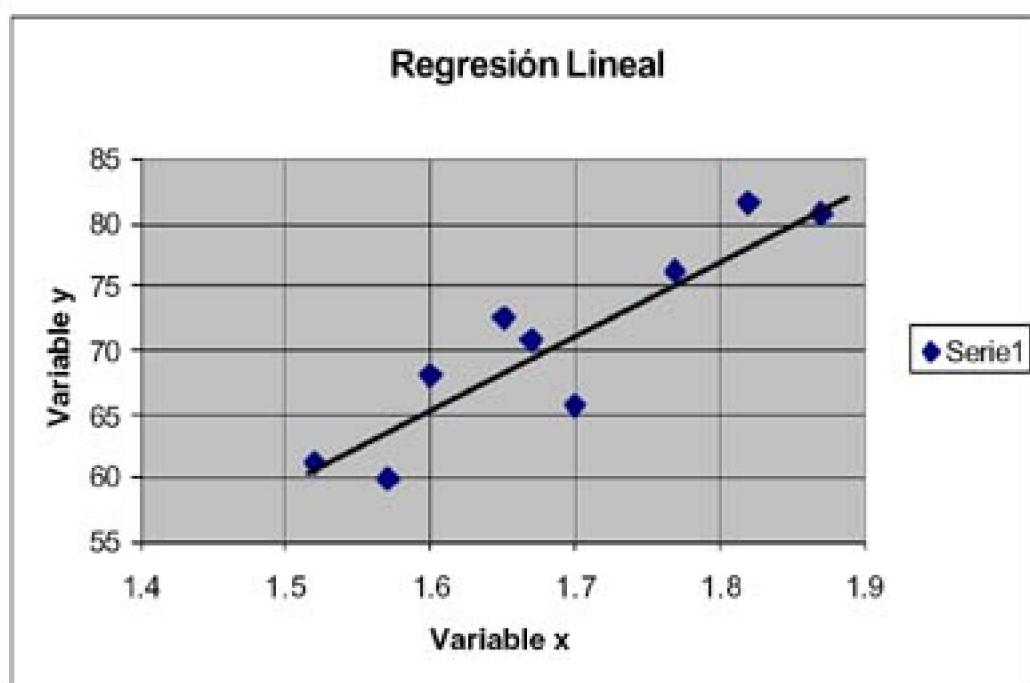


Figura N°24: Regresión Lineal

Como vimos en la figura N°24, existe una relación positiva entre estas dos variables.

Luego de aplicar la corrección "c" a estas dos variables obtenemos la siguiente ecuación y el siguiente grafico (ver figura N°25):

$$Y = 0.017 + 0.0000141 x$$

Y el coeficiente de correlación viene a ser:

$r = 0.0000034$ , Como se ve el coeficiente de correlación es bastante bajo, tiende a cero lo que significa que no existe una relación entre estas dos variables y si existe es

muy pequeña, de esta manera se han obtenido dos variables que no están correlacionadas, es decir la nueva banda creada no es influenciada por la radiación solar. (Ver figura N°25)

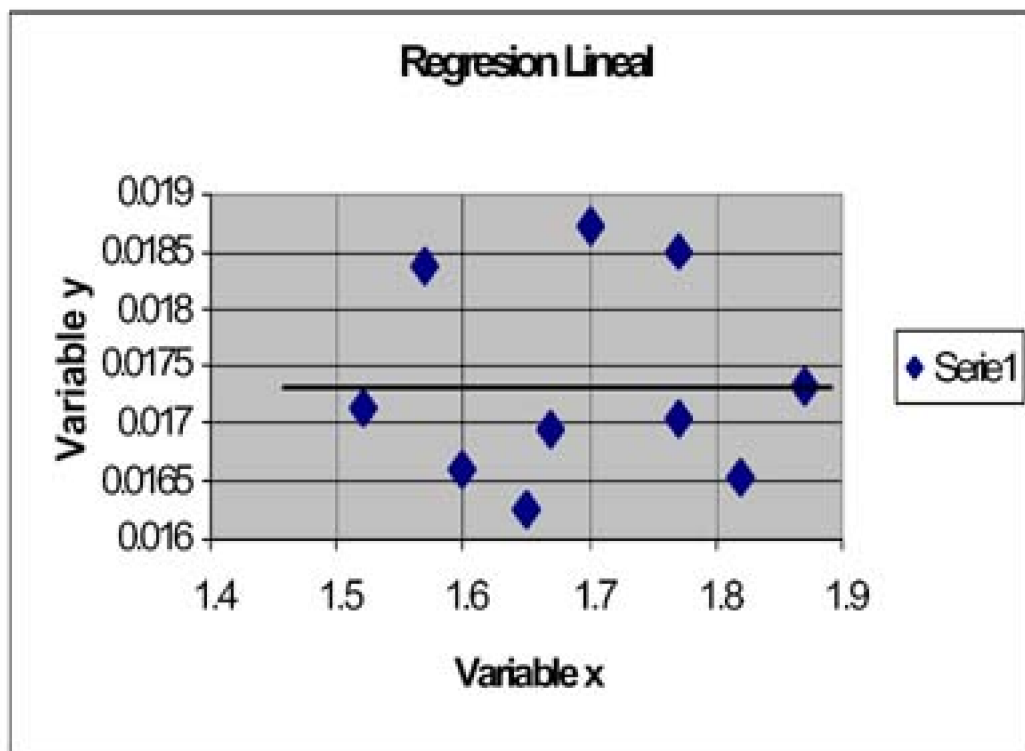


*Figura N°25: Regresión Lineal Normalizada mediante el uso de la Corrección C*

## CAPITULO III: LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

### 3.1. DELIMITACIÓN GEOGRÁFICA

#### 3.1.1. UBICACIÓN Y LOCALIZACIÓN

---

El área de análisis está ubicada en la cuenca alta del río chillón, localizada entre los 76° 30' 09" y 76° 23' 21" de longitud oeste y los 11° 26' 58" y 11° 19' 28" de latitud sur, con una extensión de 171.3 km<sup>2</sup> y una elevación media de 4594 m.s.n.m.

Políticamente el área de análisis se halla ubicada en el departamento de Lima, provincia de Canta, distrito de Huaros; limita por el norte con la cuenca del río Chancay-Huaral, por el sur con la cuenca del río Rímac, por el este con la cuenca del río Mantaro y por el oeste con la cuenca media del río chillón (ver figura N°26).



*Figura N°26: Mapa de Ubicación de la Zona de Estudio*

## 3.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

### 3.2.1. GEOLOGIA

La cuenca del río Chillón, geológicamente, muestra diversidad de formaciones de rocas sedimentarias (lutitas, calizas, areniscas, etc.), metamórficas, volcánicas (mayormente andesitas) e intrusivas (granodioritas) de diferentes edades, así como evidencias de fuerte tectonismo (fallamientos, plegamientos), que favorecen una buena mineralización. En el área de estudio se encuentran derrames y brechas andesíticas, riolíticas así como calizas claras laminadas.

### 3.2.2. CLIMATOLOGIA

Según las dos formaciones ecológica que podemos encontrar en el área de estudio, como lo son el Páramo muy Húmedo sub. Alpino, que va desde los 3800 hasta los 4800 m.s.n.m el clima es muy húmedo y frío, con una precipitación promedio de 850 mm. Las temperaturas son muy bajas con un promedio anual de 5°C, siendo de esperarse casi todas la noches temperaturas de congelación. Mientras que en la formación ecológica

Tundra Pluvial Alpino Nevados y Lagunas, que va desde los 4800 hasta los 5000 m.s.n.m, el clima es pluvial y gélido es decir que es muy lluvioso y con temperaturas de congelación permanentes, en donde se desarrollan especies vegetales hemicriptofíticas almohadillas o arrosetadas.

### 3.2.3. SUELOS

---

Los suelos que podemos encontrar dentro del área de estudio son de dos tipos: Suelos Páramo Andosol – Litosol Andino Éutrico, que son tierras marginales, aparentes sólo para pastoreo extensivo y forestal, no arables. Existiendo dentro de este grupo tierras sin uso, no apropiadas para fines agropecuarios ni forestales. El otro grupo de suelos que predomina en el área de estudio es el denominado Páramo Éutrico – Litosol Andino Éutrico con características de uso iguales que el primer grupo.

### 3.2.4. GEOMORFOLOGIA Y FISIOGRAFIA

---

El relieve general de la cuenca en el área de estudio está conformado por grandes montañas elevadas, cubiertas de nieve que dan origen al río chillón además de muchas lagunas (Cordillera La Viuda en la región janca o cordillera), extensas pampas altoandinas (Jacaybamba en la región jalca o puna) que dan origen a diversas formaciones hidromórficas como los bofedales zonas encharcadas y que sirven de áreas de pastoreo para auquénidos, hacia la cuenca media la fisiografía se presenta escarpada y abrupta, cortada frecuentemente por quebradas profundas. En el área de estudio tenemos una pendiente media de 31%, una elevación mínima de 3836 m.s.n.m y una cota máxima de 5352 m.s.n.m.

### 3.2.5. HIDROGRAFIA E HIDROLOGIA

---

El río Chillón tiene sus nacientes en las inmediaciones del flanco occidental de la cordillera la Viuda, en las lagunas Pucracocha, Aguascocha y Chunchón, aproximadamente en la cota 4600 m.s.n.m y es en esta zona donde se encuentra el área de estudio por ser donde se hallan concentrada la mayor cantidad de lagunas (ver figura N°26), la cual forma parte de la cuenca húmeda. El río Chillón en el área de estudio discurre con rumbo generalizado de NE – SO, alimentándose con las precipitaciones que caen de las partes altas de su cuenca colectora que ocurren durante el periodo de abundancia de agua (noviembre a abril) y con los deshielos de la Cordillera de la Viuda, en época de estiaje esta agua proviene de los diferentes manantiales o puquiales ubicados en el área. La pendiente promedio del río en esta parte de la cuenca es de 6% hasta la localidad de Canta aproximadamente.



## CAPITULO IV: MATERIALES Y METODOS DE INVESTIGACIÓN

### 4.1. MATERIALES

#### 4.1.1. HARDWARE Y SOFTWARE UTILIZADOS

---

En lo que respecta al hardware empleado, se trabajó en un ordenador personal Pentium IV con un procesador Intel de 2.4 Ghz, un disco duro de 80 Gigas de capacidad, 256 Mb de memoria RAM, un quemador de CD's 52x/24x/52x, una lectora de 52x, un monitor de 17 pulgadas, discos compactos y dispositivos flexibles extraíbles.

En cuanto a los programas informáticos empleados se utilizaron para el tratamiento digital de las imágenes de satélite el ERDAS imagine de Leyca Geosystem, Idrisi 32, y para las tareas de análisis de información vectorial el Arcview 3.2 de ESRI con sus módulos 3D Analyst, Spatial Analyst e Image Analyst, así mismo se elaboro un pequeño programa en Avenue denominado Image Shadow para generar pruebas en imágenes pequeñas antes de realizar el procedimiento de corrección de sombras en toda la escena, para la parte estadística y elaboración de tablas y grafico se empleo el Microsoft Excel

2002, y para la parte del tipo de la tesis el Microsoft Word 2002.

## **4.2. INFORMACIÓN UTILIZADA**

### **4.2.1. INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA**

---

Se utilizó la cartografía catastral digital elaborada al 25000 por el Proyecto Especial de Titulación de Tierras (PETT) correspondiente al área de estudio, la cual abarcaba las siguientes hojas: 23jIIINE(Uchco Machay), 23jIIISE (Canta), 23kIIINO (Pachas) y 23kIIISO (Racray). Este material fue utilizado, en las correcciones geométricas y radiométricas de la imagen correspondiente al área de estudio, así como en la etapa de la clasificación digital.

### **4.2.2. IMÁGEN DE SATÉLITE**

---

La imagen utilizada fue captada por el satélite Landsat 7, último satélite del programa Landsat, fue lanzado en abril de 1999 con un sensor denominado ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus). Su operación es administrada por la NASA (National Aeronautics and Space Administration) y la producción y comercialización de imágenes depende del USGS (United States Geological Survey).

Una imagen LANDSAT 7 ETM+ está compuesta por 8 bandas espectrales que pueden ser combinadas de distintas formas para obtener variadas composiciones de color u opciones de procesamiento. Entre las principales mejoras técnicas respecto de su antecesor, el satélite Landsat 5, se destaca la adición de una banda espectral (Banda Pancromática) con resolución de 15 metros. También, cuenta con mejoras en las características geométricas y radiométricas y una mayor resolución espacial de la banda térmica de 60 m. Estos avances tecnológicos permiten calificar al LANDSAT 7 como el satélite más interesante para la generación de imágenes con aplicaciones directas hasta una escala de 1:25.000, principalmente, en áreas rurales o territorios de grandes extensiones.



*Figura N°27: Satélite Landsat*

La figura N°27, muestra al satélite Landsat 7, el cual transporta al sensor ETM+ que es el encargado de captar la señal proveniente de la superficie terrestre y convertirla en imagen.

Las bandas del espectro visible y del infrarrojo mantienen la resolución espacial de 30m del Landsat 5 (canales 1, 2, 3, 4, 5 y 7). Las bandas del infrarrojo térmico (canales 6L y 6H) pasan a ser adquiridas con resolución de 60 metros, contra 120 metros del Landsat 5. La nueva banda Pancromática (canal 8) tiene 15 m de resolución espacial. El siguiente cuadro comparativo (ver cuadro N°2), ilustra las diferencias de resolución espectral entre el sensor TM del Landsat5 y el sensor ETM+ del Landsat 7. Los valores, expresados en micrones, representan los límites de longitudes de onda a los que es sensible cada banda espectral.

| Table 8.1.1 TM and ETM+ Spectral Bandwidths   |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Bandwidth ( $\mu$ ) Full Width - Half Maximum |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |
| Sensor                                        | Band 1<br><a href="#">Plot Data</a> | Band 2<br><a href="#">Plot Data</a> | Band 3<br><a href="#">Plot Data</a> | Band 4<br><a href="#">Plot Data</a> | Band 5<br><a href="#">Plot Data</a> | Band 6<br><a href="#">Plot Data</a> | Band 7<br><a href="#">Plot Data</a> | Band 8<br><a href="#">Plot Data</a> |
| TM                                            | 0.45-0.52                           | 0.52-0.60                           | 0.63-0.69                           | 0.76-0.90                           | 1.55-1.75                           | 10.4-12.5                           | 2108-2335                           | N/A                                 |
| ETM+                                          | 0.45-0.52                           | 0.53-0.61                           | 0.63-0.69                           | 0.78-0.90                           | 1.55-1.75                           | 10.4-12.5                           | 2109-2335                           | 52-90                               |

*Cuadro N°2: Rangos Espectrales del Sensor TM y ETM+*

La imagen utilizada para el desarrollo de la tesis, es una sub-escena del satélite Landsat ETM+ con seis bandas excluyendo la térmica, tomada el 05 de agosto de 1999 a las 10:06 a.m, a cuya hora le corresponde un acimut solar de  $48.357^\circ$  y una elevación sobre el horizonte de  $47.489^\circ$ .

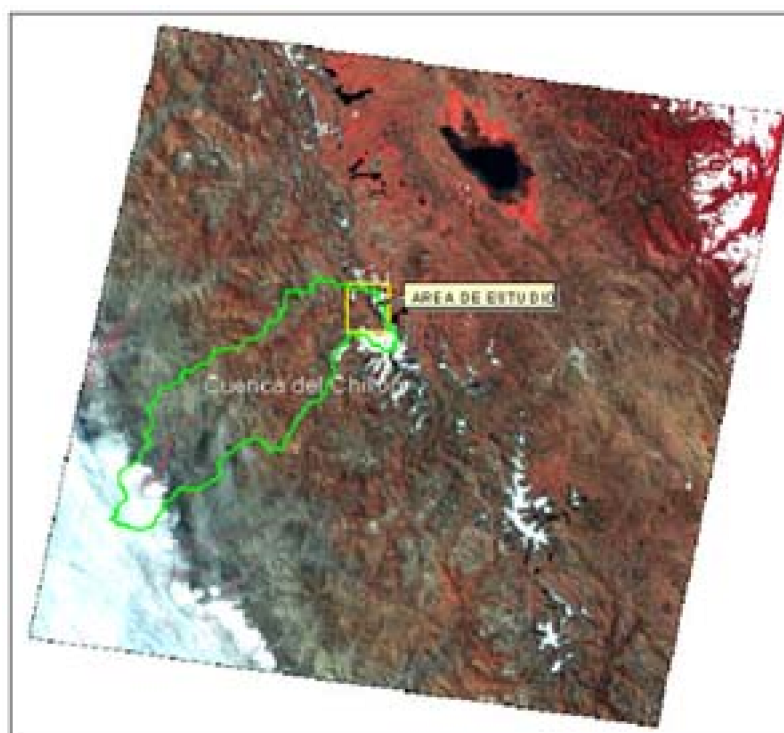


*Figura N°28: Imagen Landsat Utilizada en el desarrollo de la tesis*

En la figura N°28, se muestra la imagen Landsat ETM+ utilizada, de la cual se extrajo una sub-escena (límite de color amarillo) para realizar la corrección por el sombreado topográfico y posteriormente la clasificación digital de los cuerpos de agua.

## 4.3. METODOLOGÍA

### 4.3.1. ETAPAS DENTRO DEL PROCESO

---

#### 4.3.1.1. Georeferenciación de la Escena

La primera operación sobre la imagen fue efectuar un corte dentro del programa Erdas ya que teníamos delimitada el área de estudio en un archivo Shape de Arcview, por consiguiente solo nos interesaba dicha extensión, en base a este archivo generado después del corte se procedió a realizar todas las operaciones pertinentes.

La etapa de georeferenciación está incluida dentro de las denominadas “correcciones geométricas”, para lo cual utilizamos la información digital de las cartas catastrales del PETT escala 1:25000, la cual tuvimos que empalmar y reproyectar ya que como sabemos vienen por cuadrángulos y en otro Datum (Psad 56). Para este propósito se usaron las coordenadas UTM Zona 18 y el elipsoide de referencia WGS 84 tomándose 28 puntos espacialmente bien distribuidos dentro la imagen de trabajo, tratando de tomarlos en

lugares notables del terreno como intersecciones de ríos y curvas, la cantidad de puntos seleccionado está en estrecha relación con el tamaño del área de estudio. El error medio cuadrático fue de 36 metros que es aceptable para la escala de georeferenciación, ya que vendría a ser poco más de un píxel. Se usó el ajuste por polinomios, nosotros escogimos un polinomio de segundo grado para el ajuste y dos métodos diferentes de remuestreo; para la imagen que se iban a imprimir el método bilinear y para las que iban a ser tratadas digitalmente se uso el método de vecinos más cercanos.

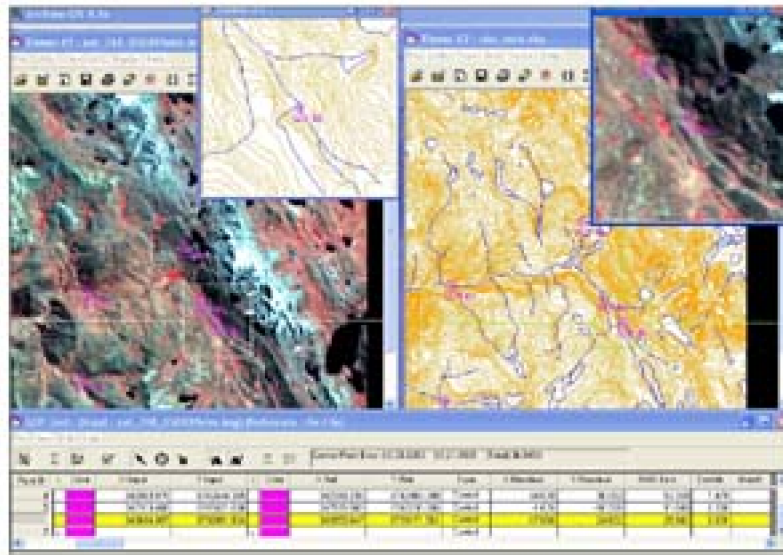


*Figura N°29: Georeferenciación de la Imagen de satélite en el programa ERDAS*

La figura N°29, muestra la georeferenciación de la escena, la cual se realizó dentro del programa ERDAS Imagine, obteniéndose un error final de 36 metros.

#### **4.3.1.2. Corrección Atmosférica**

La corrección atmosférica resulta indispensable cuando se pretende aplicar modelos que tengan en cuenta parámetros físicos que son factibles de modelar, en nuestro caso la iluminación proveniente de la fuente de luz. Para esto se dispone de diferente método y programas desarrollados para este fin. Muchas veces se requiere de información adicional que no se tiene, como humedad para el día de la toma, radiación neta, etc. es por eso que estos modelos asumen muchas de estas variables, a la par se han desarrollado también modelos empíricos por las asunciones que toman, pero que brindan un resultado aceptable según el tipo de trabajo que se esta realizando, entre los mas conocidos están los que propone Chávez (Chavez, 1988 y 1996), como el de substracción del mínimo del histograma, método de regresión entre bandas, y el método de Cost; este ultimo es el que nosotros aplicamos a nuestra imagen por considerarlo con mayor sustento teórico y a la vez fácil de programar y no requiere de variables difíciles de obtener.

Este método fue programado en el lenguaje avenue de Arcview, utilizando el Dialog Design para crear una interfase grafica que permitiera efectuar pruebas con mayor rapidez (ver figura N°30). El procedimiento se inicia con exportar las bandas originales de

la imagen desde el formato de Erdas Imagine (img) hacia el formato Grid, que es un formato raster propio del Arcview que sirve para realizar operaciones entre bandas, cuando se tuvo todas las bandas en formato Grid se procedió a correr el programa en cada banda, ingresando los parámetros necesarios para realizar la corrección la mayoría de estos se encuentran en el fichero de cabecera de la imagen que viene cuando ésta es adquirida.

A continuación enumeramos los pasos a seguir para realizar el método de cost de Chávez:

(1)Áng. De elevación solar =  $(90^\circ - \text{áng. zenital solar } q)$ .

(2)Fecha de la adquisición de la imagen.

(3)Búsqueda de la distancia Tierra-Sol “d” en tablas de efemérides para el día de adquisición de la escena.

(4)Determinar el mínimo valor de brillo (nivel digital de la banda a corregir)

(5)Convertir cada valor mínimo de brillo a radiancia mínima espectral en el satélite:

$$LI_{\min} = LMINI + QCAL \times (LMAXI - LMINI) / QCALMAX$$

Donde QCAL es el mínimo valor de brillo, QCALMAX = 255, y las constantes LMINI, LMAXI están dadas en tablas (Markham y Barker,1986)

(6)Para cada banda, se computa la radiancia de un cuerpo negro (asumiendo que tiene una reflectancia de 1% según Chávez, 1996):

$$LI_{1\%} = 0.01 \times ESUNI \times \cos^2 q / (p \times d^2)$$

Donde ESUNI = irradiancia media espectral exo-atmosférica tomadas de las tablas de (Markham and Barker,1986) (7) finalmente el cálculo de la corrección sería:

$$LI_{\text{haze}} = LI_{\min} - LI_{1\%} \text{ (Chávez, 1996)}$$

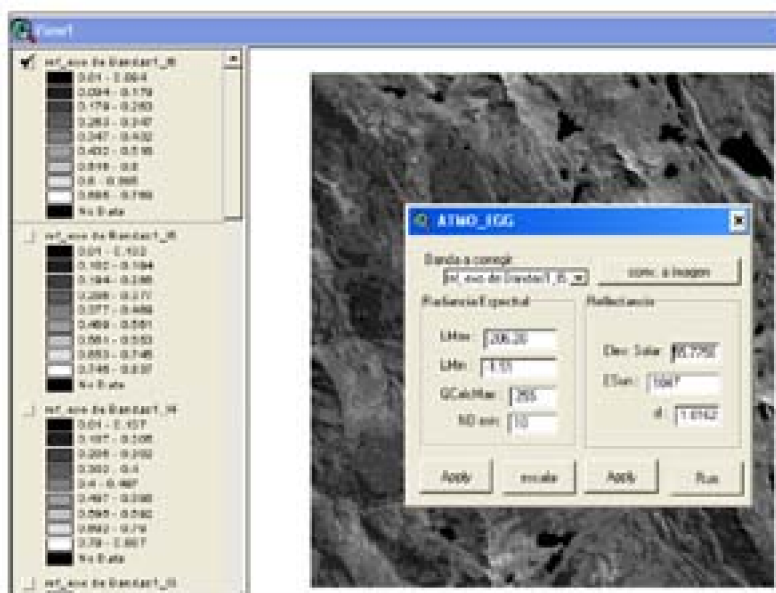


*Figura N°30: Proceso de la Corrección Atmosférica, para la corrección atmosférica de la*

*imagen, se elaboro un aplicativo en Avenue (lenguaje de programación del programa Arcview).*

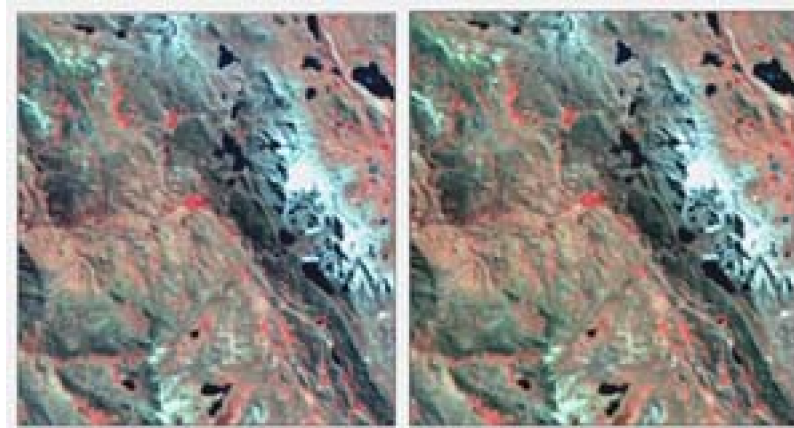


*Figura N°31: Resultado de la Corrección Atmosférica, se muestran la imagen antes (izquierda) y después (derecha) de la corrección atmosférica, se nota una ligera disminución del cañón azul en la imagen final.*

Una manera de valorar el efecto de la corrección atmosférica es visualmente (ver figura N°31), la imagen de la izquierda tiene una acentuada presencia del canal azul debido a que esta longitud de onda es precisamente la más afectada por el efecto de atmósfera, en la imagen de la derecha podemos ver una distribución más uniforme de las tonalidades de la escena. Otra forma de validar la eficacia de la corrección es trazando perfiles espectrales, en cuyo caso se toman muestras de las principales cubiertas de interés sobre todo de la vegetación sana y podemos observar un ligero pico en la longitud de onda correspondiente al verde, cosa que no ocurre si la imagen no ha sido previamente corregida.

La imagen corregida geométricamente y calibrada radiométricamente es la que se va a emplear para efectos de la corrección por sombras.

#### **4.3.1.3. Edición de la Cartografía Base**

La edición de la cartografía base se realizó dentro del programa Arcview y consistió en el acondicionamiento de los archivos vectoriales, ya que esta información la obtuvimos de las cartas 1:25,000 del PETT en formato digital (DGN, archivos de microstation), la edición tuvo que ser minuciosa en lo que respecta al etiquetado de las curvas de nivel ya que estas iban a servir para la generación del modelo digital de elevación DEM. Se tuvieron que empalmar las cartas en los extremos para su exacta correspondencia en los límites, además de reducir los pseudo nodos, así como editar los dangles nodos todo esto valiéndonos de extensiones descargadas de la página de Environmental Systems Research Institute (ESRI), ([WWW.Esri.com](http://WWW.Esri.com)).

A partir de esta información vectorial se van a obtener el modelo de elevación digital así como sus variables derivadas (pendiente y la orientación), las cuales a su vez intervendrán en la construcción del modelo de reflectancia para la corrección por sombra, de allí que esta fase es extremadamente importante ya que de un buen

acondicionamiento de la información los resultados serán más parecidos a la realidad.

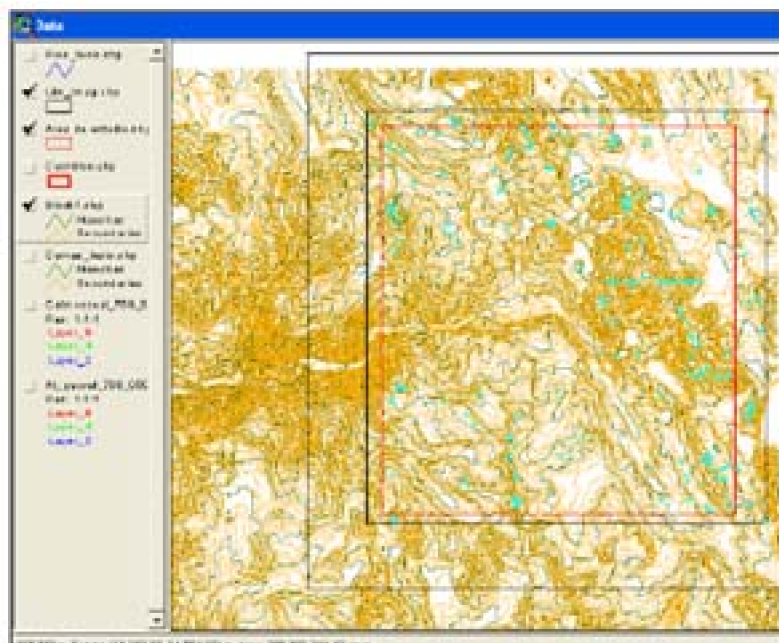


*Figura N°32: Acondicionamiento Cartográfico*

La figura N°32, muestra parte del trabajo de acondicionamiento de la información vectorial, en lo que respecta al editado y empalmado de las curvas de nivel antes de ser etiquetadas y darle su correspondiente valor de altitud.

#### **4.3.1.4. Generación del Modelo de Elevación**

Con los archivos corregidos y en formato vectorial del programa Arcview (SHAPE), se procedió a la generación del modelo digital de elevación, se decidió crear un DEM del tipo TIN (Estructura Irregular de Triángulos), ya que entre otras ventajas con respecto a la interpolación matricial tenemos la manera en que trabaja en la interpolación asegura un mejor ajuste de la información topográfica, ya que la red triangular se va moldeando de acuerdo a la topografía del terreno, sobre todo en zona de relieve abrupto los triángulos se reducen en tamaño y en zonas de relieve suave los triángulos crecen en tamaño; a la vez esta estructura de datos puede ser convertida en un estructura raster fácilmente.

El mapa de pendientes derivado del TIN tiende a mantener un valor más real de la pendiente ya que evita el suavizado excesivo que supone al hacerlo por el método matricial de filtrados o del plano de ajuste mediante interpolación de puntos vecinos ya que el TIN toma el valor de la pendiente directamente de la inclinación de los triángulos de la red irregular.

Para realizar este modelo utilizamos la extensión 3D Analyst de Arcview la cual nos permite calcular el modelo TIN a partir de seleccionar todos los temas que queremos que intervenga en la interpolación, se hace indispensable la inclusión de la mayor cantidad de información adicional que cuente la carta al 25000 para nuestro caso, como señales geodésicas, cotas, vías, ya que todo esto contribuirá a modelar mejor el relieve

topográfico.

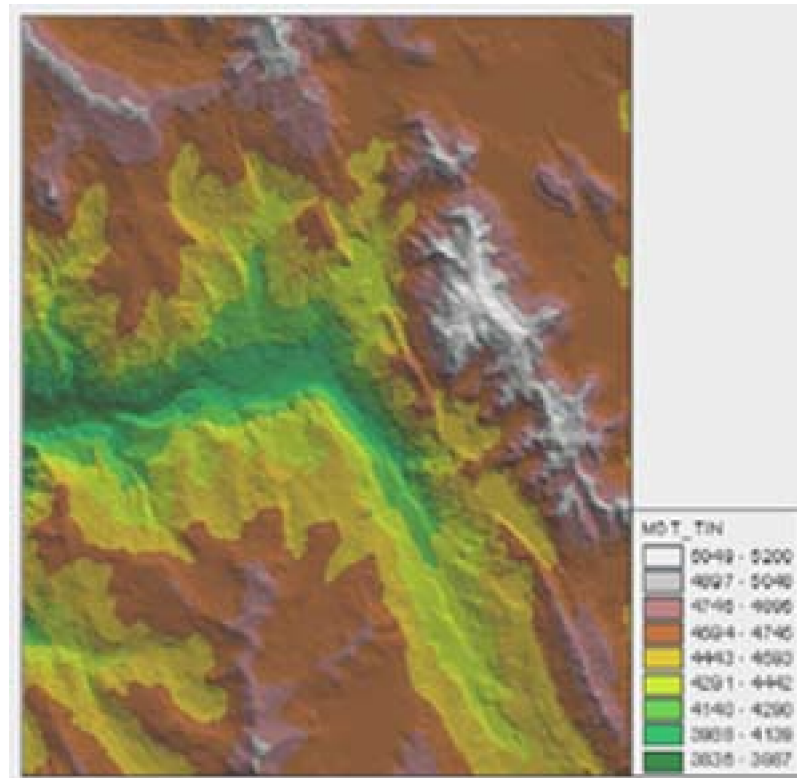


*Figura N°33: Modelo Digital de Elevación*

En la figura N°33, podemos ver el modelo de elevación digital del tipo TIN generado con la información topográfica que acondicionamos, este MDT tiene un adecuado grado de detalle para el trabajo que pretendemos realizar. Éste fue generado en base a la información al 1:25,000, ya que también se probó con información al 1:100,000 y como era de esperarse los resultados de las correcciones no fueron los mejores.

De este MDT procedimos a generar las variables derivadas de la información topográfica, la pendiente y la orientación ya que estas intervendrán en la corrección de sombras en la imagen que estamos trabajando.

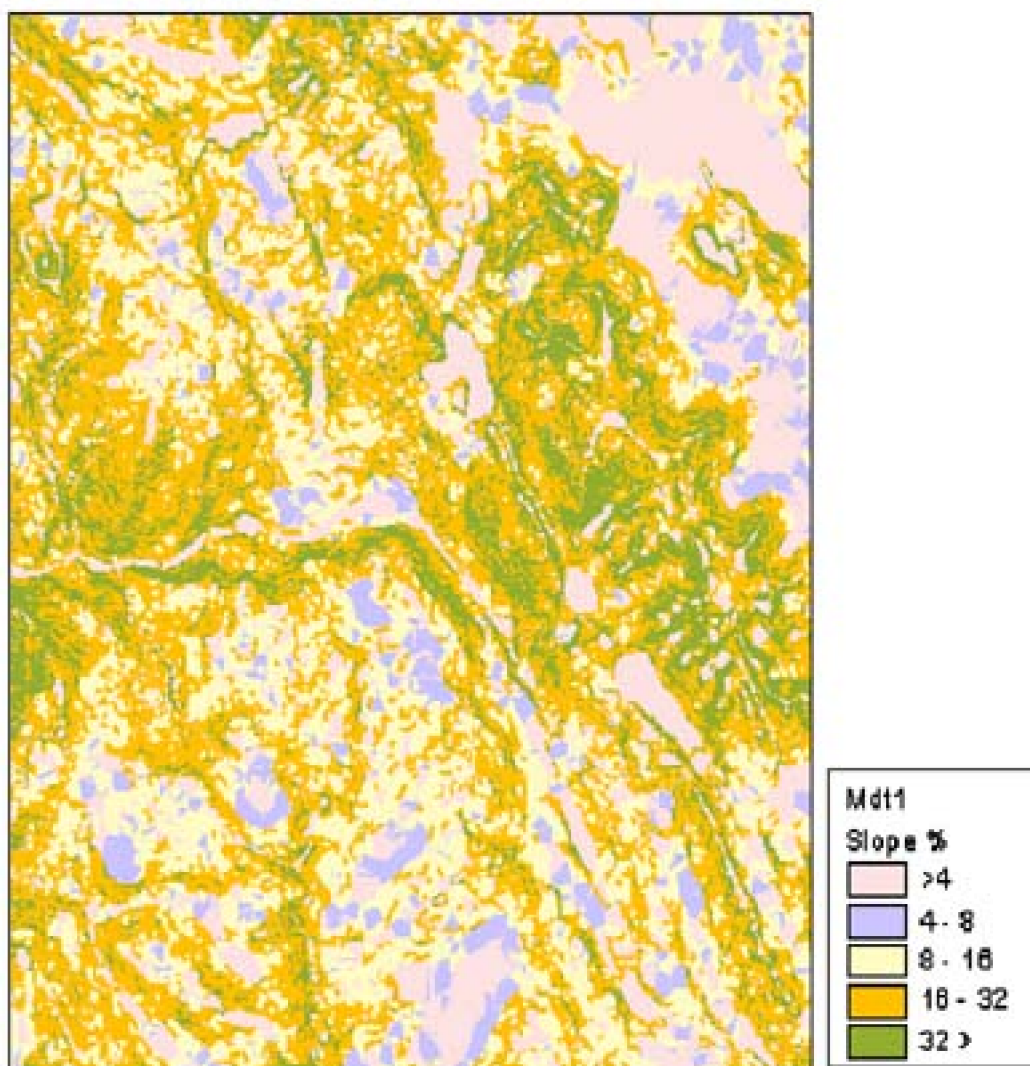


*Figura N°34: Modelo Digital de Pendiente*

La figura N°34, muestra la pendiente del área de estudio derivada de la estructura TIN, esta pendiente ha sido calculada por el software directamente de las caras de los triángulos que conforman la red. Las unidades están en porcentaje.

Seguidamente se calculó el modelo de orientación:

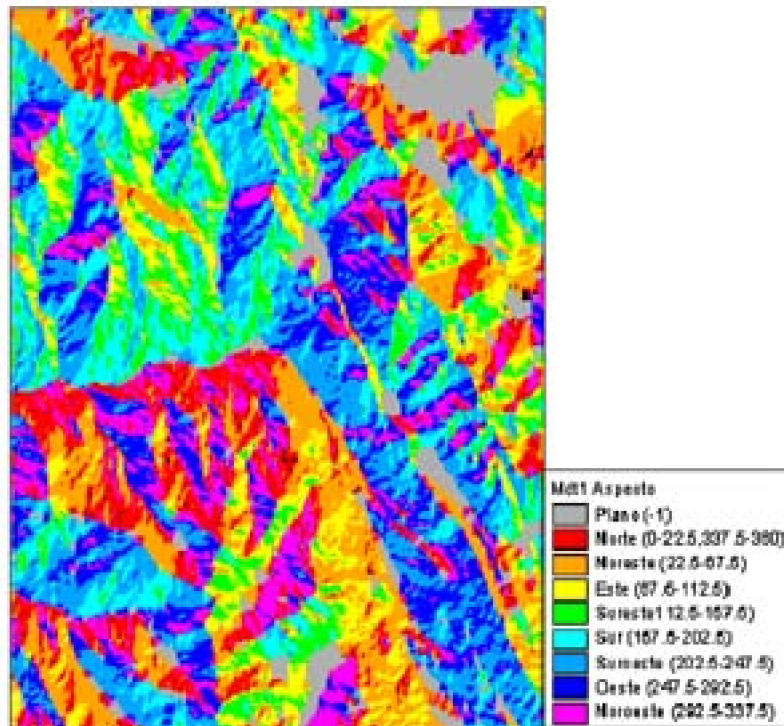


*Figura N°35: Modelo Digital de Orientación*

La figura N°35, muestra el mapa de orientaciones del área de estudio, las áreas en color plomo son las áreas planas es decir las que están mirando hacia arriba para las cuales no existe valor de orientación y el programa les asigna el valor arbitrario de (-1).

Después de haber generado el modelo de pendiente y el modelo de orientación, se procedió a su conversión al formato raster, ya que las bandas de la imagen de satélite están en dicho formato, para lo cual utilizamos las herramientas que posee las extensiones del Arcview tanto el 3D analyst como el Spatial Analyst, fijando como extensión de salida de cada celda el valor de 30 metros que es el valor de píxel de la imagen de satélite para su exacta coincidencia y el calculo sea mas ágil y preciso.

#### **4.3.1.5. Generación del Modelo de Iluminación**

Para la generación del modelo de iluminación nos hemos apoyados en varios criterios, métodos y programas informáticos para comparar el resultado y la forma en que éstos son generados ya que se contaba con un buen sustento teórico al respecto, de manera que nos permitió definir el tipo de modelo de iluminación más adecuado para obtener una buena corrección por sombras, después de revisar varios programas comerciales que calculaban estos modelos, procedimos a la construcción de un programa propio, el cual tenía la ventaja de calcular un mapa de sombras para una fecha determinada, calcular el valor del coseno del ángulo de incidencia sin realizar ningún tipo de escalado, cálculo de regresión lineal y la corrección por el sombreado topográfico entre otras tareas; todo esto integrado en una sola interfase (ver figura N°38). De esta manera se pudo simular valores de iluminación para distintas épocas del año, analizando como actúa la corrección por sombras y los problemas que se presentan al variar el escenario de la toma de la imagen

así como el tipo de relieve.

Para el cálculo del modelo de iluminación se ingresan los valores del azimut y elevación solar para el día de la toma de la escena, estos se encuentran en el fichero de cabecera que viene con la imagen de satélite, para nuestro caso son los siguientes:

- Azimut Solar =  $48.357^\circ$
- Elevación Solar =  $47.489^\circ$

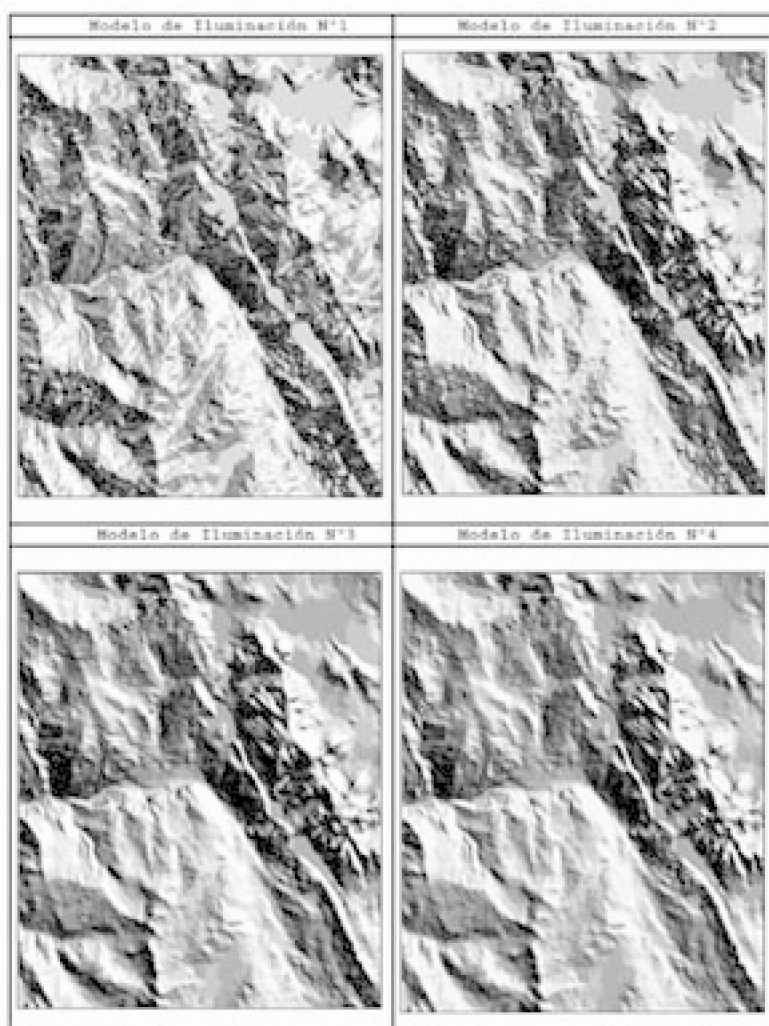


*Figura N°36: Modelos de Iluminación Generados para la Corrección del Sombreado Topográfico*

En la figura N°36, puede verse los cuatro modelos de sombras generados para el día 5 de agosto de 1999, según los datos de azimut y elevación solar.

El modelo N°1, fue derivado del modelo TIN, el cual tiene algunos problemas en el resultado final al pasarlo a formato raster, ya que la no coincidencia exacta entre los triángulos y la celdas de modelo hace que se presente algunos cambios bruscos dentro del modelo final lo que hace necesario pasarle un filtrado para suavizar el modelo, en cuanto a la ventaja que presenta es que se ha tomado en cuenta el ocultamiento

topográfico.

El modelo N°2, fue generado en base al programa construido para esta tesis, en el cual ingresamos las variables de pendiente y orientación derivadas del modelo TIN convertidas a formato raster, esto ayudó un a suavizar el modelo de iluminación sin tener que pasarle ningún tipo de filtrado al modelo final, la ventaja de este modelo es que todas las celdas tienen un valor con significado no se descartan los píxeles de borde, el problema que presenta este modelo es que no se ha tenido en cuenta el ocultamiento topográfico que dependiendo de la zona y la época del años se hace más o menos intenso.

El modelo N°3, fue generado directamente en formato raster, es decir se convirtió el MDT del TIN original al formato raster desde un inicio y con este se trabajo para hallar el modelo de iluminación, la ventaja es que el modelo final esta ya suavizado y no presenta cambios bruscos entre los píxeles que lo componen, otra ventaja es que el ocultamiento topográfico ha sido tomado en cuenta y podemos decir como desventaja que si existe una línea sin información significativa, exactamente la línea de borde pero para nuestro trabajo final esto no fue de importancia ya que la perdida de información es muy pequeña con respecto al contexto de toda la escena.

El modelo N°4, es una variación del tercer modelo para el cual se ha tomado en cuenta establecer un factor de suavizado en la pendiente antes de hallar el modelo de iluminación, multiplicándose ésta por diferentes factores (prueba y error), hasta encontrar un valor que no suavice demasiado la pendiente y que incremente el brillo de los píxeles en sombra al no contar con información sobre radiación difusa. Este factor se fijó en 0.6.

Se decidió contar con el modelo de iluminación suavizado por la pendiente, al momento de corregir la imagen por el sombreado topográfico.

Todos estos modelos fueron calculados dentro del programa Arcview, utilizando las extensiones 3D Analyst, Spatial Analyst e Image Shadow.

#### **4.3.1.6. Construcción de la Superficie de Referencia**

La superficie de referencia viene a ser una superficie hipotética de las mismas dimensiones del ámbito de análisis, para la cual se ha calculado su modelo de iluminación de la misma forma que para el modelo de elevación digital, la diferencia es que esta viene a ser una superficie completamente plana para la cual no existen valores de pendiente ni orientaciones por tanto la iluminación dependerá sólo de la posición del vector solar frente a ésta, lo cual nos dará un valor único para toda la imagen el cual será tomado como “referencia” para corregir la iluminación posteriormente en toda la imagen.

Partiendo de la formula del coseno del ángulo de incidencia tenemos:

$$\cos(i) = \cos\theta_s \times \sin\theta_n \times \cos(\phi_s - \phi_n) + \sin\theta_s \times \cos\theta_n$$

Donde :

$\theta_s$  = Elevación Solar

$\theta_n$  = Pendiente de la Superficie

$\phi_s$  = Azimut Solar

$\phi_n$  = Orientación de la Superficie

Si hacemos cero el valor de la pendiente y la orientación la formula se reduce a:

$$\cos(i) = \sin\theta_s$$

De esta manera obtenemos la superficie de referencia, la cual calculamos con el programa construido especialmente para la corrección por sombras.

En la figura N°37, se puede ver la superficie de referencia en color rojo, construida para la imagen a corregir, mientras que a la derecha vemos la extensión creada para este fin denominada: "Image Shadow", sólo debemos ingresar las variables requeridas (pendiente y orientación), así como la información de elevación solar, luego dar un check en la opción "cos demref", e inmediatamente calculamos la superficie de referencia.

Hasta este punto ya tenemos las 3 variables que intervendrán en la corrección del sombreado topográfico: El modelo de iluminación, El modelo de referencia y Las bandas de la imagen.



Figura N°37: Construcción de la Superficie de Referencia

#### 4.3.1.7. Corrección del Sombreado Topográfico

Con las variables calculadas previamente (Modelo de iluminación y modelo de referencia), llegamos al objetivo central de esta tesis realizar corregir cada banda de la

imagen de satélite, mediante la corrección del sombreado topográfico, en el cuadro N°3 se presenta los tres métodos empleados para corregir el sombreado topográfico los dos primeros métodos tienen una ligera variación en la ecuación b donde incluyen el modelo de referencia. El método de la pendiente suavizada no se incluye como un método, ya que es una variación de la corrección C, por la aplicación de un factor de suavizado en la variable pendiente.

Los tres métodos han sido tomados de diversos autores entre ellos (Colby 1991, Smith et al., 1980), (Teillet et al., Meyer et al., 1993), presentando algunas variantes entre ellos según la fuente y la aplicabilidad de estos.

Estos métodos fueron aplicados en dos programas comerciales Erdas imagine y Arcview GIS, en el primero se tuvo que crear algunos modelos de análisis utilizando el Model Maker un modulo específico que permite personalizar ciertas operaciones y generar modelos según el interés del especialista, mientras que en el segundo se elaboró una extensión denominada "Image Shadow" (ver figura N°38), utilizando para ello el Avenue y Dialog Design (Lenguaje de programación de Arcview y extensión para la creación de diálogos respectivamente), con la cual pudimos hacer de la corrección por sombras un proceso ordenado y sencillo, pudiendo repetir ésta las veces que sea necesaria hasta obtener los resultados más razonables.

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |    |                                                                     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|---------------------------------------------------------------------|
| Método N°1: Corrección del coseno                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | a) | $ND_c = \frac{ND_o}{\cos i}$                                        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | b) | $ND_c = ND_o \times \frac{\cos ref}{\cos i}$                        |
| Método N°2: Corrección de minnaert                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | a) | $ND_c = \frac{ND_o \times \cos p}{\cos^k i \times \cos^k p}$        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | b) | $ND_c = ND_o \times \left( \frac{\cos ref}{\cos i} \right)^k$       |
| Método N°3: Corrección C                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | a) | $ND_c = ND_o \times \left( \frac{\cos ref + c}{\cos i + c} \right)$ |
| <p><math>ND_c</math> = Nivel digital corregido para cada banda.</p> <p><math>ND_o</math> = Nivel digital original para cada banda.</p> <p><math>\cos ref</math> = Coseno para una superficie horizontal de referencia.</p> <p><math>\cos i</math> = Coseno del ángulo de iluminación solar.</p> <p><math>\cos p</math> = Coseno de la pendiente del MDE.</p> <p><math>k</math> = Constante de Minnaert obtenida por regresión lineal.</p> <p><math>c</math> = Constante C obtenida de b/m.</p> |    |                                                                     |

**Cuadro N°3: Métodos de Corrección del Sombreado Topográfico**

Procedimos a aplicar los métodos siguiendo el orden de la tabla anterior.

Para método del coseno, ecuación (a), tenemos todas la variables requeridas solo hay que hacer una conversión de unidades en el modelo de iluminación que está escalado entre 0-255, para regresar a los valores originales del coseno del ángulo de incidencia solar, poniendo en cero aquellos píxeles negativos que son precisamente los píxeles en sombras, así procedimos a corregir cada banda de la imagen original mediante el primer método(la imagen utilizada es la que previamente se ha corregido por el efecto atmosférico).

Para el método del coseno, ecuación (b), tiene un ligera variación con respecto al primero en este se incluye en el numerador una imagen de referencia, es decir el coseno del ángulo de iluminación sola para una superficie horizontal, la cual nos servirá para estimar la proporción de brillo a modificar.

El método de minnaert, ecuación (a), se diferencia de los dos primeros en que este es un modelo no Lambertiano es decir toma en cuenta otras propiedades de la radiación,

aquí se hace necesario determinar el valor de  $k$ , para esto se debe tomar una muestra dentro de la imagen a corregir que se encuentren en diferentes partes del relieve y que sean del mismo tipo de cobertura con estos valores se calcula mediante regresión lineal el valor de la constante  $k$  para cada una de las bandas que intervendrán al momento de realizar la corrección, también debemos de calcular el coseno de los valores de las pendientes ya que intervendrán en dicha corrección, esto se hace mediante una operación de álgebra de imágenes.

El método de Minnaert, ecuación (b), es similar al método anterior, ya que contamos con todas las variables calculadas anteriormente, sólo se necesita incluir el modelo de referencia, correr el programa y comparar los resultados con los modelos anteriores.

El tercer método es la llamada corrección C, ecuación (a), que viene a ser un ajuste semi-empírico efectuado mediante regresión lineal esto se hace para cada banda de la imagen a corregir y el coseno del ángulo de incidencia solar, hallando la ecuación de regresión y al dividir el intercepto con la pendiente obtenemos el valor de la constante  $c$ , el cual va a permitir mejorar las áreas sobre corregidas y los artefactos creados en por el método del coseno de una manera simplificada y rápida.

A este último método se le aplicó un factor de suavizado en la pendiente (factor de 0.6), con el objetivo de incrementar el valor del píxel dentro del modelo de iluminación en las áreas de fuerte pendiente y en sombra para evitar los valores negativos, la imagen resultante de esta corrección fue la que finalmente se empleó en el proceso de clasificación de cuerpos de agua por ser la que mejor resultados visuales ofrecía.

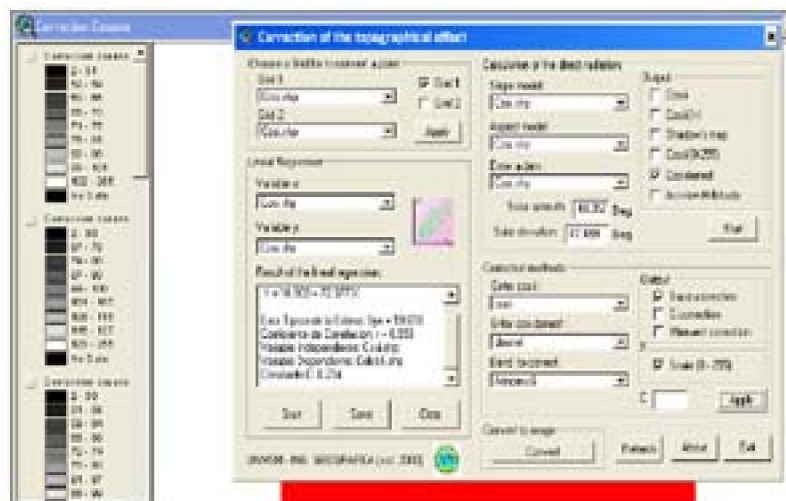
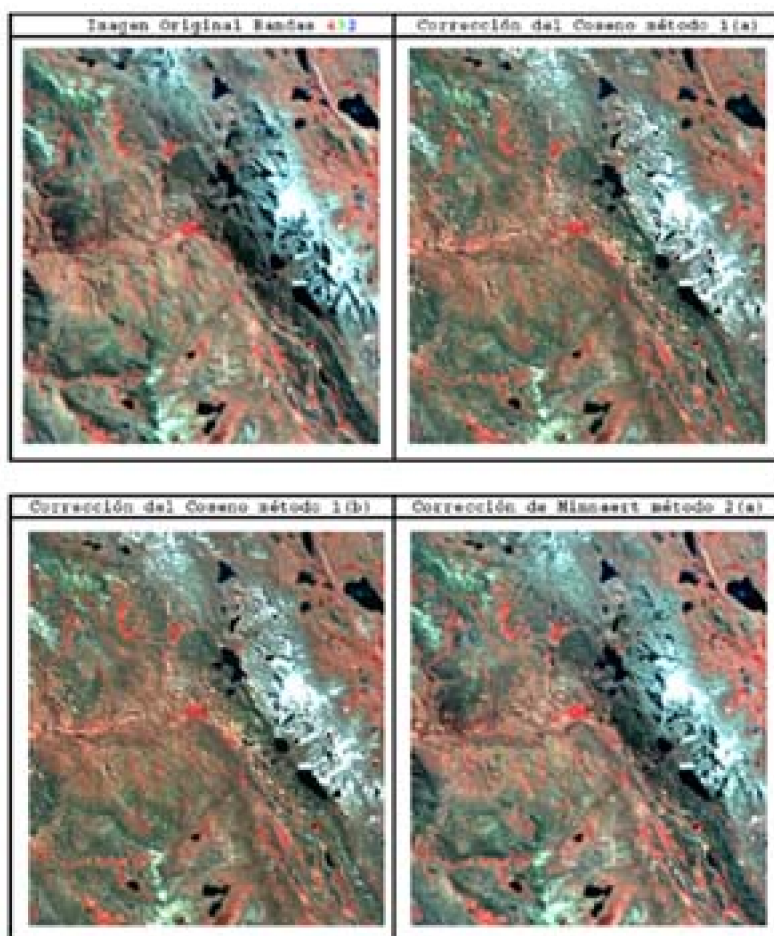


*Figura N°38: Extensión Image Shadow, Image Shadow es la interfase construida en el lenguaje de programación del Arcview, esta extensión nos facilitó la corrección interactiva de los diferentes métodos citados en la literatura, permitió el análisis de las ventajas y desventajas en cada corrección al controlar cada parte del proceso.*



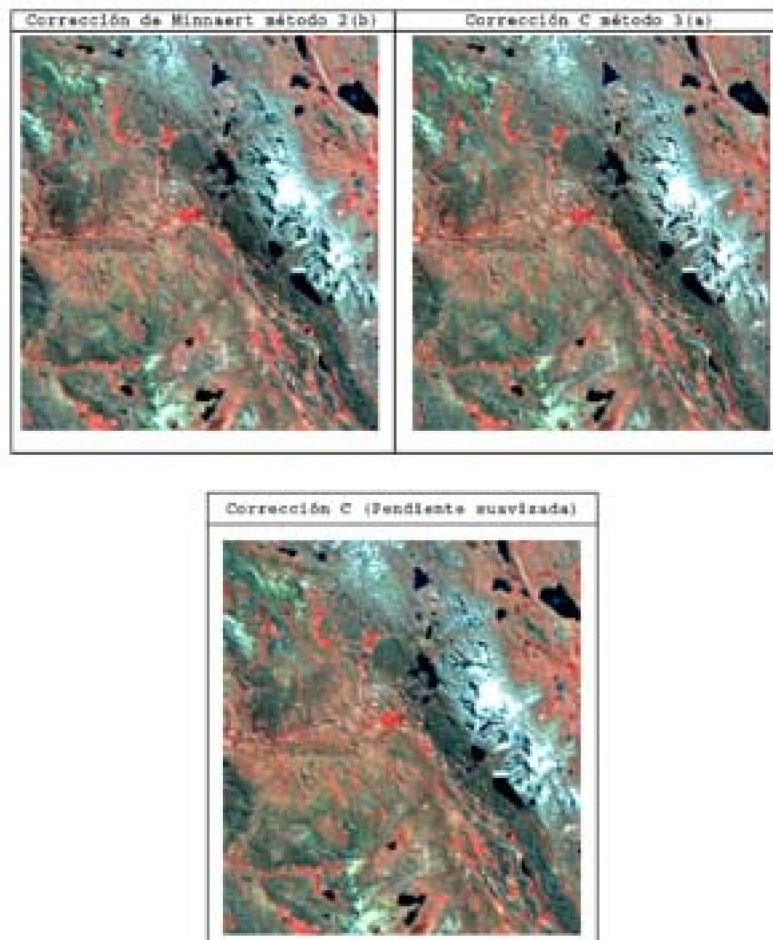


*Figura N°39: Resultados Obtenidos Aplicando los Métodos del Cuadro N°3*

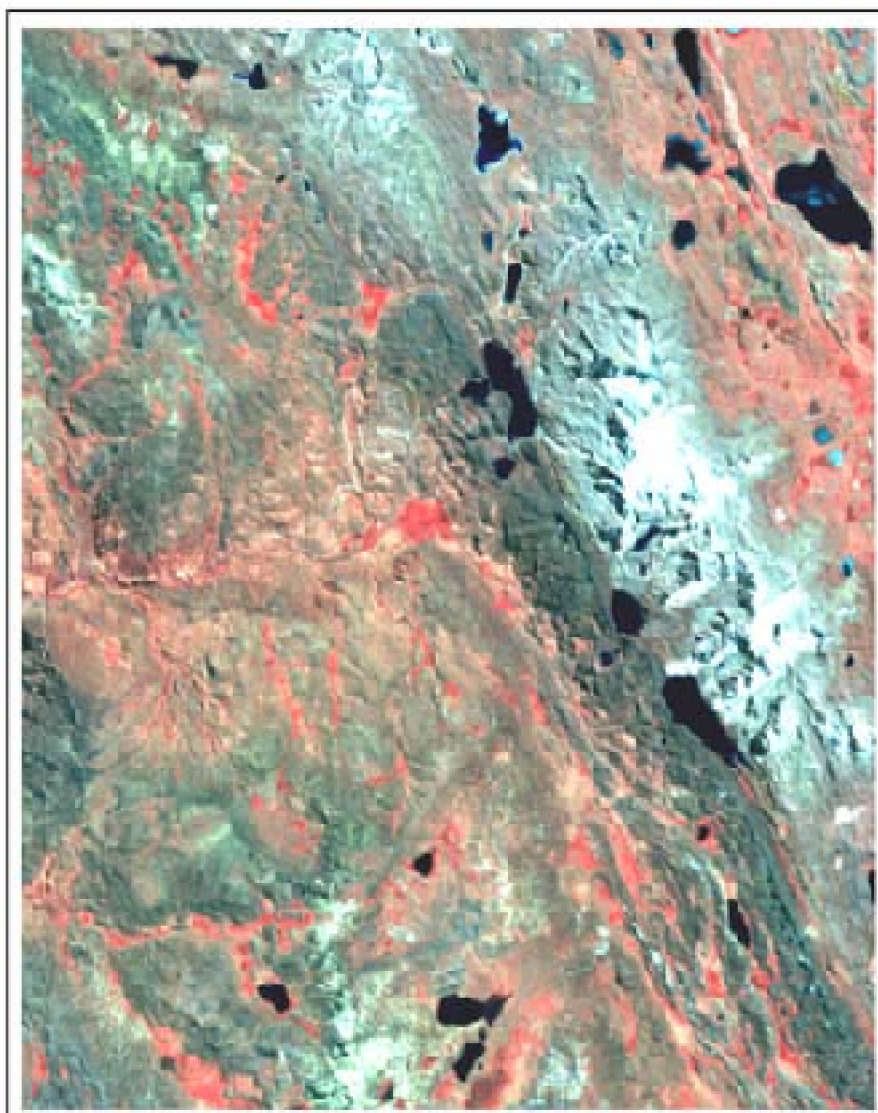


*Figura N°40: Resultados Obtenidos Aplicando la corrección C con un suavizado en la pendiente*

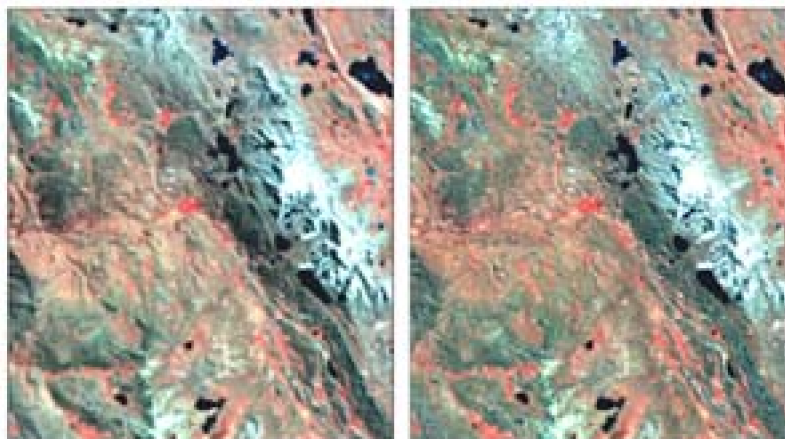


*Figura N°41: Corrección del Sombreado Topográfico, podemos comparar visualmente el*

*resultado obtenido después de efectuar la corrección del sombreado topográfico a la izquierda tenemos la imagen original en donde se aprecia claramente la presencia de sombras, mientras que en la imagen de la derecha está la imagen corregida, el sombreado a disminuido de manera notoria en la mayor parte de la escena*



# CAPITULO V: DETECCIÓN Y DELIMITACIÓN DE CUERPOS DE AGUA

## 5.1. ETAPAS DENTRO DE LA CLASIFICACIÓN

### 5.1.1. INTEGRACIÓN DE LA INFORMACIÓN DENTRO DE UN SIG

---

Toda la información obtenida producto del tratamiento digital de la imagen de satélite (información raster), se ingresará dentro de un SIG, al igual que toda la información de tipo vectorial, para su correspondiente análisis, en nuestro caso para efectuar la clasificación de los cuerpos de agua que existen en la imagen trabajada, esto debido a que las herramientas de modelamiento con las que cuenta un Sistema de Información Geográfica son muy potentes y permiten realizar tareas más complejas.

Todo SIG debe tener la capacidad de poder importar y exportar archivos en los diferentes formatos que existen en el mercado como archivos raster \*.img, \*.rst, \*.Msid, \*.Tiff, o archivos vectoriales como los \*.Shp y coberturas de ArcInfo.

## 5.1.2. METODOS DE CLASIFICACIÓN EMPLEADOS

---

A continuación vamos a describir los tres métodos utilizados para la efectuar la clasificación de los cuerpos de agua existentes en el área de estudio, así como los resultados obtenidos con cada uno de éstos.

Los tres métodos de clasificación digital, se aplicaron sobre la imagen que ya había sido previamente corregida tanto geométrica como radiométricamente.

### 5.1.2.1. Clasificación No Supervisada

Se utilizan algoritmos de clasificación automática multivariante en los que los individuos más próximos se van agrupando formando clases. Uno de los más habituales en teledetección es el clustering jerárquico. Este consta de N pasos siendo N el número total de individuos a clasificar. En cada paso se identifican los dos individuos más similares (próximos), se hace una clase con ellos y se sustituyen por el centroide de la clase resultante. De este modo cada paso analiza un individuo menos que el anterior ya que los individuos van siendo sustituidos por clases. El proceso se detiene cuando se ha alcanzado un número de clases igual al número de clases que había sido establecido a priori o cuando se ha alcanzado un umbral de distancia entre clases por encima del cual no debe continuarse. El resultado final de un proceso de clustering suele ser un dendrograma (ver figura N°42) en el que puede verse como los diversos individuos se aglutinan en clases, primero los que están a un menor distancia (los más parecidos), y como posteriormente las clases se unen entre si. A partir de un dendrograma podemos elegir el número de clases que queremos mantener en función de diferentes criterios.

Cuando se utiliza en teledetección, el cluster jerárquico no utiliza todos los píxeles (debido a su elevado número) sino que se toma una muestra para clasificarla. En todo caso el tamaño muestral es demasiado grande como para que la salida pueda ser un dendrograma. En su lugar la salida es un conjunto de clases (el número de clases que hayamos decidido buscar) con sus signatures espectrales. En general es conveniente tratar de buscar con el clustering más clases de las que sospechamos que luego pueden agruparse sin dificultad.

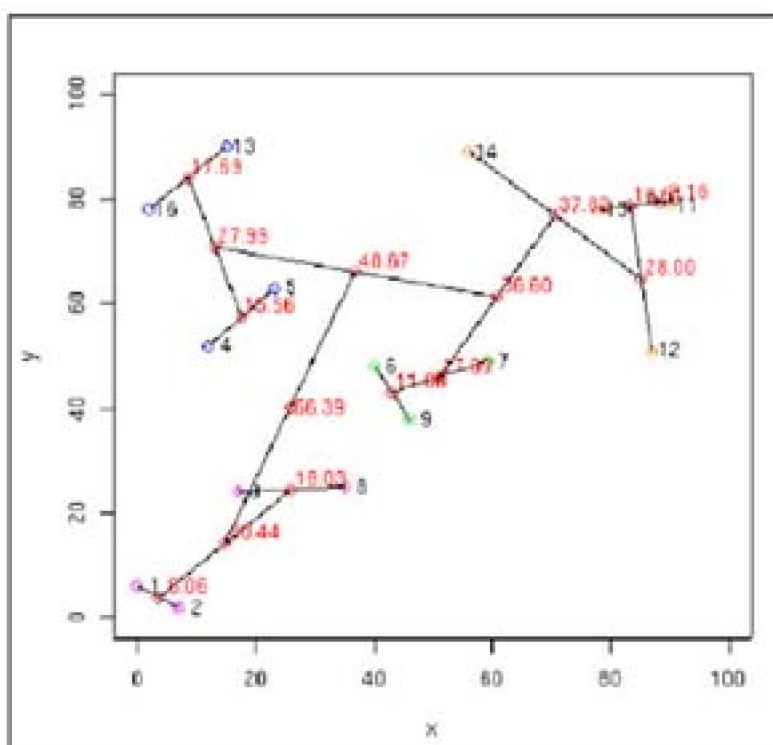


*Figura N°42: Método Isodata*

En la figura N°42, vemos gráficamente como se van asignando los píxeles según el método de isodatas al determinar primero los centros de clases para luego volverse un proceso iterativo.

Para la clasificación no supervisada nosotros utilizamos el algoritmo Isodata y el número de clases iniciales se fijó en 16, como la idea es clasificar los cuerpos de agua existentes en el área de estudio, no nos interesa mucho las coberturas del terreno diferentes a esta categoría por lo que la clasificación se hace mas sencilla en cuanto a la parte estadística ya que como sabemos el umbral de los valores de brillo del agua no varia tanto, y la idea mas que nada es demostrar la eficiencia de la aplicación de la Corrección por Sombras para disminuir precisamente los errores inducidos por los niveles digitales de valores muy bajos que suelen confundirse con cuerpos de agua y que su valor se debe mas bien a la sombra producida por el relieve y la fuente de iluminación para posiciones determinadas.

A continuación presentamos los resultados obtenidos en la clasificación digital de cuerpos de agua, tal y como lo procesa el algoritmo de agrupamiento, cabe señalar que este método se aplicó a todas las imágenes tanto la original como a las corregidas por los diferentes métodos y solo se presentaran la imágenes con las que se obtuvieron mejores resultados visuales, y su respectiva comparación con la imagen original es decir la que no ha sido corregida por el sombreado topográfico.

En la figura N° 43 (1), se puede ver la gran influencia que tienen las sombras al realizar el agrupamiento de clases mediante el método de isodata, ya que la clase que debe agrupar a los cuerpos de agua, se confunde con las sombras presente en la imagen

por tener ambas baja reflectancia.

La clasificación no supervisada realizada sobre la imagen que había sido corregida por el métodos de la correccion C (pendiente suavizada), fue la que presentó mejores resultados visuales como se puede observar en la figura N°43 (4), se nota la clara disminución de los píxeles que generan confusión en la detección de cuerpos de agua, de allí le siguen la corrección C, figura N°43 (2) y el método de Minnaert, figura N°43 (3).

Cabe señalar que a todas la imágenes se les aplico en mismo número inicial de clases (16 clases), al momento de realizar la clasificación supervisada de allí que se puede deducir la mejora que se produce en la clasificación no supervisada si previamente la imagen ha sido corregida por el efecto del sombreado topográfico.

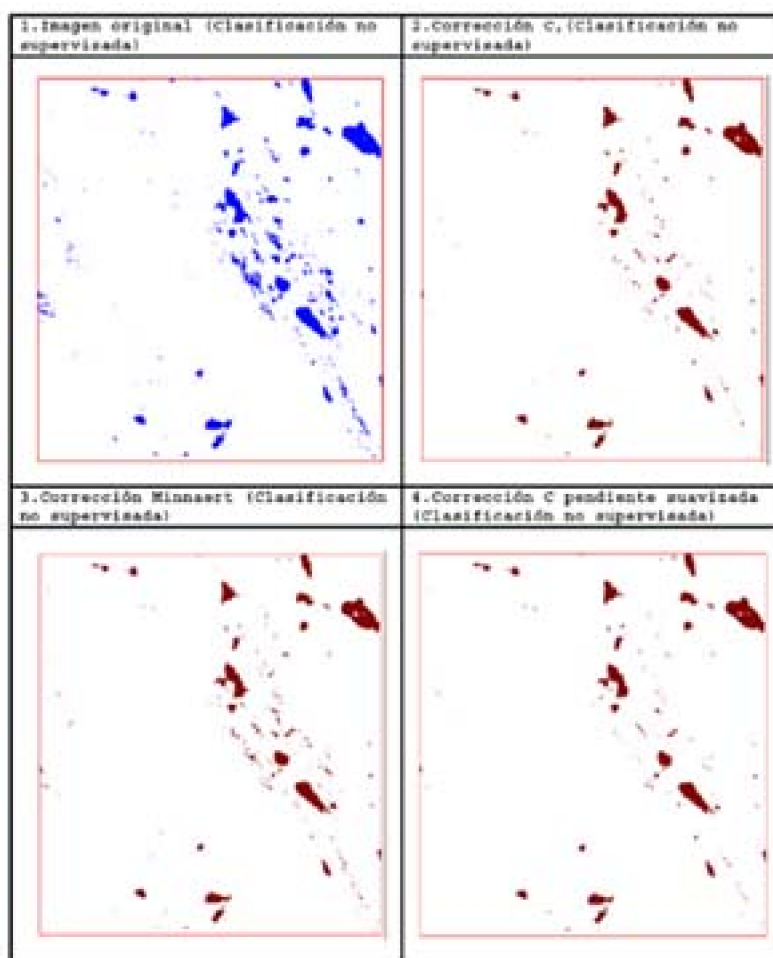


*Figura N°43: Resultados Obtenidos con la Clasificación No Supervisada.*

#### **5.1.2.2. Clasificación Supervisada**

La clasificación supervisada se basa en la disponibilidad de áreas de entrenamiento. Se trata de áreas de las que se conoce a priori la clase a la que pertenecen y que servirán para generar una signature espectral característica de cada una de las clases. Se denominan clases informacionales en contraposición a las clases espectrales que genera

la clasificación no supervisada ya que estas ya tienen un significado temático explícito.

Los campos de entrenamiento para nuestro caso eran dos solamente, ya que queríamos discriminar cuerpos de agua de los que no lo eran, para luego entrar a la fase de asignación de píxeles existiendo diferentes métodos para dicha asignación, entre los mas conocidos son el de mínimas distancias y el de máxima similitud.

Se aplicaron estos dos métodos obteniéndose mejores resultados con el de máxima similitud, pero lo resultados no fueron superiores a los obtenidos mediante la clasificación no supervisada; ya que estos métodos necesitan del ingreso de un número elevado de campos de entrenamiento a priori y nosotros sólo contábamos con dos.

Los resultados obtenidos con la clasificación supervisada se muestran en la figura N°44, de aquí vemos que el método de clasificación que funciono mejor fue el de máxima similitud figura N°44 (3) pero aun existiendo píxeles que no pertenecían a la clase cuerpos de agua, y el método de clasificación menos optimo fue el de mínimas distancias ver figura N°44 (2).

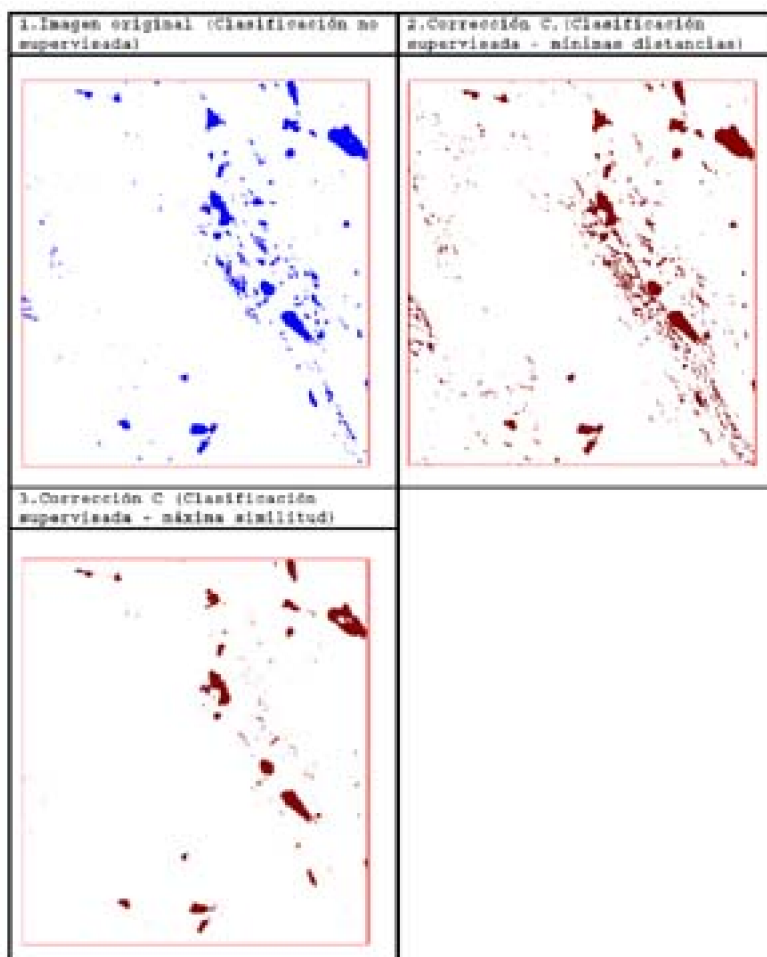


*Figura N°44: Resultados Obtenidos con la Clasificación Supervisada.*

#### 5.1.2.2. Clasificador en Árbol

Uno de los métodos más sencillos, pero también más eficientes de clasificación alternativa es el denominado clasificador en árbol o árbol de decisión, traducido del inglés (decision tree classifier). La idea de fondo consiste en discriminar cada una de las categorías, de acuerdo a unos criterios seleccionados por el intérprete. Por ejemplo, puede reconocerse las láminas de agua por un ND inferior a un cierto umbral en la banda infrarroja, o la vegetación por una combinación de cierto umbral en el visible e infrarrojo cercano. En su origen, estos criterios estaban basados exclusivamente sobre los datos espectrales de la imagen, pero en los últimos años se ha promovido el empleo de este tipo de criterios de decisión considerando igualmente variables auxiliares, como mapas de suelos, modelos digitales de elevación, modelos de pendientes, etc. Todo lo que pueda ayudar en la mejor identificación de la o las clases informacionales elegidas.

El ejemplo que nos ocupa (ver figura N°45), es el árbol de decisión construido para realizar nuestra clasificación de cuerpos de agua en nuestra imagen de estudio, se seleccionó la imagen corregida por la corrección C pendiente suavizada, ya que esta es fue la que presentó mejor resultado visual después de la corrección por el sombreado topográfico de aquí se selecciona un umbral de píxeles que serán considerados como cuerpos de agua en las tres bandas que forman la imagen o en una clasificación no supervisada como fue nuestro caso, la variable auxiliar que utilizamos a la hora de la asignación de píxeles, fue un modelo digital de pendiente que contribuyo mucho a aislar aquellos píxeles de agua que en gran medida se confundían con sombra y que debido a su elevada pendiente no podría ser considerados dentro de esta categoría.

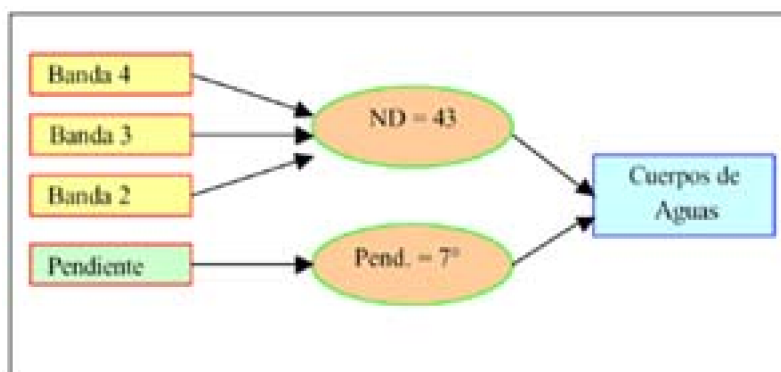


*Figura N°45: Clasificador en Árbol*

La figura N°45, muestra el clasificador en árbol construido para la discriminación de cuerpos de agua en nuestra imagen de estudio.

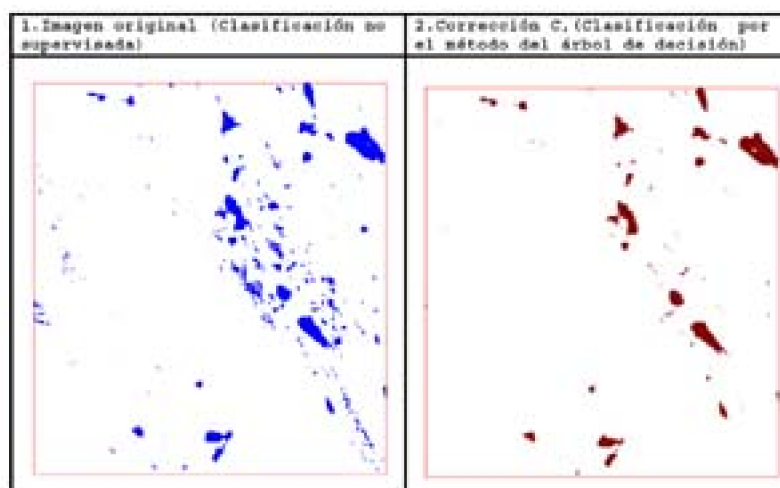


*Figura N°46: Resultados Obtenido con el Clasificador en Árbol*

En la figura N°46, podemos ver la imagen después de haber aplicado el clasificador en árbol, como vemos se reducen en gran medida los píxeles sin un significado aparente gracias al aporte del modelo de pendiente.

El clasificador en árbol permitió la inclusión de un modelo digital de pendientes del área de análisis, que ayudó mucho a aislar aquellos píxeles en sombra que se confundían con cuerpos de agua y que debido a su elevada pendiente no podría serlo, esto siempre era cotejado con información adicional no vaya a deberse a un error de omisión o comisión.

Para realizar el clasificador en árbol se construyó una sentencia en la calculadora de mapas del Arcview, sobre una imagen binaria (0,1) que obtuvimos producto de una recategorización de valores de la clasificación no supervisada que se hizo sobre la imagen corregida por el sombreado topográfico definiendo como 1 la presencia de cuerpos de agua y 0 cualquier otra categoría existente en la imagen, en este punto se incluyo el modelo raster de pendientes probando con varios umbrales de tolerancia este se fijo a valores de pendientes menores o iguales a 20° grados de esta manera se va ajustando el modelo de árbol hasta que se producen los resultados mas aceptables. En este momento empieza la parte visual de la clasificación revisando todas las clases asignadas al tema agua y viendo si realmente podría existir una laguna o lagos o quizás un bofedal como resultado en muchos de los casos. Posteriormente se realiza unos filtrados simultáneos dentro de la imagen clasificada para reducir los píxeles sin significado temático.

### 5.1.3. VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS

Con respecto a la validación de los resultados tenemos que separarlos en dos partes una validación estadística y una visual.

En lo que respecta a la validación estadística se presenta un cuadro con los resultados obtenidos después de aplicar cada método de corrección del sombreado topográfico sobre la imagen de estudio el cual nos muestra la eficacia de cada uno.

Del cuadro N°4, podemos ver los resultados estadísticos obtenidos después de aplicar los diferentes métodos de corrección del sombreado topográfico; los métodos que presentan un mejor resultado estadístico son la corrección C y la de Minnaert ya que el coeficiente de determinación es casi cero, lo que indica una clara independencia entre las dos variables analizadas, como sabemos lo que intentamos hacer con la corrección por sombras es independizar el comportamiento de cada banda con respecto al modelo de iluminación en sí, es decir que la variación de los niveles digitales de cada cobertura existente en la imagen se deba más al distinto tipo de cubierta de terreno que a la influencia de la iluminación solar.

Los peores resultados se obtienen con la corrección del coseno, como vemos al existir un cociente en la formula y cuando existe una división entre cero, es decir un píxel en sombra se crean píxeles sin información en la imagen final.

Todos los métodos tienden a aumentar su coeficiente de determinación a medida que aumenta la longitud de onda.

En lo que respecta a la parte visual existen varias maneras de validar los resultados, nosotros optamos por efectuar una clasificación no supervisada, supervisada y un clasificador en árbol tanto sobre la imagen original como sobre la imagen corregida para finalmente analizar visualmente los resultados obtenidos, de esta manera tendremos una idea de que tan buena resultó la corrección por sombras, y si será necesario aplicar algún procedimiento extra como podría ser algún tipo de filtrado.

### **5.1.3. PRODUCCIÓN CARTOGRÁFICA**

---

Como resultado del tratamiento digital efectuado a la imagen de satélite, se obtiene un producto mejorado y listo para su impresión e interpretación, así como, producto de la clasificación digital, se obtiene un mapa con valor agregado, es decir con información actualizada en lo que respecta a los cuerpos de agua existentes en la zona de estudio.

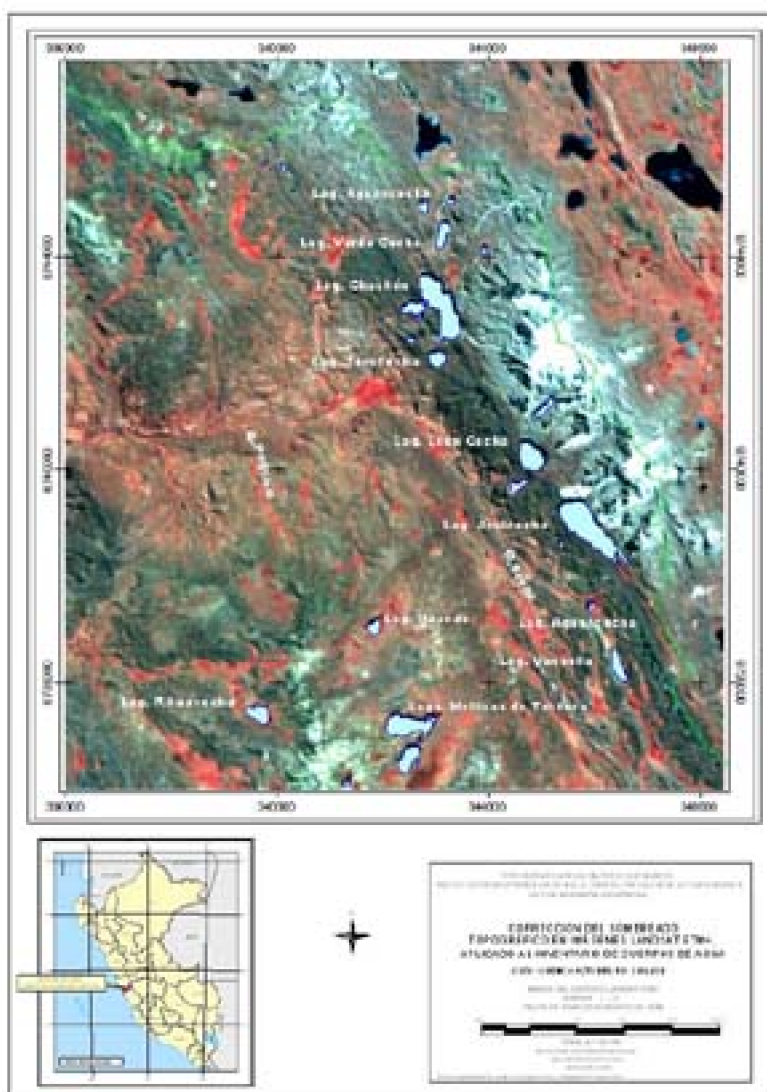


Figura N°47: Producción Cartográfica, El producto final es una imagen corregida por el sombreado topográfico superpuesta con los cuerpos de agua delimitados.



## CAPITULO VI: DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

### 6.1. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos mediante la aplicación de los diferentes métodos de corrección del sombreado topográfico, muestran que el método de la corrección C, el método de Minnaert y una variación de la corrección C por un suavizado en la pendiente, dan los mejores resultados tanto estadísticos, ya que los mayores coeficientes de determinación se encuentran en los métodos antes mencionados, y visuales; no existen píxeles sin información y la imagen mantienen su integridad (ver figura N°39 y cuadro N°4).

En cuanto al método que ha dado los peores resultados están la corrección del coseno (ver figura N°48), ya que aparecen algunas píxeles sin significados en color negro, esto debido a que cuando el denominador es un valor muy pequeño y al ser multiplicado por el nivel digital se crea un valor muy grande que ocasiona una desproporción en el brillo de la imagen, otro caso es cuando se cuentan con áreas de sombra en la cual la radiación directa no existe solo predomina la difusa y al no poderse valorar debido a la falta de información se produce una división entre cero lo que ocasionan valores de no Data dentro de la imagen resultante dando como resultados

píxeles sin información. En lo estadístico se puede decir que en este método el coeficiente de determinación es más alto que en los demás métodos aplicados.

En lo que respecta a la clasificación digital efectuada en la imagen Landsat ETM+, nos ha servido para comparar los cuerpos de aguas obtenidos de ésta, con la cartografía existente al 100 000 del IGN, ya que al superponer el mapa de lagunas con la clasificación digital obtenida, se nota una marcada mejora en la delimitación de los contornos del espejo de agua; asegurando de esta manera un mayor grado de detalle y una actualización en cuanto a extensión se refiere.

Dentro del trabajo pudimos notar muchos casos particulares como el de los Bofedales (zonas hidromórficas), que en algunos casos llegaban a confundirse con pequeñas lagunas, esto debido quizás a la variación temporal del área de estudio, o desecamiento de éstas por diversos factores; por este motivo es importante mantener una cartografía actualizada para observar los cambios producidos en la cartografía de cuerpos de agua.

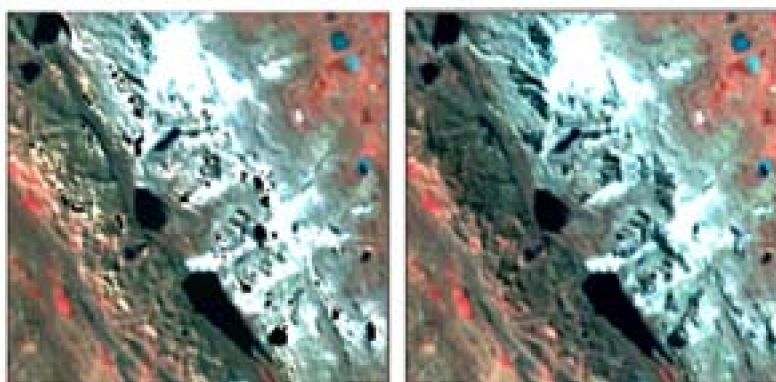


*Figura N°48: Comparación de Métodos, Se aprecia la corrección del coseno (izquierda) junto a la corrección por el método de la corrección C con pendiente suavizada (derecha), vemos claramente los píxeles mejorados dentro de la segunda imagen ya que en la primera aparecían como píxeles sin información.*

# CAPITULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## 7.1. CONCLUSIONES

- La corrección del sombreado topográfico se hace necesaria al momento de realizar una clasificación digital, ya que ayuda a disminuir la variabilidad entre las diferentes clases espectrales.

- En la clasificación de cuerpos de agua es muy útil que la imagen a clasificar sea corregida por el sombreado topográfico, ya que los niveles digitales de los píxeles en sombra son muy parecido al de los cuerpos de agua generando una confusión entre una clase con un significado temático y otra sin un significado aparente.

- Para la aplicación de la corrección por el sombreado topográfico se debe contar con la información de azimut solar y elevación solar para las escenas que quieren corregirse, este valor debe ser facilitado por el proveedor de la imagen ya sea directa (los valores propiamente dichos) o indirectamente (fecha y hora en que la imagen fue captada).

- De los métodos empleados para la corrección del sombreado topográfico podemos concluir que la corrección C y la corrección de Minnaert son las que brindan los mejores resultados siendo el primero más rápido y fácil de aplicar y construir en cualquier

programa de imágenes e incluso SIG.

- Se concluye que el método del coseno en sus dos variantes son los que dan los resultados más pobres al momento de efectuar la corrección del sombreado topográfico.

- Todos los métodos aplicados pueden ser combinados con el método de la pendiente suavizada cuando esto sea necesario consiguiéndose un mejor resultado cuando es aplicado a la Corrección C, quedando esto a criterio del especialista.

- La utilización de un clasificador en árbol para el cartografiado de cuerpos de agua resulta mucho más eficiente que los métodos convencionales de clasificación, como el clasificador de mínimas distancia, paralelepípedo e Isodata, ya que se pueden incluir otras variables como la pendiente lo que permite establecer un umbral a priori de delimitación en donde un valor fuera de este umbral significara la no existencia de un cuerpo de agua.

- La información generada sirve, en la producción de inventarios de lagos, lagunas y humedales manteniendo al día la cartografía de recursos hídricos. Así como para el monitoreo y previsión de desastres de inundación y en la evaluación de nuevas fuente de agua que puedan ser utilizadas.

- Las imágenes de satélite resultan ser una fuente idónea para la actualización de cubiertas de interés ya que por su carácter sinóptico, flexible y actualizado permiten ir manteniendo al día la base de datos geográfica de los recursos naturales del país como en nuestro caso el recurso agua y a un costo rentable.

## **7.2. RECOMENDACIONES**

- La información del azimuth solar y la elevación solar para la escena que será corregida por el sombreado topográfico, deberá ser proporcionada por el proveedor de la imagen se recomienda tener en cuenta esto al adquirir cualquier escena, este valor puede venir en el fichero de cabecera de la imagen de una manera explícita es decir propiamente los valores de azimuth y elevación solar o de una manera implícita es decir con el valor de la fecha y hora se podrán calcular estos.

- El empleo de la corrección C resulta un método sencillo y fácil de construir, además que toma en cuenta el comportamiento no Lambertiano de las superficies, se recomienda su uso ya que es más simple de elaborar que el método de Minnaert y se obtienen resultados muy similares.

- Ante la necesidad de incorporar un modelo de elevación digital DEM, para poder efectuar la corrección del sombreado topográfico además de incluir este en la fase de clasificación se hace necesario contar con curvas de nivel al 25000 ya que mientras el intervalo entre curvas es más pequeño, mayor grado de detalle tendrá el DEM y por ende los resultados serán más realista.

- El modelo de elevación digital deberá pasar por una serie de revisiones antes de que pueda ser incluido en la corrección del sombreado topográfico ya que la aparición de

artefactos extraños en la interpolación afectaran los resultados posteriores, por lo que se recomienda una vez construido el DEM efectuar un sombreado analítico con cualquier valor de azimut y elevación ya que esto ayudara a detectar errores groseros productos de la interpolación que podrán ser corregidos antes de realizar el proceso de corrección.

- Otra especial cuidado se debe tener en cuenta al momento de realizar las regresiones entre bandas y la imagen conteniendo el valor del coseno del ángulo de incidencia ya que si existen valores de elevada frecuencia como sucedería en un área costera por la presencia del mar o debido a la rotación en el proceso de georeferenciación deberán de ser omitidos para no tener un valor errado en el resultados de la regresión lineal. Se recomienda aislar el área de interés o tomar una muestra de puntos significativa y no empleando toda la extensión de la imagen al efectuar la regresión.

- En estos tipo de trabajo como es identificar y delimitar cuerpos de aguas se recomienda hacer la fusión de imágenes pancromáticas con multiespectrales esto para poder lograr una mayor exactitud y precisión en la delimitación de los espejos de agua, ya que se puede aumentar la escala de trabajo de una imagen Landsat de una escala de 1: 80 000 hasta 1:25 000 aproximadamente siempre y cuando se cuente con una banda pancromática de mayor resolución espacial (banda 8 del Landsat 15 metros de píxel por ejemplo).

- Al tratarse de una cubierta como el agua que es relativamente fácil de discriminar, sobre todo en las bandas de longitud de ondas largas como el infrarrojo medio, se asegura una precisión por encima del 70 % en los resultados obtenidos.

- Se recomienda validar los resultados con un trabajo de campo, a fin de asignarle un valor de fiabilidad estadística en cuanto a la precisión de la clasificación digital



# GLOSARIO

**Componente Estocástica:** La mayor parte de los procesos naturales poseen una componente estocástica (probabilística) que hace poco plausible una modelación determinista de los mismos.

**Comportamiento lambertiano:** Se dice que una superficie posee un comportamiento lambertiano cuando es un reflector perfectamente difuso, donde el brillo aparente es igual en todas las direcciones de vista.

**Curva de distribución espectral:** Viene a ser un grafico de dos variable en el eje “x” tenemos las longitudes de onda mientras que en el eje de las “y” tenemos la cantidad de energía reflejada por cada cubierta de interés a una determinada longitud de onda. Para cualquier material dado, la cantidad de radiación que es reflejada (absorbida, transmitida) variará con la longitud de onda. Esta importante propiedad de la materia nos permite que las diferentes sustancias o clases puedan ser identificadas y separadas por su curva de respuesta espectral.

**Dendrograma:** Tipo de representación gráfica o diagrama de datos en forma de árbol, que organizan los datos en subcategorías que se van dividiendo en otras hasta llegar al nivel de detalle deseado.

**Dosel:** Referido a la cobertura vegetal, corresponde a la masa foliar de los diferentes estratos o niveles de vegetación que se encuentran en el bosque.

**Emitancia:** Energía emitida por radiación desde una superficie por unidad de tiempo y de superficie (cantidad de energía que se transmite cada segundo por cada metro

cuadrado de la superficie emisora). Puede hablarse también de emitancia espectral.

**Espectro electromagnético:** Es el rango de radiación electromagnética desde las ondas cósmicas hasta las ondas de radio, caracterizadas por su frecuencia y longitud de onda.

**ETM+:** ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), sensor ubicado a bordo del satélite Landsat7 es el último satélite del programa Landsat, financiado por el gobierno de los Estados Unidos. Fue lanzado en abril de 1999.

**Firmas espectrales:** Registro de la distribución espectral y de las intensidades correspondientes de la energía reflejada o emitida por un objeto o clase de objetos por medio de las cuales se puede hacer una identificación.

**Fotones:** Partícula elemental responsable de la fuerza electromagnética. La radiación electromagnética, está constituida por fotones, y cada tipo de radiación electromagnética se caracteriza por tener sus propios fotones, existiendo así fotones de luz visible, de luz infrarroja, luz ultravioleta, de rayos X, etc. Los fotones carecen de carga y se mueven siempre a la velocidad de la luz.

**Función bivariable:** Función que permite el Análisis del comportamiento conjunto de dos variables.

**Irradiancia:** Concepto similar al de emitancia pero ahora referido a la energía que llega a un cuerpo a través del espacio procedente de otro (que la ha emitido). Análogamente puede hablarse también de irradiancia espectral.

**Modelización:** Acción de modelar. Un modelo viene a ser una representación simplificada de la realidad en la que aparecen algunas de sus propiedades. Los modelos se construyen para conocer o predecir propiedades del objeto real.

**Modelo Digital de Elevación (DEM):** Los modelos digitales de elevación vienen a ser capas raster continuas, en la cual el valor del archivo representa la elevación para un determinado punto del terreno.

**Nivel Digital (ND):** Valor numérico, a partir del cual se realiza el tratamiento digital de las imágenes. Cada píxel tiene un valor numérico entero o real, que corresponde al nivel digital (ND) percibido, el cual se traduce en un valor de gris en la pantalla o nivel visual. El arreglo de varios píxeles genera la imagen que se puede interpretar como una matriz con coordenadas fila.

**Píxel:** Es la unidad visual más pequeña que se puede representar en una imagen de satélite. El sensor detecta la radiancia media de un objeto sobre la superficie equivalente al tamaño del píxel.

**Radiación electromagnética:** Emisión de energía en forma de ondas de naturaleza electromagnética.

**Radiancia:** Se define por radiancia al cociente entre la intensidad luminosa emitida por una superficie y el área aparente de la misma, para un observador lejano.

**Reflectancia:** Razón entre la radiación recibida y la reflejada por un objeto.

**Reflectividad:** o albedo, es la parte de la irradiancia que refleja la superficie

receptora, se mide en tantos por uno y se considera por tanto adimensional, es diferente para cada superficie receptora y para cada cuerpo.

**Respuesta espectral:** Parámetros que son característicos de la radiación reflejada o emitida desde un objeto. Habilidad de un sistema de sensado para responder a las mediciones de radiación dentro de la banda espectral.

**Rupturas de pendiente:** Cambios bruscos que se dan en el terreno ocasionados por algún elemento natural como un río o alguna edificación creada por el hombre (reservorio, presas) y que tienen que ser tomados en cuenta al momento de generar el modelos de elevación digital.

**Topología:** En un Sistema de Información Geográfica (SIG), se le llama a las relaciones espaciales entre los diferentes elementos gráficos (cerca de, entre, adyacente a, etc.) y su posición en el mapa. Estas relaciones, que para el ser humano pueden ser obvias a simple vista, el software las debe establecer mediante un lenguaje y unas reglas de geometría matemática.

**Transmitancia:** es la parte de la irradiancia que transmite la superficie receptora, se mide en tantos por uno.

**Variables concurrentes:** unas variables son concurrentes si existen simultáneamente. Los procesos concurrentes pueden funcionar en forma totalmente independiente unos de otros, o pueden ser asíncronos, lo cual significa que en ocasiones requieren cierta sincronización o cooperación.



## BIBLIOGRAFÍA

- ADVANCED REMOTE SENSING TECHNIQUES FOR MONITORING COMPLEX ECOSYSTEMS: SPECTRAL INDICES, UNMIXING, AND CLASSIFICATION OF WETLANDS Yoshiaki Yamagata A dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy (Macro Science) in The University of Tokyo 1997.
- BERRY, J.K. 1988. Fundamental Considerations in Computer-Assisted Map Analysis. GIS/LIS Proceedings: 273-284. San Antonio, Texas.
- BOSQUE, JOAQUIN B. 2000. Sistemas de Información Geográfica. Madrid, Ediciones Rialp.
- CANADIAN J. REMOTE SENSING, Vol. 28, No. 2 pp. 139-155, 2002.
- CARTER, J.R. 1988. Digital representation of topographic surfaces. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.54(11):1577-1580.
- COLBY, J.D. 1991. Topographic normalization in rugged terrain. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.57:531-537.
- CHAVEZ, PAT S. 1988. An Improved Dark-Object Subtraction Technique for Atmospheric Scattering Correction of Multispectral Data. Remote Sensing of Environment, 24:259-479.
- CHAVEZ, PAT S. 1996. Image-Based Atmospheric Corrections-Revisited and Improved, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.62, No.9:1025-1036.

- CHUVIECO, EMILIO S. 1996. Fundamentos de Teledetección Espacial. Madrid, Ediciones Rialp.
- DOLTON, L. AND DUEKER, K.J. 1986. A comparison of functionality of grid and vector data structures in a microcomputer environment. En Niemann (Ed.) vol.1: 214-231.
- ERDAS FIELD GUIDE. 1995. Third Edition Reprinted 1995, Printed in the United States of America.
- ESRI. 1990. Guide Avenue, Redlands, California: Esri, inc.
- ESRI. 1990. Guide Spatial Analyst, Redlands, California: Esri, inc.
- ESRI. 1990. Guide 3D Analyst, Redlands, California: Esri, inc.
- FELICÍSIMO, ÁNGEL M. 1994. Modelos digitales del Terreno. Introducción y aplicaciones a las Ciencias Ambientales. Pentalfa Ediciones Oviedo.
- FRANKLIN, J. 1986. Thematic Mapper Analysis of Coniferous Forest Structure and Composition. *International Journal of Remote Sensing*. Vol.7. No. 10. pp. 1287-1301.
- GARCIA, ERICK G. 2003. Corrección por efecto de sombras en las imágenes de satélites. En: ENCUESTRO CIENTIFICO INTERNACIONAL DE INVIERNO ECI 2003I: del 30 de julio al 2 de agosto del 2003. Lima, ZUM - Universidad de Lima.
- HORN, B. K. P. AND SJOBERG, R. W. 1979. Calculating the Reflectance Map, *Applied Optics*, Vol.18, No.11, 1770-1779.
- ILLUMINATION CORRECTION OF LANDSAT TM DATA IN SOUTHEAST NSW. 1999. Elizabeth Roslyn McDonald, Xiaoliang Wu, Peter Caccetta and Norm Campbell (ERIN).
- MARKHAM, B.L., AND BARKER, J.L. 1986. Landsat MSS and TM post-calibration Dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at-satellite temperatures. EOSAT Landsat Technical Notes, v.1:3-8.
- MASATANE K. 2001. ASTER Data Utilization for Wetland Mapping and Forest Mapping. ERSDAC.
- MEYER et al. 1993. Radiometric corrections of topographically induced effects on Landsat TM data in an alpine environment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 48(4):17-28.
- MINNAERT, J. L., AND G. SZEICZ. 1961. The Reciprocity Principle in Lunar Photometry. *Astrophysics Journal*, Vol.93:403-410.
- ONERN. 1975. Inventario y Evaluación de los Recursos Naturales de la Zona del Proyecto Marcapomacocha. Volumen I Y II.
- OMM – UNESCO. 1998. Evaluación de los Recursos Hídricos. Manual para la Estimación de las Capacidades Nacionales.
- ONERN. 1980. Inventario Nacional de Lagos y Lagunas y Represamientos Segunda Aproximación.
- RAMANATHAN S. 2004. Using Remote Sensing Data to Study Wetland Dynamic in Iowa. Department of Geography University of Northern Iowa.
- REMOTE SENSING OF RIVERINE WATER BODIES. 2000, Bryony Livingston, Paul Frazier and John Louis Farrer. Research Centre Charles Sturt University.
- SMITH, 1980. The Lambertian assumption and Landsat data. *Photogrammetric*

Engineering and Remote Sensing, 46(9):1183-1189.

WATSON, D.F. and PHILIP, G.M. 1985, A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation. Geo-Processing, 2: 315-327.

WOODHAM AND LEE. 1985, Photometric method for radiometric correction of multispectral scanner data. Canadian Journal of Remote Sensing, 11(2):132-161.

TEILLET, et al. 1982. On the Slope-Aspect Correction of Multispectral Scanner Data. Canadian J. Remote Sensing, 8(2):84 – 106.