

DESARROLLO DE UN INDICE DEL ESTADO TROFICO MEDIANTE EL USO
DE PERCEPCION REMOTA (EMBALSE RAPEL, CHILE CENTRAL)

Tesis

Entregada a la

Universidad de Chile

en cumplimiento parcial de los requisitos

para optar al grado de

Magister en Ciencias Biológicas con Mención en Ecología

Facultad de Ciencias

por

Leonardo Patricio Lavanderos Gallardo

Septiembre, 1989

Tutor: Profesor Vivian Montecino Banderet



FACULTAD DE CIENCIAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

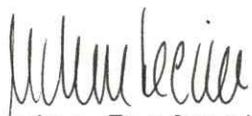
INFORME DE APROBACION
TESIS DE MAGISTER

Se informa a la Escuela de Postgrado de la Facultad de Ciencias que la Tesis de Magister presentada por el candidato

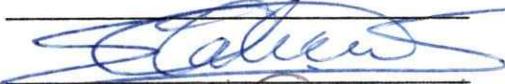
Leonardo Patricio Lavanderos Gallardo

ha sido aprobada por la Comisión Informante de Tesis como requisito de tesis para el grado de Magister en Ciencias Biológicas con mención en Ecología.

Patrocinante de Tesis


Vivian Motecino Banderet

Comisión Informante de Tesis




INDICE

Lista de Figuras	i
Lista de Tablas	iii
Dedicatoria	v
Agradecimientos	vi
Resumen	vii
INTRODUCCION	1

CAPITULO I FISICA DE LA INTERACCION DEL COMPONENTE PARTICULADO EN SUSPENSION Y LA SEÑAL DEL MSS LANDSAT

1.1 Consideraciones generales	12
1.2 Variables físicas asociadas a la calidad del agua y señal Landsat	13
1.3 Efecto de la concentración y el tamaño de las partículas sobre la señal del MSS Landsat	17
1.4 Variables físicas que introducen ruido a la señal del objeto	19
1.5 Corrección de los efectos atmosféricos y de ángulo solar (Modelo de Turner & Spencer 1972)	21

CAPITULO II APLICACION DE LA TECNICA DE ANALISIS MULTITEMPORAL EN ESTUDIOS DE SEDIMENTOS SUPERFICIALES EN SISTEMAS LACUSTRES

2.1 Caracterización del área de estudio	25
2.2 Imagen digital y análisis multitemporal	26
2.3 Procesamiento de Información Landsat	29
2.4 Resultados	31

CAPITULO III IMAGEN LANDSAT Y DISEÑO MUESTRAL PARA CUERPOS DE AGUA (EMBALSE RAPEL, CHILE CENTRAL)

3.1 Consideraciones Generales	41
3.2 Datos Landsat	43
3.3 Diseño del tamaño de muestra	46
3.4 Muestreo	47



3.5 Resultados	49
3.6 Discusión y Conclusiones	49

CAPITULO IV APROXIMACION CUANTITATIVA A LA
DISTRIBUCION DE SOLIDOS EN SUSPENSION EN EL EMBALSE RAPEL
MEDIANTE INFORMACION LANDSAT

4.1 Consideraciones Generales	64
4.2 Materiales y métodos	65
Tratamiento de imágenes	67
4.3 Resultados	69
4.4 Discusión y conclusiones	70

CAPITULO V MEDICION DEL ESTADO TROFICO BASADO EN
REFLECTANCIA DE BIOMASA (clorofila-a) PARA EL EMBALSE
RAPEL

5.1 Consideraciones generales	81
5.2 Métodos	84
5.3 Resultados	86
Clorofila y sólidos	86
Clorofila-a y reflectancia infrarroja (banda 3 MSS Landsat)	86
5.4 Desarrollo del índice del estado trófico	88
5.5 Discusión	94
5.6 Conclusiones	99
5.7 Proyecciones	101

Referencias Bibliográficas	108
----------------------------------	-----

Anexo 1	114
---------------	-----

Anexo 2	117
---------------	-----

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Embalse Rapel	..... 36
Figura 2.2	Asociación de color según cambio de intensidad en los niveles de grises	..... 32
Figura 2.3	Pluma de sedimentos Noviembre 1983.....	37
Figura 2.4	Nivel de sólidos en suspensión Noviembre 1983	..... 38
Figura 2.5	Nivel de sólidos en suspensión Febrero 1984	..... 39
Figura 2.6	Análisis multitemporal Noviembre 1983 y Febrero 1984	..... 40
Figura 3.1	Variación línea de orilla para Noviembre 1986 y Febrero 1987	..... 53
Figura 4.1	Distribución y abundancia de sólidos en suspensión 12 Septiembre 1987. Banda 2 MSS	..... 74
Figura 4.2	Distribución y abundancia de sólidos en suspensión 18 Enero 1988. Banda 2 MSS	..... 75
Figura 4.3	Modelo de sólidos en suspensión y reflectancia banda 1	..... 76
Figura 4.4	Modelo de sólidos en suspensión y reflectancia banda 2	..... 77
Figura 4.5	Modelo de sólidos en suspensión y disco Secchi blanco	..... 78
Figura 4.6	Modelo de sólidos en suspensión y disco Secchi verde	..... 79
Figura 5.1	Modelo de clorofila-a y sólidos en suspensión	..... 104
Figura 5.2	Modelo de biomasa (clorofila-a) y reflectancia banda 3	..... 105

Figura 5.3	Modelo de clorofila-a y el índice Beta	.....	106
Figura 5.4	Distribución biomasa según índice β . Embalse Rapel. 18-Enero-88	.....	107

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1a	Frecuencia cuentas digitales banda 1 MSS Noviembre 1986. Embalse Rapel	..... 54
Tabla 3.1b	Frecuencia Banda 1 (0,5-0,6 μm) Embalse Rapel	Febrero 1987. 55
Tabla 3.1c	Frecuencia cuentas digitales Banda 3 MSS Noviembre 1986. Embalse Rapel	..... 56
Tabla 3.1d	Frecuencia Banda 3 (0,7-0,8 μm) Embalse Rapel	Febrero 1987. 57
Tabla 3.2	Parámetros poblacionales de las cuentas digitales para la banda 1: (0,5-0,5 μm})	..... 58
Tabla 3.3	Parámetros poblacionales de las cuentas digitales para la banda 3: (0,7-0,8 μm})	..... 59
Tabla 3.4	Análisis de varianza de las cuentas digitales según estrato	..... 60
Tabla 3.5	Tamaño de muestra calculado según banda 1 y banda 3 para Noviembre 1986 y Febrero 1987	..... 61
Tabla 3.6	Sólidos totales promedio por estrato (mg/l) Enero 1988	..... 62
Tabla 3.7	Análisis de varianza de sólidos totales en suspensión según estrato	..... 63
Tabla 4.1	Modelos de regresión sólidos v/s reflectancia banda 1 y 2 MSS	..... 80
Tabla 5.1	Modelo de regresión simple para clorofila-a y sólidos totales en suspensión	..... 91
Tabla 5.2	Modelos de regresión simple para clorofila-a y reflectancia banda 3 MSS	..... 91
Tabla 5.3	Modelo de regresión para valor β y clorofila-a	..... 92

Tabla 5.4	Rangos para β asociados a los distintos estados tróficos	..... 92
Tabla 5.5	Cálculo de I_p a partir de los valores β	..... 93

DEDICATORIA

A todos los que, con o sin método científico,
han querido transformar este mundo para
recuperar lo bello.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a todos los que creyeron e hicieron posible que este trabajo llegara a su término. En especial a Enero, Septiembre y Octubre.

RESUMEN

En términos de adquisición, análisis y representación espacial de información biótica y abiótica, el uso de la Percepción Remota y los Sistemas de Información Geográfica, ha abierto una nueva perspectiva en el monitoreo y control de procesos medio ambientales asociados a sistemas límnicos.

Actualmente en nuestro país, esta tecnología ha sido empleada en forma experimental en lo que se refiere a monitoreo de cuerpos de agua. En el caso del Embalse Rapel el uso de la imagen multiespectral permitió generar mapas de distribución y abundancia de biomasa fitoplanctónica (clorofila-a) y sedimentos. Esta información es de carácter dinámico y permite a partir de nuevas imágenes satélites predecir los cambios espacio-temporales de las variables mencionadas anteriormente. Lo anterior, se tradujo en optimizar la aplicación de índices de medición asociados al estado trófico del sistema. De esta manera, la información extraída aumentó en precisión y representatividad.

En este trabajo se propone como objetivo principal el desarrollo de un índice de medición del

estado trófico del Embalse Rapel asociado a la reflectancia multiespectral medida por el MSS Landsat. Se toma como base para la construcción del índice la variación espacial y temporal de áreas cuya reflectancia sea relacionable a biomasa fitoplanctónica (clorofila-a).

Se utiliza como marco teórico el concepto de dato geográfico, explicitando la topología a través de la imagen satelital. De esta manera es posible aproximarse a una visión integrada a través del espacio y de la escala de representación.

Debido a la estructura geográfica de nuestro país, el poder calibrar este sistema implica proyectar un conjunto de herramientas tecnológicas hacia el manejo y control de una gran red de sistemas límnicos nacionales.

INTRODUCCION

A partir del desarrollo de la limnología regional o geográfica con Thienemman y Neumann entre 1900 y 1934, se introduce un sistema de ordenación de cuerpos de aguas continentales basado en estudios comparativos de lagos productivos o eutróficos y lagos de baja producción u oligotróficos. Sin embargo, al incorporar la acción del hombre como otro factor de eutrofización, la categorización de sistemas límnicos dentro de un continuo trófico o de producción de biomasa, supera la visión geográfica para incorporar la categoría de sistema y equilibrio biogeoquímico en la columna vertical de cualquier lago (Margalef 1983).

La idea de clasificar dentro del eje oligotrófico-eutrófico, ha permitido el desarrollo de diversos índices que permitan medir la condición o el estado del sistema lacustre a través de la medición de variables de estado como es el caso de la clorofila-a.

Carlson (1977) desarrolló un índice del estado trófico en lagos basado en los valores esperados y observados de visibilidad del disco Secchi a partir de la relación que existía con la concentración de clorofila-a.

Este índice supone que un aumento del estado trófico es el resultado de una duplicación en la biomasa, lo cual se reflejaría en una disminución a la mitad de la profundidad del disco Secchi, generándose por cada duplicación de la biomasa un nuevo estado del lago.

Muchas de estas medidas en términos espacio-temporales son difíciles de implementar, debido principalmente a la extensión de los espejos de agua, las características morfométricas, ubicación geográfica y la accesibilidad al sistema (Khorram 1981, Verdin 1985). Por esta razón, una aproximación a la generalización de las observaciones a todo el sistema es la utilización de técnicas de percepción remota, particularmente la información de satélite. Esta última, es posible de relacionar con variables ambientales a través del desarrollo de algoritmos empíricos entre la información medida en terreno y la información obtenida de satélite.

Por definición la Percepción Remota estudia el comportamiento físico de los objetos a distancia. A manera de ejemplo, serían sensores remotos una cámara fotográfica montada en un avión o un sensor infrarrojo puesto a bordo de un satélite (Córdova et al. 1986).

La información obtenida a través del satélite Landsat ha sido usada de manera cualitativa y cuantitativa en el análisis de sistemas límnicos. La aproximación de

cualitativa consiste en utilizar la imagen propiamente tal para mapeo de calidad de aguas en sistemas lacustres y estuarinos. Mapas de sedimentos en suspensión a partir de datos Landsat fueron desarrollados por Klemas et al. (1973), Kritikos et al. (1974), Wezernac et al. (1976). Las aproximaciones de carácter cuantitativos consisten en aplicar modelos de regresión múltiple para calibrar la información multiespectral del sensor y la variable biótica clorofila-a además de otras variables de calidad de agua (Wezernake 1974, Wrigley & Horne 1974, Scarpace et al. 1979, Lemoalle 1980, Khorram 1982, Verdin 1985, Lavanderos y Pattillo 1988, Lavanderos et al. 1988a).

Trabajos de corrección de datos obtenidos por satélites para reducir el sesgo introducido por problemas como reflectancia de fondo y la consiguiente sobreposición de pixel de borde, fueron abordados por Verdin (1983).

Una etapa fundamental en el mejoramiento de los algoritmos obtenidos entre variables limnológicas y la información de satélite ha sido la introducción de modelos de corrección para disminuir los efectos de dispersión por partículas atmosféricas sobre la señal que recibe el satélite. La calidad del algoritmo radica en la capacidad de disminuir los efectos de inclinación solar y dispersión los cuales introducen interferencia en los datos del satélite. De esta manera podemos predecir los

cambios en las distintas variables de interés, suponiendo condiciones atmosféricas homogéneas de manera que se pueda estimar el estado trófico aún sin disponer información simultánea de terreno.

En el Embalse Rapel, los estudios mediante información de satélite se enmarcan en aproximaciones de tipo descriptivo asociadas a la dinámica espaciotemporal del arrastre de sedimentos en el sistema. Por otra parte, mediante aproximaciones de tipo cuantitativo se han logrado construir mapas de sedimentos en suspensión para zonas marinas litorales del norte de Chile. Estos trabajos desarrollados por Lavanderos y Pattillo en 1985 y 1986 son información de carácter restringido propiedad de CODELCO-Chile, división El Salvador.

Los trabajos de Scarpace et al. (1979) y Verdin (1985), mencionados anteriormente, muestran correlaciones significativas a partir de mediciones limnológicas en estaciones puntuales y la radianza medida por satélite para un mismo día. A partir de estas relaciones se obtuvo ecuaciones empírico-predictivas para la concentración de clorofila-a y transparencia asociada a mediciones del disco Secchi, determinando el índice del estado trófico del cuerpo de agua. Las predicciones hechas a partir de las ecuaciones logradas permiten extrapolar los datos puntuales a todo el sistema a través

de la imagen, generándose un mapa de calidad de agua.

La idea de representar la calidad del sistema a través de una generalización deductiva del espacio lleva implícito el concepto de dato geográfico.

Por definición, un objeto es un dato geográfico si posee atributos espaciales y no espaciales que lo definan (Burrough 1987). Los atributos espaciales se refieren a que al objeto le es asociable un sistema de coordenadas ya sea local o de alguna proyección en particular (UTM) que permita su georeferenciación; además el explicitar sus relaciones con otros objetos (topología). Los atributos no espaciales son los que describen al objeto en sí, ejemplo: lago, embalse, río, etc. En este sentido, es necesario para la desagregación y caracterización de los componentes de un sistema (unidad) tomar en cuenta la estructura espacial de éstos para su representación posterior. El proceso de análisis está asociado a la dialéctica de los procesos inductivos y deductivos en el establecimiento de patrones. Estos últimos son reconocibles a través de la historia del sistema (información generada a partir de investigaciones anteriores) y permiten llegar al restablecimiento de la unidad inicial (Lavanderos & Fonfach, 1989).

La investigación limnológica en el Embalse Rapel

ha estado a menudo fundamentada en procesos inductivos, estudiando los componentes estructurales del ecosistema en uno o varios sitios específicos, sin embargo en su reconstrucción o síntesis, la integración de estos componentes a través del espacio no puede ser generalizado sin la reconstitución del escenario espacial, como por ejemplo, la influencia topográfica en la continuidad de los fenómenos superficiales del embalse.

Por otra parte, el proceso cognitivo inicial en donde el objeto se presenta como un todo no diferenciado (Kedrov 1974) dependerá de la escala espacial de percepción. Es así, como el cambio de escala mediado por el uso de sensores remotos permite entre el objeto y el observador, capturar de forma inmediata la heterogeneidad superficial generada por el sistema.

El poder establecer un modelo predictivo del estado trófico de un ecosistema con fines de monitoreo y control, está íntimamente asociado a la escala espacial y temporal con que se miden sus variables estructurales. De esta manera, el desarrollo de un índice trófico a partir de la radianza medida por el satélite supone que existe una heterogeneidad ambiental asociada al estado del sistema.

Un geosistema está compuesto por tres estructuras

que interactúan entre sí definiendo la condición del espacio utilizado en un intervalo de tiempo. Estas tres son definidas para un espacio determinado como geoma, bioma y la estructura socioeconómica establecida para dicho espacio (Bolos, 1985). De esta manera, el poder establecer relaciones de causalidad en el bioma implica integrar los diversos procesos que se generan en todo el geosistema.

Los procesos que participan de los cambios en la estructura del sistema ocurren en un escenario espacial heterogéneo o anisotrópico. Esto implica que no existe una métrica única en la reconstrucción de los procesos asociados a estos cambios, lo que se traduce en utilizar representaciones espaciales dinámicas a través de tecnología avanzada como es el caso de los Sistemas de Información Geográfica y las diferentes técnicas de Percepción Remota.

En el caso del Embalse Rapel, entendiendo a este último como parte del geoma y como contenedor de parte del bioma local, el desarrollo de un índice trófico implica las siguientes hipótesis de trabajo:

- La heterogeneidad espacial observada en el sistema (Embalse Rapel) es reconstruible en términos de una representación raster.

- Este tipo de reconstrucción permite una operacionalidad sobre todo el sistema.

- El tamaño del pixel permite asociar los cambios en toda la malla de reconstrucción a componentes particulados.

- Las variaciones o perturbaciones al interior de la malla permiten establecer subcomponentes del sistema.

- Mediante este tipo de reconstrucciones es posible establecer relaciones entre el bioma y el geoma del Rapel con el geosistema de la cuenca.

Es indudable que la representación de una unidad ambiental exige una categorización multivariada la cual debe ser integrada a través del tiempo y del espacio. La representación espacial implica considerar una serie de escalas, las cuales permiten optimizar el proceso de discriminación estructural de la unidad, esto es, visualizar las subunidades componentes, si existen, y explicitar las relaciones existentes entre cada una de ellas. Esta anisotropía, se reflejaría en los valores de radianza medida por el satélite. En el caso de sistemas lacustres, esta radianza se explica mayoritariamente por el componente particulado en suspensión (sólidos y biomasa). De esta manera, las variaciones en el tiempo y el espacio de variables de estado como dato geográfico,

son posibles de cuantificar y representar a través del comportamiento espacio-temporal de la radianza.

Este estudio plantea la estimación del estado trófico del Embalse Rapel, mediante la calibración del sensor MSS Landsat 5 (bandas 1, 2 y 3) con información referenciada obtenida en terreno para biomasa fitoplanctónica superficial (clorofila-a), profundidad de pérdida de visibilidad del disco Secchi y la concentración de sólidos en suspensión. Esta calibración permite el desarrollo de algoritmos predictivos en base a la información de imagen y datos de terreno, los que son generalizables a todo el espacio mediante el uso de una representación de grilla.

Las etapas necesarias para la medición del estado trófico del Embalse Rapel fueron las siguientes:

- Desarrollo de un modelo de muestreo intensivo y extensivo a partir de la información espectral de las bandas 1 y 3 del sensor MSS sin información de terreno.

- Desarrollo de algoritmos para relacionar reflectancia medida por las bandas 1:(0.5 - 0.6 μm), 2:(0.6 - 0.7 μm), y 3:(0.7 - 0.8 μm) con biomasa (clorofila-a), sólidos en suspensión y transparencia asociada a disco Secchi.

La organización de esta tesis consta de cinco

capítulos de los cuales el primero entrega una aproximación a los conceptos físicos en los cuales se basa la percepción remota y los problemas con que se enfrenta al momento de realizar este tipo de calibraciones.

Los capítulos II y III muestran las suposiciones asociadas a la representación del sistema, técnicas de seguimiento de procesos superficiales utilizando información del barredor multiespectral (MSS) Landsat, desarrollo de un sistema de muestreo inherente a la representación y la metodología utilizada en terreno, como en laboratorio.

Los capítulos IV y V permiten una primera aproximación a la distribución espaciotemporal de biomasa fitoplanctónica y sólidos en suspensión como consecuencia de las técnicas de percepción remota utilizadas. Finalmente, se propone una generalización de la metodología para la evaluación del estado trófico del Embalse Rapel, concluyendo un índice trófico empírico a partir de las relaciones de la biomasa fitoplanctónica superficial y la reflectancia de la banda 3 del MSS.

El trabajo contiene dos anexos: el primero resume las características del barredor multiespectral (MSS) Landsat, así como diferentes términos utilizados en percepción remota. El anexo 2, resume las fechas de

imágenes utilizadas para este trabajo, así como los mapas de ubicación de las estaciones de muestreo.

CAPITULO I

FISICA DE LA INTERACCION DEL COMPONENTE PARTICULADO EN SUSPENSION Y LA SENAL DEL MSS LANDSAT

1.1 Consideraciones generales

En este capítulo se tratarán las principales interacciones entre la fuente, el objeto y el sensor. De esta manera, se analizarán las diferentes variables que afectan la señal y que están asociadas a las características físicas de la calidad del agua.

Por otra parte, se analizarán los componentes externos al objeto que distorsionan la señal captada por el sensor. Se explicarán las suposiciones hechas para la calibración del MSS Landsat con las variables medidas en terreno como es el caso de los sólidos en suspensión, visibilidad del disco Secchi y biomasa (clorofila-a).

Finalmente se introducirá el modelo de corrección atmosférica de Turner & Spencer (1972) aplicado en este caso.

1.2 Variables físicas asociadas a la calidad del agua y señal Landsat

Existen diferentes variables asociadas a las características de calidad del agua que contribuyen a la señal captada por el sensor MSS de la serie de satélites Landsat. Para nuestro estudio, son relevantes las que contribuyen a la turbidez y al color, debido a que dada su concentración, tamaño, forma, capacidad de refracción y de absorción permiten una señal espectral diferenciable tanto en el espectro del visible como en el infrarrojo cercano.

Por otra parte nos interesa discriminar entre la señal debida a partículas en suspensión y señales de otro origen que son causales de sobrestimación de la turbidez como por ejemplo reflectancia del fondo en áreas de baja profundidad.

Las propiedades ópticas que presenta el agua son función de la irradianza que penetra. Por ejemplo, podemos citar, la reflectancia, calculada como la razón entre la irradianza de salida del medio y la de llegada, y el coeficiente de atenuación vertical de la irradianza de llegada. Sin embargo, éstas no son propiedades del agua misma sino que son producto de la interacción generada entre ésta y el campo lumínico, y son dependientes de

la profundidad y del ángulo solar. De esta manera, se reconocen dos categorías en las propiedades ópticas del agua (Kirk 1983), las propiedades aparentes y las propiedades inherentes. Las primeras son dependientes de la distribución de la radianza en el medio para un punto dado, y toman valores según la radianza en ese punto. Las segundas como el coeficiente de absorción, el coeficiente de atenuación y el coeficiente de dispersión son propiedades intrínsecas del agua que no son afectadas por la distribución de la radianza. Por otra parte, los valores que toman las propiedades aparentes son función de las características del agua, de aquí su utilidad como medida que describe la calidad del sistema.

El interés en las propiedades aparentes, se debe a que el campo de interacción entre la radiación solar y el componente particulado en suspensión es una parte importante de la señal que capta un barredor multiespectral (Anexo 1). Sin embargo, no necesariamente la medida cuantitativa de los cambios cualitativos de un sistema lacustre está determinada sólo por las propiedades aparentes del agua.

A partir de dos características de génesis opuesta como son el color del agua y su turbidez analizaremos las relaciones de la señal que capta el satélite y los ruidos posibles que sobrestimarían

cualquier medida cuantitativa relacionada con calidad de agua.

El color del agua es una propiedad aparente, se debe principalmente a compuestos disueltos y su interacción con la porción visible del espectro electromagnético, esto último se traduce en una alta absorción de la energía solar por parte de estos compuestos, lo que determina un decremento en el flujo energético que llega al sensor satelital. Por el contrario, el elemento particulado causal de la turbidez, actúa incrementando la señal que llega al sensor, debido a que el tamaño de las partículas dispersa o refleja la energía solar.

A partir de la ley de Lambert-Beer para soluciones diluidas es posible explicar las contribuciones de los diferentes componentes del agua a la señal satelital.

La ecuación:

$$I_z = I_0 - \exp^{-Kz} \quad \text{ec. 1.1}$$

predice el flujo energético que llegará a una determinada profundidad (I_z), a partir del flujo inicial que llega a

la superficie (I_0), dependiendo del coeficiente de atenuación (K) y de la profundidad (z).

El coeficiente de atenuación da cuenta de la absorción y de la dispersión para una determinada longitud de onda. De esta manera, encontraremos que bajo ciertas condiciones de concentración de partículas, la atenuación de la parte visible del espectro electromagnético será caracterizable en base a su interacción con éstas. Lo anterior se traduce en una penetración diferencial en el agua de los componentes rojo, verde y azul del espectro visible. Siendo generalmente la del azul la de mayor penetración. Aproximadamente el 50% de la señal espectral correspondiente al azul que llega al sensor proviene de profundidades cercanas a 15 m (Moore 1980).

Por otra parte longitudes de onda mayores, como el rango no térmico del infrarrojo ($0.7 - 1.1 \mu\text{m}$) se absorbe en la capa superficial del agua.

Supongamos un cuerpo de agua en condiciones de profundidad infinita y de aguas claras, esto es, que las interacciones con las diferentes longitudes de onda se deban sólo a las moléculas de agua. Debido a estas condiciones el agua se observará de color azul, esto se conoce como dispersión de Rayleigh. Esta coloración se debe a que las moléculas presentes son menores en diámetro

que la longitud de onda del rango del azul y el ultravioleta.

En cuerpos de agua naturales sólo el 2% de la energía solar que llega inicialmente al sistema es reflejado hacia el sensor (Moore 1980). El material disuelto incrementa la absorción en el agua, traduciéndose en un decremento de la señal satelital, esta información permite obtener patrones o curvas espectrales características del objeto. El material sólido en suspensión, por otra parte, incrementa la reflectancia, y reduce la penetración de la luz en el agua. De esta manera, un sistema como el Embalse Rapel, con gran cantidad de sólidos en suspensión, presentará una gran reflectividad lo que será determinado mediante la imagen satelital.

Por otra parte, es necesario considerar que el MSS Landsat posee 4 bandas (Anexo 1) que permiten determinar comportamientos espectrales característicos de las partículas en suspensión, dependiendo de su naturaleza, tamaño y concentración.

1.3 Efecto de la concentración y el tamaño de las partículas sobre la señal del MSS Landsat

El rango de tamaños posible de sólidos va desde

coloides hasta arena. Los coloides producen dispersión de Mie debido a que el diámetro de las partículas son comparables con la longitud de onda de la energía incidente. Esto significa que dispersarán la longitud de onda del azul más que la del rojo, con lo cual en altas concentraciones (2 mg/l) obtendremos señales espectrales características para este tipo de partículas. Si las concentraciones son medianas o bajas ($< 2\text{mg/l}$), la forma de la curva espectral la determinarán las características de absorción del agua misma.

Por otra parte, si el tamaño de las partículas es un orden de magnitud mayor que la longitud de onda incidente y, si se hallan en altas concentraciones, se producirá una dispersión no selectiva, determinando una curva espectral característica. Lo anterior disminuirá la penetración de la luz en el agua y el flujo será afectado por las características de absorción y reflexión de las partículas en cuestión.

Si bien, las variaciones en reflectancia nos dan cuenta de diferente información, es claro que una contribución imprescindible es el comportamiento espectral de la partícula. Tal es el caso de la curva espectral para clorofila-a, ésta produce una alta reflectancia en el infrarrojo y en el verde y baja en el rojo ($0.6 - 0.7 \mu\text{m}$). Si su concentración es mayor que los sólidos

presentes, la señal medida por las bandas 1, 2 y 3 corresponderá principalmente a la presencia de biomasa (clorofila-a). Esto permite desarrollar algoritmos para su cuantificación a partir de modelos de regresión entre la clorofila-a y la información de estas bandas.

En síntesis, la relación objeto-sensor debe ser formulada en base a las características reflectivas del sistema, las cuales a su vez dependen de la forma, tamaño, cantidad y naturaleza de los sólidos en suspensión que se encuentran presentes.

Una calibración con el fin de obtener estudios cuantitativos de mayor precisión debe tomar en consideración los efectos de interferencia que modifican la señal y que no se deben necesariamente al objeto. Estos son conocidos como fenómenos de dispersión y absorción atmosférica. Ambos efectos son función del ángulo solar.

1.4 Variables físicas que introducen ruido a la señal del objeto

Existen diferentes variables fuera del objeto que contribuyen a la señal captada por el sensor y que para nuestros propósitos de cuantificación deben ser restadas. Principalmente éstas son: ángulo de elevación solar, aerosoles y contenido molecular atmosférico, y

reflectancia especular producida por luz difusa.

El ángulo de elevación solar determina la cantidad de energía que reflejan los objetos. Una parte de esta energía es reflejada en forma especular, a elevaciones solares mayores de 30° la reflectancia especular disminuye. Por otra parte, para elevaciones solares menores de ($< 30^\circ$) el camino que recorre la energía solar aumenta entre el objeto y la capa superior de la atmósfera, aumentando los efectos de dispersión y absorción por parte de esta última.

La reflectancia especular es luz blanca y cambia la intensidad del flujo medido por el sensor, afectando la señal relativa en forma no significativa (Moore 1980). Mediciones de esta componente hechas por Ahern et al. (1977) en lagos canadienses fueron ≈ 0 .

La luz difusa, es menos del 10% de la luz solar y representa menos de un 5% de la señal captada por el satélite. Este tipo de luz no es medible en forma directa y depende de la radianza atmosférica y de la profundidad óptica de la atmósfera (Verdin 1985). Por otra parte Moore (1980) señala que esta puede ser obviada siempre que no se produzcan condiciones de presencia de humos o ángulos solares $\leq 30^\circ$.

Otra variable que introduce sobrestimación de la

cantidad de partículas presentes a partir de la señal de la banda 1 del MSS es la reflectancia de fondo. Este efecto y su corrección empírica se supera a partir de la aplicación de análisis multitemporal de imágenes (Capítulo II y III respectivamente).

1.5 Corrección de los efectos atmosféricos y de ángulo solar (Modelo de Turner & Spencer 1972)

Los efectos de interacción atmosférica modifican la señal reflejada por el objeto ya sea por absorción o dispersión de la longitud de onda que se está midiendo.

La dispersión por moléculas en la atmósfera (N_2 y O_2) afecta principalmente a las longitudes de onda comprendidas entre el ultravioleta, azul y verde ($0.35 - 0.6 \mu m$), sin embargo para longitudes superiores a $1 \mu m$ el efecto es poco significativo (Moore 1980).

Como se explicó anteriormente, dependiendo del tamaño de la partícula y la longitud de onda con que interactúe es posible distinguir tres tipos de dispersión: Rayleigh, Mie y no selectiva. Para nuestros propósitos de calibración y por diseño del sensor MSS nos interesan las que afectan a las longitudes de onda comprendidas entre $0.5 - 0.8 \mu m$ (Anexo 1).

El modelo de corrección propuesto por Turner &

Spencer (1972) para transferencia de radiación supone una atmósfera compuesta por capas plano-paralelas homogéneas limitada por una superficie lambertiana espacialmente uniforme, (atmósfera limpia no absorbente) cuyo contenido de aerosoles o dispersantes es determinado por el rango visual horizontal en la superficie para cada longitud de onda.

De esta manera, utilizando un modelo simplificado de la interacción de la radiación solar con la atmósfera, se propone que la radianza captada por el MSS, es una función lineal de la reflectancia de un objeto en la superficie más el componente de dispersión agregado por la atmósfera (ec. 1.2).

El objeto reflector está expuesto a la irradiación solar superficial (se supone una superficie de distribución homogénea), y su reflectancia dependerá de la transparencia de la atmósfera para ese momento.

$$L_{sat} = r - \Gamma - H_{tot} + L_{at} \quad \text{ec. 1.2}$$

Donde L_{sat} : radianza captada por el MSS

r : reflectancia del objeto

Γ : transmitancia atmosférica

H_{tot} : irradianza total incidente

L_{at} : radianza agregada por la atmósfera

Sin entrar en mayor detalle, la variable T es función de la dispersión y absorción por parte de la atmósfera para diferentes longitudes de onda. Asimismo, H_{tot} es función del ángulo de elevación solar, de la irradianza que llega a la capa superficial de la atmósfera y de la irradianza debida a luz difusa (Fraser 1975, Verdin 1985, Pattillo 1987). De esta manera se contemplan los parámetros discutidos en la sección anterior que introducen ruido en la señal del objeto.

El objetivo de este modelo es restar los efectos producidos por la radianza aportada por la atmósfera (L_p) a la radianza captada por el sensor, a partir de una medida estimativa de la visibilidad en la superficie.

Ahern et al. (1977) proponen que lagos con características oligotróficas sean considerados como reflectores estándar para poder calcular L_p (ec. 1.3).

$$L_t = (L_v + L_s + L_g) - T + L_p \quad \text{ec. 1.3}$$

donde L_v : radianza aportada por el volumen del lago

L_s : radianza aportada por la superficie

L_g : radianza especular por ángulos pequeños

Esta expresión permite calcular la radianza teórica (L_t) del cuerpo de agua.

El modelo nos permite corregir la radianza espectral del reflector (τ) medida por el MSS de manera que podamos restar el componente de radianza añadido por la atmósfera (L_p), así se obtiene la radianza corregida L_c .

Si el resultado es correcto $L_t - L_c \approx 0$

De esta manera, podemos restar a toda la imagen el componente añadido por la atmósfera y aumentar la precisión de nuestros modelos de cuantificación.

El modelo supone que la diferencia entre la información de satélite entre una fecha y otra es producto de la interferencia atmosférica y variaciones en el ángulo solar, esta al ser restada permite predecir o interpolar entre cada imagen suponiendo que los cambios observados son producto de las variaciones experimentadas por el objeto.

CAPITULO II

APLICACION DE LA TECNICA DE ANALISIS MULTITEMPORAL EN ESTUDIOS DE SEDIMENTOS SUPERFICIALES EN SISTEMAS LACUSTRES

2.1 Caracterización del área de estudio

El Embalse Rapel está ubicado en la zona central de Chile (34° 02' 30'' Lat S., 71° 35' Long. W) a 240 m de elevación en el batolito de la costa. El área del embalse es de 137.5 km². Sus aguas son usadas principalmente en la generación de energía eléctrica. "La forma del embalse es dendrítica, semeja una Y. Su perímetro es de 288,62 km y el desarrollo de ribera es alto: 6,89. El volumen del agua embalsada es de 0.32 Km³, el ancho medio es de 3,14 Km. Sus tributarios como el río Cachapoal, desagua cumbres de más de 3.000 m en la Cordillera de los Andes con régimen nivoso típico en su curso alto y con influencia de lluvias en su curso medio inferior. El caudal promedio es 74 m³/seg, basándose en 10 años de observaciones, con un promedio mínimo de 27 m³/seg en el mes de Marzo, aumentando en Julio y Agosto a 130 m³/seg y hasta un máximo de 154 m³/seg en Enero. El Tinguiririca presenta caudales mínimos en Febrero y Marzo (7,2 m³/seg y 6,3 m³/seg) los caudales máximos son en

Julio y en Agosto (70 y 77 m³/seg), con mayor influencia de las lluvias; recibe aportes importantes de otros ríos que están fuera de su ámbito andino." (Cabrera et al. 1977).

Para los efectos de este estudio se reconocen, en base a la reflectancia superficial captada una división primaria de tres zonas marcadamente diferentes (Fig.2.1): el sector Sur oriental está fuertemente influenciado por los principales tributarios como son los ríos Cachapoal y Tinguiririca los cuales aportan una alta cantidad de material en suspensión. El estrato medio (zona 2), adyacente al estero San Rafael, se extiende hasta la confluencia con la tercera zona que corresponde a un área somera influenciada por las aguas del estero Alhué.

2.2 Imagen digital y análisis multitemporal

El término imagen digital se refiere a una función de intensidad de luz en una superficie denotada por $f(x,y)$ (González & Wintz 1981).

Los valores o la amplitud de la función en las coordenadas (x,y) están dados por la intensidad de la imagen en el punto. Al referirnos a $f(x,y)$ como energía, esta toma valores distintos de cero y finitos.

$$0 < f(x,y) < \infty$$

Esta función puede ser considerada como el producto de tres componentes: la intensidad de la fuente (i), la reflectancia por parte del objeto (r) y la interferencia atmosférica (z).

siendo:

$$0 < i(x,y) < \infty$$

$$0 \leq r(x,y) \leq 1$$

$$0 \leq z(x,y) \leq 1$$

Donde:

0 es absorción total y 1 representa reflectancia total para r, 0 transparencia total y 1 absorción total para la atmósfera en el caso de z.

La intensidad $i(x,y)$ depende de la naturaleza de la fuente, $r(x,y)$ de la naturaleza del objeto y $z(x,y)$ de la concentración de partículas atmosféricas.

Si trabajamos con una imagen monocromática el valor que toma f en (x,y) se le denomina nivel de gris. Los niveles de grises pueden tomar valores entre 0 y 1 (valores normalizados), donde 0 es negro y 1 es blanco, a este intervalo se le denomina escala de grises.

La digitalización de las coordenadas espaciales (x,y) son referidas a la muestra de imagen y la amplitud a la cuantificación de los niveles de grises.

Una imagen continua $f(x,y)$ es aproximadamente un arreglo $N \times N$.

$$\begin{array}{r}
 f(0,0) \quad f(0,1) \dots \dots \dots f(0, N-1) \\
 f(1,0) \quad f(1,1) \dots \dots \dots f(1, N-1) \\
 \vdots \\
 f(x,y) = \vdots \\
 \vdots \\
 f(N-1,0) \quad f(N-1,N) \dots \dots \dots f(N-1), (N-1)
 \end{array}$$

Cada elemento (pixel) del arreglo es una cantidad discreta. Consideremos entonces un cuerpo lacustre como un arreglo matricial, donde cada elemento o celda regular contiene información respecto a una variable de interés (ej. sólidos en suspensión, biomasa (clorofila-a)). Esta información es medida a través de la intensidad de reflectancia del objeto en un rango del espectro electromagnético para una determinada coordenada espacial. De esta manera, representamos el espacio como una malla, donde la variación entre un punto y otro se traduce en el cambio en intensidad observado en la celda para dichos puntos.

Al estudiar un fenómeno superficial de un sistema lacustre debemos definir sus características como componente del sistema, ya sea biológico como es el caso del fitoplacton o bien de tipo abiótico como es el caso del tripton (Kirk 1983). La caracterización de la

variable en lo que se refiere a su tamaño, estructura, composición, refractividad, consiste en tipificar un comportamiento particular para las diferentes longitudes de onda en el rango visible y en el infrarrojo no termal (Shannon et al. 1983, Lillesand et al. 1983). Esta caracterización es factible de desarrollar mediante la utilización de las reflectancias asociadas a cada pixel. (Shannon et al. 1983, Lillesand et al. 1983).

En este capítulo, se utiliza el análisis de la imagen con el propósito de establecer la heterogeneidad superficial del embalse Rapel de acuerdo a sus características espectrales superficiales medidas por las bandas 1, 2 y 3 del barredor multiespectral (MSS) Landsat.

Por otra parte, se deriva en el análisis multitemporal de imágenes el cual permite establecer entre dos imágenes de diferentes fechas, áreas en donde las características de los procesos superficiales han permanecido constantes o son han sido de carácter transiente.

2.3 Procesamiento de información Landsat

La imagen Landsat debe someterse a una serie de correcciones con el propósito de eliminar distorsiones de diferente origen. Específicamente las radiométricas, que

resultan por interferencia atmosférica y por ganancia diferencial en los detectores del MSS. Las geométricas, causadas por movimientos de la plataforma donde va instalado el sensor. La aplicación de estas correcciones es indispensable para aumentar la precisión en algoritmos cuantitativos y en la coincidencia de información digital con la base cartográfica que se está utilizando.

Para el caso de estudios de sistemas lacustres, se desarrollaron imágenes multitemporales haciendo uso de técnicas de falso color y se clasificaron áreas respecto a diferentes rangos de reflectancia para la banda 1. Por otra parte, se utilizaron técnicas de filtraje como realce de bordes, además de aumento de contraste para realzar los sedimentos en el agua. Se obtuvo así información respecto a los cambios producidos en el espejo de agua del sistema dentro de un intervalo de tiempo. Se detectaron zonas constantes en el tiempo y el espacio en la entrada de sedimentos además de la evolución direccional en la distribución y abundancia desde un núcleo común hacia diferentes puntos del cuerpo de agua (Fig. 2.1).

La clasificación en base a los patrones de reflectancia encontrados para la banda 1 permitió extrapolar el patrón de reflectancia debida a embancamiento para todo el sistema, ubicando zonas de similares características.

2.4 Resultados

Supongamos un cuerpo de agua oligotrófico (baja concentración de material particulado), la reflectancia en este caso del espejo de agua para la porción del visible y el infrarrojo cercano será baja. Estos valores podrían deberse solamente a las propiedades del agua o a las contribuciones hechas por material en disolución. Por el contrario, si existen altas condiciones de material particulado en suspensión, además de las propiedades inherentes a este (refractividad, forma, tamaño, composición), la señal captada por el sensor en forma diferencial permitirían obtener patrones de reflectancia del agua propiamente tal y la del agua más el componente particulado.

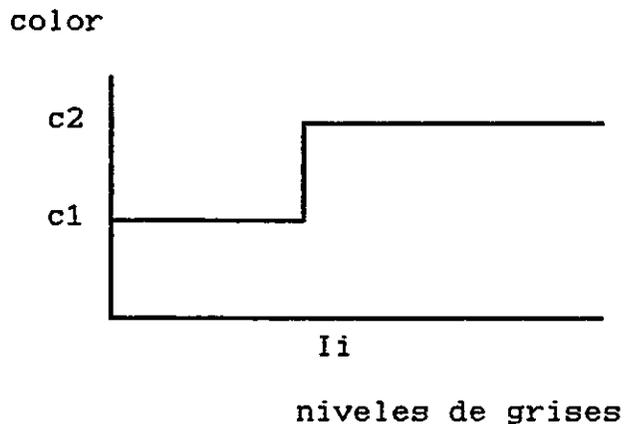
Esta información es entregada en un histograma de frecuencias para intensidad versus porcentaje de reflectancia, que permite la tipificación del contribuyente según sea el rango de la longitud de onda empleado.

Si usamos simultáneamente un cuerpo lacustre de alta reflectancia debido a partículas en suspensión, podremos tipificar que rangos ocupan los sedimentos en condiciones máximas en el histograma de frecuencias para las 4 bandas del MSS.

Por otro lado, al asignarle un color a los valores de grises entre (0,1) (Fig 2.2) tendríamos:

FIGURA 2.2

Asociación de color según cambio de intensidad en los niveles de grises



Lo anterior nos permite construir un mapa de color asociado a las zonas de interés, de esta forma se facilita la discriminación y el análisis visual.

En esta primera etapa nuestro método tuvo como objetivo discriminar la reflectancia debida a sedimentos como función de longitud de onda en condiciones de cantidad mínima.

El fenómeno de descarga de sedimentos en el Embalse Rapel fue captado en dos fechas distintas, Noviembre 1983 y Febrero 1984, la zona de descarga donde

se produce un aporte significativo corresponde a la desembocadura de los afluentes Cachapoal y Tinguiririca. El primero es el que tiene mayor incidencia en la contribución de sedimentos al embalse. Mediante el uso de la banda infrarroja ($0.8-1.1 \mu\text{m}$) se discriminó la zona correspondiente a agua. El sector comprometido debido a la pluma de sedimentos se tipificó a partir de las propiedades de reflectancia de los sólidos en suspensión en la porción comprendida entre $0.5-0.7\mu\text{m}$ (bandas 1 y 2 del sensor MSS). A partir de estas dos bandas se obtienen grados de profundización y concentración relativa de la mancha de sólidos en suspensión.

La imagen de Noviembre 1983 (Fig. 2.3 y 2.4) corresponde al deshielo de primavera y se observa una alta contribución de sólidos tanto en intensidad como en extensión en la zona 1.

En Febrero 1984 (Fig. 2.5) se observa una disminución de sedimentos con respecto a Noviembre 1983. Se destacan áreas de alta reflectancia en la desembocadura de ambos ríos.

Interesa saber si el aporte de sedimentos corresponde a valores que se mantienen constante en el tiempo (ciclo anual), o bien, si debido al arrastre en los últimos años se han producido zonas de embancamiento.

Para resolver esto, se realizaron cortes batimétricos en la zona 1 donde se observaba alta reflectancia. La profundidad en estas áreas no supera los 0.5m por lo cual es posible inferir que la alta reflectancia se debe principalmente a la reflectancia del fondo.

Esto fue corroborado utilizando análisis multitemporal y composición en falso color para las dos fechas. El análisis multitemporal se logró en base a la superposición de imágenes. Este análisis se realiza a partir del principio de adición de colores. Esto significa que si obtenemos información en distintos rangos del espectro electromagnético podemos asignar a esta información un color de salida (rojo, verde o azul). La suma de dos colores básicos como verde y azul dan como resultado el color cyan, siempre que la adición esté en la proporción 1:1. De esta manera, si obtuviésemos para un fecha información de sedimentos en el rango 0.5-0.6 μm y le asignásemos el color verde, y para otra fecha a este mismo rango se le asigna el color azul, el color esperado si es que no existen cambios en los niveles de sedimentos observados entre estas dos fechas es el cyan, o sea la contribución en intensidad para este rango en ambas fechas es la misma (Fig 2.3).

La Figura 2.6 posee la información de la banda 4 (infrarrojo) y la banda 2 (rojo) de Feb-84 con información

de la banda 2 de Nov-83. De esta manera, la intensidad observada es la misma para las dos fechas, por lo cual la proporción de mezcla será la misma para los colores asignados a las bandas, generándose así un color secundario que se logra solo en estas proporciones. Esto significa que el fenómeno es constante durante este intervalo de tiempo y en esta zona específica.

En síntesis, la metodología empleada nos permitió una primera aproximación a la estructura espacial del sistema, categorizando zonas de distribución y abundancia relativa de sólidos en suspensión, así como también a los cambios estacionales que están involucrados en estas distribuciones. En la práctica, esto se traduce en un primer paso hacia la proposición de criterios para el desarrollo de muestreos intensivos y extensivos dentro del sistema (Dussart 1984).

FIGURA 2.1

EMBALSE RAPEL. Imagen Landsat Infrarrojo. Se observan las tres zonas de estudio. Las flechas indican la dirección de circulación de los sólidos en suspensión.



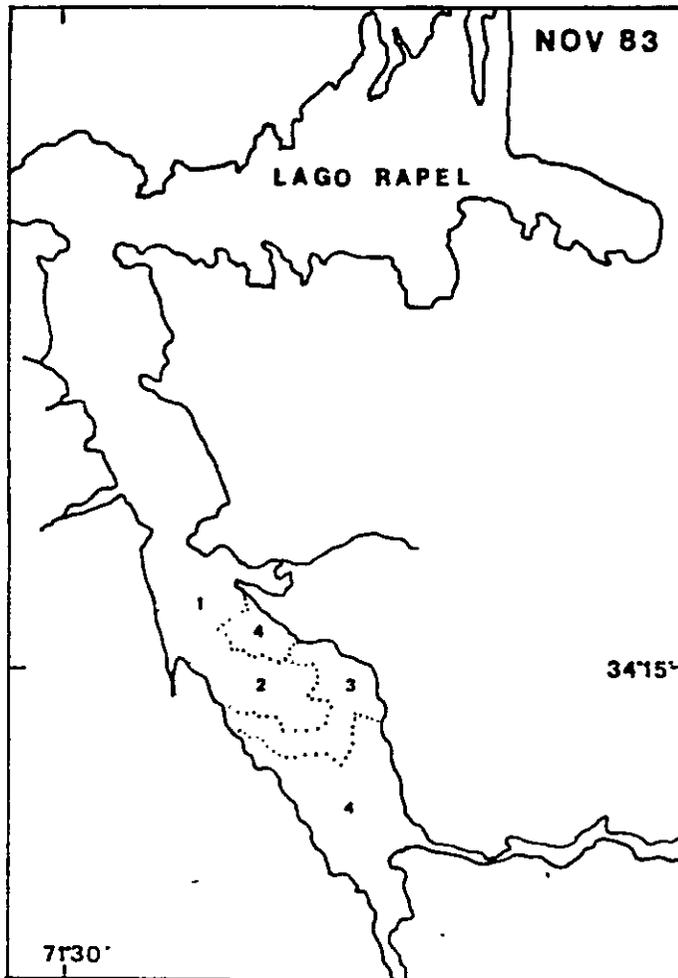
FIGURA 2.3

PLUMA DE SEDIMENTOS NOVIEMBRE 1983. Imagen falso color. Se observa un gradiente de concentración de sedimentos para la zona 1.



FIGURA 2.4

NIVEL DE SOLIDOS EN SUSPENSION NOVIEMBRE 1983.

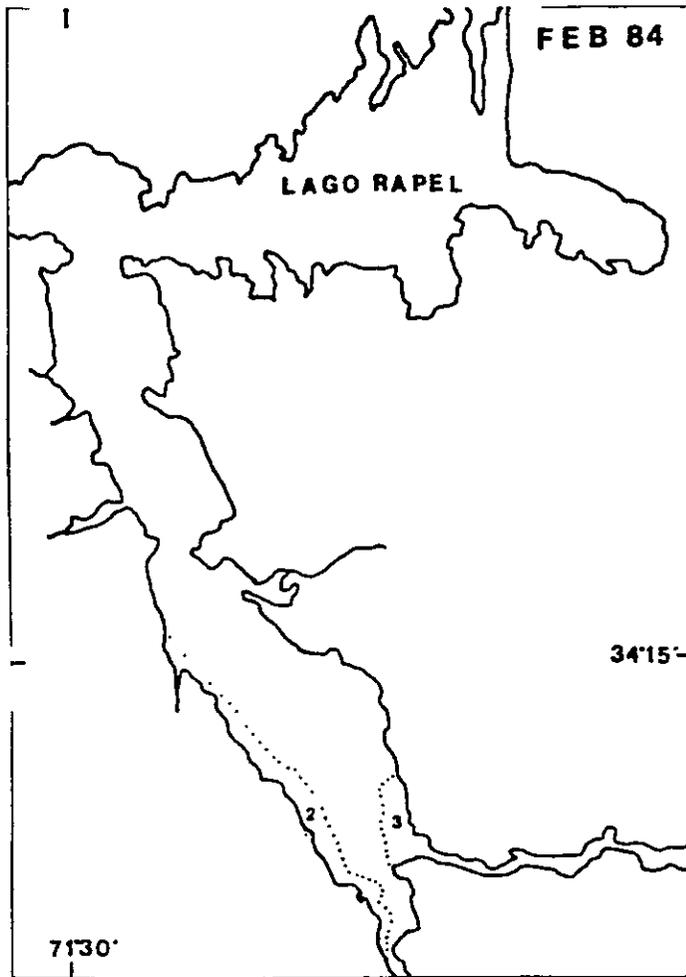


Nivel de sedimentos

- 1 bajo
- 2 medio
- 3 alto
- 4 muy alto

FIGURA 2.5

NIVEL DE SOLIDOS EN SUSPENSION FEBRERO 1984.

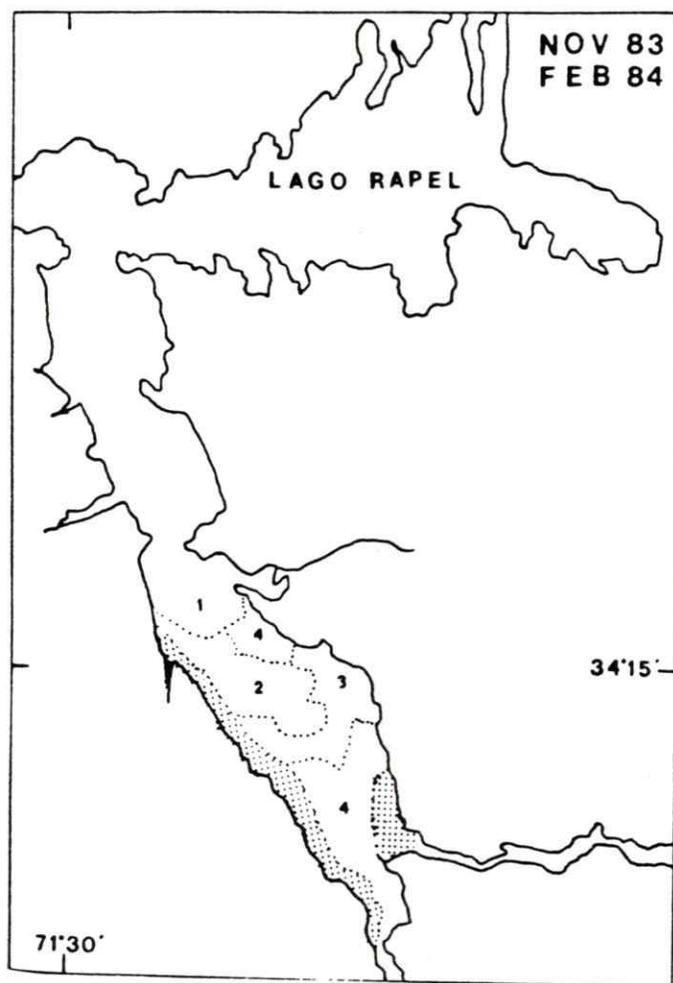


Nivel de sedimentos

- 1 bajo
- 2 medio
- 3 alto
- 4 muy alto

FIGURA 2.6

ANALISIS MULTITEMPORAL NOVIEMBRE 1983 Y FEBRERO 1984.



Nivel de sedimentos

- 1 bajo
- 2 medio
- 3 alto
- 4 muy alto

Zona de embancamiento

CAPITULO III

IMAGEN LANDSAT Y DISEÑO MUESTRAL PARA CUERPOS DE AGUA (EMBALSE RAPEL, CHILE CENTRAL)

3.1 Consideraciones generales

En la generalidad, el investigador no posee la información básica acerca de la variabilidad espacio-temporal de las variables de interés. Una de las posibles consecuencias es que el tamaño de la muestra y su ubicación dentro del sistema en estudio no es siempre el más apropiado. En general, la selección de los lugares de medición en terreno implican inicialmente un muestreo sugerido por las características morfométricas del cuerpo de agua.

A partir de los resultados obtenidos en el capítulo anterior, donde la imagen muestra heterogeneidad superficial para los rangos del espectro visible, es posible establecer una relación para esta heterogeneidad entre su variabilidad temporal y su cambio en el espacio a través de las variaciones en la unidad de grilla o pixel.

Una posibilidad no explorada de la información Landsat aplicada al estudio de lagos y embalses, es el uso

estadístico de las cuentas digitales de la imagen de tal modo que, a través del análisis de la variabilidad del conjunto de valores digitales uno pueda desarrollar criterios a priori para el diseño de muestreo con el objeto de obtener información cuantitativa de terreno. El uso del pixel como la unidad mínima de información y representación facilitaría el desarrollo de un diseño de muestreo óptimo para una adquisición de datos altamente confiables y significativos.

Además del análisis cuantitativo, el análisis cualitativo de la imagen permite la discriminación entre elementos componentes y sus límites (bordes) incrementando la cantidad de información acerca del espacio ocupado por la variable de interés.

Para el Embalse Rapel, la información Landsat permite una discriminación eficiente para áreas de diferentes concentraciones de material suspendido (Lavanderos 1987). El gradiente de concentración de sedimentos resulta en una estratificación natural de las aguas del embalse.

Suponiendo que la reflectancia media del pixel dentro del espectro visible en el embalse es producido principalmente por la presencia de sólidos en suspensión, los cambios en el valor del pixel son resultado de las

variaciones espacio-temporales de los sólidos.

Este capítulo muestra como el análisis estadístico de las cuentas digitales de la imagen, permite desarrollar un muestreo aleatorio estratificado a priori para el Embalse Rapel sugerido por la propia imagen.

3.2 Datos Landsat

Los datos Landsat para Rapel de Nov-86 y Feb-87 fueron procesados utilizando un sistema de análisis de imagen, obteniéndose las cuentas digitales de la imagen para cada banda espectral del MSS, además de imágenes en falso color convencional para el embalse.

Debido a que la porción visible y la infrarroja del espectro electromagnético poseen una penetración diferencial en el agua, utilizamos como límite máximo de penetración la información asociada a la banda 1 (0.5 - 0.6 μm) y como límite superficial la asociada a la banda 3: (0.7 - 0.8 μm).

En la imagen del MSS, el área superficial del Embalse Rapel es representado por una población de pixeles, y basado en una estratificación natural observada en las imágenes Landsat la población de pixeles se dividió en tres estratos, ya señalados, a los cuales se les

calculó diversos parámetros estadísticos descriptivos.

La variabilidad espacio-temporal de la superficie de cada estrato, fue conocida mediante imágenes multitemporales a partir de la información de la banda 4 (0.8 - 1.1 μm) para Nov-86 y Feb-87 (Fig. 3.1).

Los altos valores de las cuentas digitales para la banda 1: (0.5 - 0.6 μm), son debidos a la alta concentración de sólidos encontrados en Nov-86. En esta etapa, la diferenciación entre tierra y agua en esta banda no es posible. Sin embargo, es posible generar una máscara con la información de la banda 4. Esto consiste básicamente, en utilizar las características del infrarojo de la banda 4 (0.8 - 1.1 μm) el cual es absorbido por el agua aún en presencia de altas concentraciones de sólidos en suspensión. De esta manera, se obtiene nítidamente la línea de orilla del sistema, la cual es superponible a la información de las bandas 1 y 2 separando los límites de agua y tierra en cada banda del espectro visible. A partir de este procedimiento, se obtuvo los impresos de las frecuencias para las cuentas digitales para cada estrato.

El diseño de muestreo fue aplicado para las cuentas digitales de las bandas 1 y 3 del MSS obtenidas en Nov-87 y Feb-86. Las Tablas 3.1a,b,c y d muestran las

frecuencias para las cuentas digitales de la banda 1 y la banda 3 para estas dos fechas. Los niveles de grises de cada banda son usados como marca de clase.

Parámetros como media por estrato (Y_h), varianza por estrato ($S^2 h$), media poblacional (μ) y varianza poblacional (S^2), obtenidas de las tablas de frecuencia fueron clasificados para cada banda, fecha y estrato. Las Tablas 3.2 y 3.3 muestran estos resultados.

La estratificación observada fue analizada estadísticamente utilizando las técnicas de análisis de varianza (Sukhatme 1962) aplicándolas a las siguientes hipótesis:

1. Banda 1: $(0.5-0.6)\mu\text{m}$, Nov-86 y Feb-87

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

H1: Al menos un par de estas medias son diferentes

2. Banda 3: $(0.7-0.8)\mu\text{m}$, Nov-86 y Feb-87

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

H1: Al menos un par de estas medias son diferentes

donde μ_1 , μ_2 y μ_3 son las medias poblacionales de las cuentas digitales por estrato.

Los resultados obtenidos del análisis estadístico para las hipótesis previas se muestran en la Tabla 3.4.

3.3 Diseño del tamaño de muestra

La información digital del satélite permitió determinar el tamaño de muestra óptimo que se colectará en terreno. La ecuación 3.1 muestra las relaciones usadas para determinar el tamaño para cada estrato, donde n corresponde al tamaño muestral requerido para un muestreo aleatorio simple (m.a.s.) (Cochran 1976). En general, estos valores son mayores que los obtenidos al aplicar un muestreo aleatorio de tipo estratificado, de modo que $S^2_{m.a.s} \geq S^2_{m.a.e}$. Los resultados obtenidos al aplicar esta ecuación a las cuentas digitales de las bandas 1 y 3 del MSS, se muestran en la Tabla 3.5.

El tamaño de muestra total n fue distribuido en los diferentes estratos de acuerdo a la ecuación 3.2. Esta considera costo por estrato (Ch) = costo por unidad de extracción, N_h = tamaño poblacional del estrato.

$$n = \frac{Z^2 \cdot S^2}{(1-\alpha/2) \cdot d^2} \quad \text{ec. 3.1}$$

S^2 : Varianza poblacional

Z : Nivel de confianza para distribución normal

d : Margen de error entre media estimada y media poblacional

$$n_h = n \cdot \left[\frac{\frac{N_h - S_h}{\sqrt{Ch}}}{\sum_{h=1}^3 \left[\frac{N_h \cdot S_h}{\sqrt{Ch}} \right]} \right] \text{ ec. 3.2}$$

Ch: Recurso financiero para la obtención de cada unidad de muestreo (N_h/N).

Sh: $\sqrt{S^2 h}$: Desviación estándar del estrato

Nh: Tamaño poblacional del estrato h

3.4 Muestreo

El tamaño de la muestra fue calculado suponiendo un m.a.s. (ec. 3.1) usando la varianza poblacional de los pixeles para las distintas fechas y bandas. El tamaño de la muestra por estrato fue calculado a partir de la información de las Tablas 3.2 y 3.3 de acuerdo a la ecuación 3.2.

Basado en el desarrollo previo, las muestras de agua se colectaron en 45 estaciones distribuidas aleatoriamente en el Embalse Rapel (Tabla 3.5). Estas

recolecciones se llevaron a cabo el 18 de Enero de 1988. La cantidad de sólidos totales (Tabla 3.6) para cada muestra de agua se determinó por metodología estándar (APHA 1978).

Con el propósito de verificar si la estratificación observada por satélite era consistente con la obtenida en terreno, se desarrolló un análisis de varianza de modelo fijo. La variable dependiente fue representada por los sólidos en suspensión y la fuente de variación (F.V.) se asoció a los estratos (Tabla 3.7).

Las pruebas para estratificación se sustentan en las siguientes hipótesis:

$$H_0: y_1 = y_2 = y_3$$

H₁: Al menos un par de estas medias son diferentes

donde y_i son las medias muestrales de los sólidos en suspensión.

Con el propósito de determinar cuáles estratos son significativamente diferentes, se aplicó la prueba de Scheffé (Steel & Torrie 1985) para comparaciones múltiples utilizando las siguientes hipótesis:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

$$H_{11} : \mu_1 \neq \mu_2$$

$$H_{12} : \mu_1 \neq \mu_3$$

$$H_{13} : \mu_2 \neq \mu_3$$

3.5 Resultados

Los resultados del análisis de varianza aplicado tanto a la información Landsat como a los datos de terreno concuerdan con la heterogeneidad espacial observada, y con la existencia de al menos tres estratos.

El test de Scheffé entrega los siguientes intervalos de confianza:

- 1.- (3.9181 \leq θ \leq 8.7159) \Rightarrow se rechaza H_0 $\mu_1 > \mu_2$
- 2.- (9.8592 \leq θ \leq 14.8688) \Rightarrow se rechaza H_0 $\mu_1 > \mu_3$
- 3.- (3.8047 \leq θ \leq 8.2983) \Rightarrow se rechaza H_0 $\mu_2 > \mu_3$

3.6 Discusión y conclusiones

La variación en la población total de pixeles "N" (Tablas 3.2 y 3.3) para Nov-86 y Feb-87 fue producida por cambios de superficie y de la línea de orilla del embalse. Esto es producido principalmente por deshielos de primavera. Esto se refleja en el incremento en número de

los píxeles de borde del agua (véase el incremento en variabilidad y en frecuencia en los rangos de las cuentas digitales para Nov-86 y Feb-87). Los cambios en superficie y línea de orilla en áreas bajas producen reflectancia de fondo lo cual implica un incremento en la varianza de la reflectancia. Esto se demostró al comparar los datos para ambas fechas (Fig. 3.1). Los resultados muestran que las áreas comparadas son significativamente diferentes. También el análisis de varianza aplicado a la información satelital y de terreno muestra que existe una estratificación primaria. Ambas correlaciones muestran tres zonas diferentes dentro del embalse.

Los resultados sugieren la utilización de un diseño de muestreo de tipo estratificado. Los criterios para definir el tamaño de muestra fueron la variabilidad de las cuentas digitales para cada banda del MSS y el costo de extracción de cada muestra.

La varianza poblacional para el mes de Feb-87 es mayor que para Nov-86 (Tabla 3.2). Esta diferencia observada produce un incremento en la varianza asociada a la muestra. Sin embargo, este incremento no implica necesariamente un aumento en los niveles de concentración de sólidos en el agua. En Nov-86 y Feb-87 la varianza para las cuentas digitales asociada a la zona 2 comparada con las zonas 1 y 3 muestra que la zona 2 no cambia su

tamaño (Nh) significativamente en ambas ocasiones. Por el contrario, su media y varianza son menores. Suponiendo la entrada de una pluma de sedimentos dentro del embalse, la media y la varianza debería incrementarse debido a la topografía del área y perturbaciones eólicas. De esta manera, un incremento positivo en la varianza de la zona 1 para Feb-87 es explicado principalmente por la reflectancia de fondo y no por sólidos en suspensión.

La utilización conjunta de las características espectrales del agua y de los sólidos en suspensión en las diferentes bandas de MSS permiten la utilización de la reflectancia de fondo como información. De esta manera, se obtiene un patrón de control de la zona 1 respecto a la zona 2 y 3. El incremento de áreas de poca profundidad después de las lluvias o de los deshielos, se traduce en un incremento en la frecuencia y en una expansión de los límites superiores de las cuentas digitales para las bandas 1 y 3.

Concentraciones elevadas de sólidos en suspensión fueron detectados por las bandas 1 y 3 para Nov-86. Sin embargo, para bajas concentraciones de sólidos se obtienen mejores correlaciones con la banda 1 y por lo tanto, el tamaño de muestra es determinado a partir de la información generada por esta banda.

Dentro de cada estrato de la división primaria, es posible distinguir subestratos. Estos fluctúan en forma y número de acuerdo a la estación del año. Sin embargo, independiente de esta última, el sistema es divisible en tres zonas. La evidencia para esta partición se deduce a partir de las medidas de terreno del 18 Enero-88 para sólidos en suspensión las cuales son corroboradas por la información satelital de Nov-86 y Feb-87.

La representación raster del sistema basada en la imagen satélite permite, de acuerdo a la escala, incorporar las fluctuaciones del componente particulado a través de los cambios espacio-temporales utilizando como base el pixel. De esta manera, una aproximación cuantitativa para un diseño de muestreo puede basarse en el análisis estadístico de la información digital de la imagen satelital.

FIGURA 3.1

VARIACION LINEA DE ORILLA PARA NOVIEMBRE 1986 Y FEBRERO 1987. Imagen multitemporal. La línea de orilla para Febreo se muestra café oscuro y para Noviembre en color verde oscuro en la zona 3. En la zona 2 no se observan variaciones de borde. Las bandas que atraviesan la imagen en forma horizontal son causa de lectura errónea en los detectores del MSS.

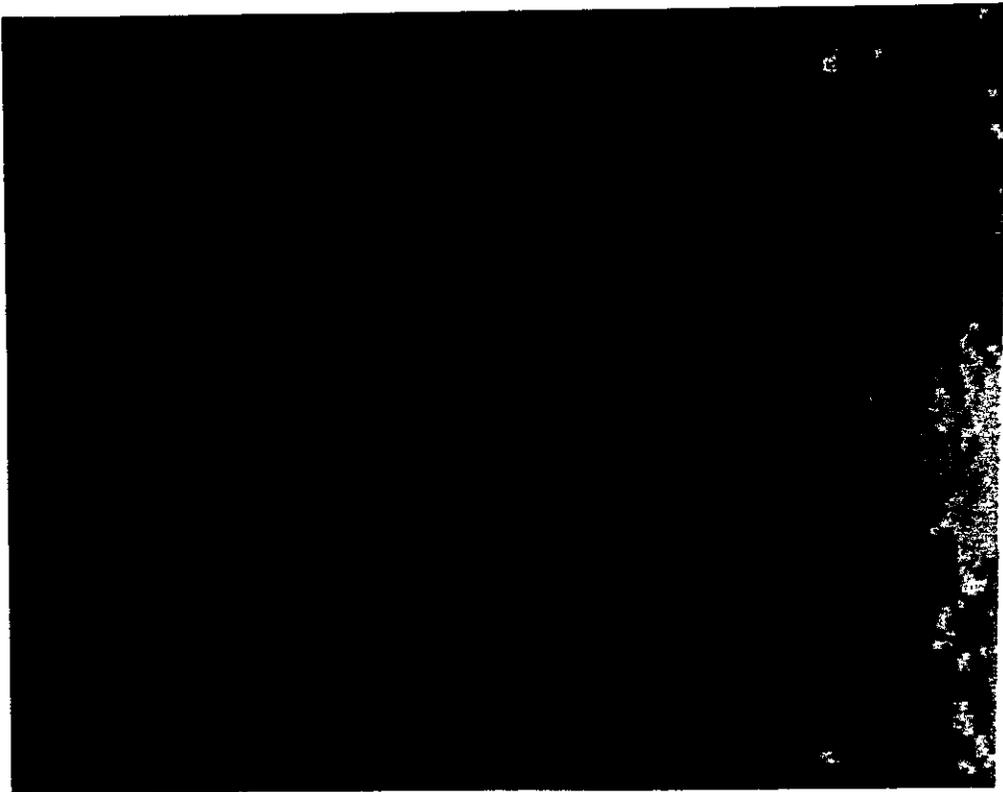


TABLA 3.1a

TABLA DE FRECUENCIA CUENTAS DIGITALES BANDA 1 MSS
 NOVIEMBRE 1986 EMBALSE RAPEL. Se presenta separada por
 estrato.

ESTRATO 1		ESTRATO 2		ESTRATO 3	
C.dig.	Frec.	C.dig.	Frec.	C.dig.	Frec.
33	1	35	3	31	3
34	2	36	12	32	30
35	1	37	40	33	91
37	1	38	80	34	177
38	2	39	108	35	292
39	2	40	120	36	522
40	10	41	88	37	310
41	13	42	103	38	133
42	26	43	140	39	64
43	40	44	338	40	36
44	72	45	316	41	24
45	85	46	90	42	27
46	76	47	48	43	25
47	103	48	39	44	12
48	160	49	24	45	20
49	260	50	16	46	24
50	297	51	7	47	16
51	276	52	9	48	10
52	126	53	5	49	18
53	75	54	3	50	4
54	21	55	7	51	2
55	3	56	2	52	6
56	1	57	2	53	6
57	3	58	2	55	2
58	3	59	1	56	1
59	3	60	1	57	1
60	2	61	1	59	3
61	1	64	1		
62	1				
63	1				
66	1				

TABLA 3.1b

TABLA DE FRECUENCIA BANDA 1 (0.5 - 0.6 μm) FEBRERO 1987
 EMBALSE RAPEL

ESTRATO 1		ESTRATO 2		ESTRATO 3	
C.dig	Frec.	C.dig	Frec.	C.dig	Frec.
30	1	28	2	24	3
32	1	29	2	25	16
33	1	30	9	26	55
34	4	31	34	27	145
35	5	32	56	28	242
36	18	33	75	29	500
37	23	34	176	30	499
38	26	35	310	31	652
39	39	36	295	32	575
40	102	37	184	33	320
41	134	38	137	34	202
42	117	39	78	35	109
43	126	40	144	36	34
44	122	41	145	37	26
45	86	42	96	38	13
46	130	43	32	39	16
47	177	44	7	40	9
48	255	45	9	41	1
49	274	46	1	42	3
50	281	47	1	43	2
51	189	48	3	44	1
52	190			45	1
53	140			47	1
54	133				
55	148				
56	144				
57	82				
58	88				
59	41				
60	57				
61	23				
62	17				
63	21				
64	9				
66	3				

TABLA 3.1c

TABLA DE FRECUENCIA CUENTAS DIGITALES BANDA 3 MSS
NOVIEMBRE 1986 EMBALSE RAPEL. Se presenta separada por
estrato.

ESTRATO 1		ESTRATO 2		ESTRATO 3	
C.dig.	Frec.	C.dig.	Frec.	C.dig.	Frec.
5	4	2	34	1	55
6	29	3	157	2	183
7	28	4	270	3	192
8	51	5	270	4	345
9	83	6	286	5	272
10	241	7	214	6	136
11	260	8	73	7	134
12	217	9	28	8	76
13	162	10	28	9	59
14	90	11	24	10	55
15	38	12	20	11	34
16	37	13	16	12	28
17	40	14	18	13	44
18	34	15	19	14	26
19	24	16	20	15	28
20	29	17	11	16	23
21	43	18	13	17	23
22	49	19	10	18	14
23	38	20	15	19	11
24	22	21	12	20	20
25	20	22	12	21	26
26	24	23	10	22	14
27	13	24	9	23	13
28	15	25	5	24	9
29	14	26	7	25	7
30	7	27	7	26	8
31	8	28	4	27	4
32	5	29	2	28	10
33	2	30	2	29	5
34	2	31	1	30	1
35	1	32	1	31	2
36	3	35	2	32	1
37	2	36	1	34	1
		43	1		
		44	1		
		50	2		
		51	1		

TABLA 3.1d

TABLA DE FRECUENCIA BANDA 3 (0.7 - 0.8 μm) FEBRERO 1987
 EMBALSE RAPEL

ESTRATO 1		ESTRATO 2		ESTRATO 3	
C.dig	Frec.	C.dig	Frec.	C.dig	Frec.
9	4	8	29	7	2
10	171	9	269	8	530
11	202	10	386	9	612
12	546	11	463	10	972
13	406	12	281	11	548
14	450	13	74	12	262
15	308	14	39	13	124
16	214	15	30	14	52
17	197	16	22	15	33
18	156	17	29	16	29
19	79	18	18	17	35
20	76	19	26	18	30
21	55	20	16	19	27
22	104	21	18	20	30
23	74	22	13	21	23
24	25	23	12	22	18
25	26	24	8	23	19
26	31	25	15	24	17
27	18	26	9	25	12
28	25	27	9	26	14
29	15	28	8	27	14
30	8	29	2	28	6
31	5	30	2	29	5
32	3	31	6	30	4
33	3	32	3	31	3
34	2	33	3	32	1
35	4	35	1	33	1
		36	1	34	1
		37	2	35	2
		38	2	36	2
				37	1

TABLA 3.2

PARAMETROS POBLACIONALES DE LAS CUENTAS
DIGITALES PARA LA BANDA 1: (0.5-0.6) μm

FECHA	NOV-86	NOV-86	NOV-86	FEB-87	FEB-87	FEB-87
ESTRATO	1	2	3	1	2	3
N _h	1635	1606	1859	3207	1796	3429
\bar{Y}_h	49.834	43.326	36.964	49.289	36.903	30.956
S ² _h	9.871	11.621	13.076	33.327	9.324	6.047
N	=	5100		N	=	8432
\bar{Y}	=	43.093		\bar{Y}	=	39.195
S ²	=	39.866		S ²	=	84.601

TABLA 3.3

PARAMETROS POBLACIONALES DE CUENTAS DIGITALES
 PARA LA BANDA 3: (0.7-0.8) μm

FECHA	NOV-86	NOV-86	NOV-86	FEB-87	FEB-87	FEB-87
ESTRATO	1	2	3	1	2	3
Nh	1635	1606	1859	3207	1796	3429
\bar{Y}_h	14.023	7.394	7.159	15.260	12.164	11.015
S ² h	32.009	16.759	6.939	17.835	18.229	13.796
N	=	5100		N	=	8432
\bar{Y}	=	9.433		\bar{Y}	=	12.874
S ²	=	42.617		S ²	=	19.951

Tabla 3.4

ANALISIS DE VARIANZA PARA CUENTAS DIGITALES Y ESTRATOS

Variable Respuesta: cuentas digitales

F.V.	G.L.	C.M.	F	Prob.	MSS
Efecto estrato	2	72100.30	6220.69	0.05	b1 Nov -86
	2	284479.49	16615.92	0.05	b1 Feb -87
	2	62605.43	3464.97	0.05	b3 Nov -86
	2	15507.67	952.79	0.05	b3 Feb -87

TABLA 3.5

TAMANO DE MUESTRA CALCULADO SEGUN BANDA 1 Y BANDA 3 PARA
NOVIEMBRE 1986 Y FEBRERO 1987

BANDA 1: (0.5-0.6) μm	
Fecha: Noviembre 1986	Fecha: Febrero 1987
n = 38	n = 81
n1 = 12	n1 = 44
n2 = 12	n2 = 18
n3 = 14	n3 = 19
$\Sigma\text{nh} = 38$	$\Sigma\text{nh} = 81$

BANDA 3 (INFRAROJO) : (0.7-0.8) μm	
Fecha: Noviembre 1986	Fecha: Febrero 1987
n = 41	n = 19
n1 = 19	n1 = 7
n2 = 13	n2 = 6
n3 = 9	n3 = 8
$\Sigma\text{nh} = 41$	$\Sigma\text{nh} = 19$

TABLA 3.6

SOLIDOS TOTALES PROMEDIO POR ESTRATO (mg/l) ENERO 1988

estrato 1	estrato 2	estrato 3
25.695	14.660	14.030
25.580	19.765	7.933
19.865	14.595	11.030
19.030	17.295	8.130
21.130	11.465	14.330
21.700	11.130	13.265
24.830	10.560	11.295
25.800	17.095	10.330
27.230	16.895	7.999
20.550	12.730	9.915
16.660	16.760	6.730
17.230	20.930	9.165
	17.565	9.465
	19.530	6.830
	15.965	6.430
	14.100	
	16.565	
	12.630	

Tabla 3.7

ANALISIS DE VARIANZA PARA SOLIDOS Y ESTRATOS

Variable Respuesta: sólidos totales en suspensión

F.V.	G.L.	S.C.	F	Prob.
Efecto estrato	2	510.189	54.1039	.0000

CAPITULO IV

APROXIMACION CUANTITATIVA A LA DISTRIBUCION DE SOLIDOS EN SUSPENSION EN EL EMBALSE RAPEL MEDIANTE INFORMACION LANDSAT

4.1 Consideraciones generales

Las variables involucradas en la heterogeneidad de la imagen de un determinado sector del Embalse Rapel son principalmente componente particulado como sedimentos en suspensión y biomasa. Como se explicó en el capítulo I según el tamaño y la concentración en que se hallan presentes estas partículas, se refleja y se absorbe la luz en función de distintos rangos de longitud de onda, así la componente reflejada es captada por el barredor multiespectral del Landsat.

En esta etapa, la información obtenida a partir de las bandas 1 y 3 del MSS Landsat fue correlacionada con mediciones de terreno para sedimentos en suspensión, profundidad de desaparición del disco Secchi y biomasa (clorofila-a) para desarrollar los algoritmos predictivos y conocer la distribución espacial de sólidos totales, no sólo en términos cualitativos sino que también en términos cuantitativos para un amplio sector del Embalse Rapel.

4.2 Materiales y métodos

En esta sección se describirá la metodología general utilizada en terreno, y las transformaciones aplicadas sobre la imagen Landsat. Estas imágenes fueron obtenidas en concurrencia con la recolección de datos dentro del Embalse Rapel.

A partir de la heterogeneidad superficial observada en el embalse, y según el diseño muestral desarrollado con información satelital de fechas anteriores, se efectuaron tres recolecciones de información de terreno para las variables disco Secchi, biomasa fitoplanctónica (clorofila-a) y sólidos en suspensión. Las fechas seleccionadas fueron: 12 de Septiembre de 1987, 18 de Enero de 1988 y 22 de Marzo de 1988.

En cada ocasión se establecieron un número no inferior a 33 estaciones de muestreo distribuidas según el peso del estrato (capítulo III) (33 en Sept-87, 45 en Enero-88, 45 en Marzo-88), los mapas de la ubicación de las estaciones se muestran en las Fig. 1 y 2 en el Anexo 2. Cada estación fue posicionada mediante triangulación por taquimetría desde tierra. La razón del posicionamiento obedece a que posteriormente para correlacionar esta información con la satelital, debemos

obtener la posición lo mas exactamente posible para calzarla en un mapa digital corregido geoméricamente.

En cada estación se obtuvo muestras de agua utilizando una botella Van Dorn, para posteriormente determinar sólidos totales (APHA 1972) y clorofila-a según Jeffrey & Humphrey (1975).

El tamaño de partícula de los sólidos en suspensión corresponde a la fracción $> 0.45 \mu\text{m}$ ya que para estimar su concentración se utilizó un filtro de ese diámetro de poro.

Las muestras de agua se trabajaron como pseudo réplicas a partir de cada muestra de agua.

Una medición "in situ" fué transparencia asociada a disco Secchi. En este caso se utilizaron dos discos Secchi de 25cm de diámetro, de colores verde y blanco respectivamente. La idea de utilizar estos dos colores obedece a la diferencia de penetración de la luz en el agua en función de la longitud de onda y de la composición de partículas. Esto en el caso de los discos Secchi se traduce en que el Secchi Verde desaparece primero que el Blanco. De esta manera, la muestra de agua se toma a la profundidad media de desaparición de los dos discos. Por otra parte, la banda 1 del MSS mide la reflectancia en la porción verde del espectro visible, y es la que discrimina

mejor los sólidos en suspensión. De esta manera, según sea la composición y el tamaño de las partículas en suspensión, podemos obtener relaciones empíricas entre el satélite y la profundidad de desaparición de los discos según la porción del espectro visible que nos interese correlacionar con datos de terreno.

Tratamiento de imágenes

Las imágenes en el sentido visual fueron tratadas utilizando correcciones geométricas y radiométricas, se utilizaron filtros como realce de bordes y suavizamientos para realzar posteriormente los estratos por pseudocolor. Sin embargo, los datos numéricos (valor del pixel) fueron obtenidos sin ningún tipo de corrección (Verdin 1983).

De esta manera, lo que se refiere a imagen en el sentido visual tuvo un proceso computacional, el cual permite obtener y mejorar un producto o imagen para destacar particularidades de la zona en cuestión (Córdova et al. 1986).

La obtención de la impresión para los valores de los pixeles dentro del embalse se obtuvo mediante la aplicación de una máscara a los valores de tierra para obtener solamente los valores numéricos de los pixeles

asociados a las estaciones de muestreo dentro del embalse. Estos valores son obtenidos para las bandas 1, 2 y 3 y serán posteriormente traspasados a una carta digital del embalse para obtener la posición de las estaciones como dato digital, esto es, como los valores del pixel (unidad de información básica aproximadamente 0,5 hectáreas).

Esta información se correlacionó con las variables medidas en terreno que ocupaban esa posición, y se construyeron regresiones simples o múltiples como modelos predictivos a posteriori (Verdin 1985). Normalmente se usa para este tipo de ubicación una matriz de 3*3 pixels y se promedia la reflectancia de los 9 pixel que contiene.

Las cuentas digitales obtenidas para cada banda, fueron transformadas inicialmente a valores de radianza utilizando la ecuación de Robinove (1982) para posteriormente ser transformados a reflectancia nominal (Verdin 1985). Finalmente, esta información fue corregida para dispersión atmosférica aplicando el modelo de Turner & Spencer (Verdin 1985).

La información satelital con que se disponía cubría solo las fechas de Sept-87 y Enero-88. De esta manera, solo se trabajó con 75 valores de reflectancia obtenidos para la banda 1, 2, y 3 y 123 datos para biomasa(clorofila-a), sólidos en suspensión y profundidad

de desaparición de disco Secchi. Toda esta información fue ajustada por el método de mínimos cuadrados para obtener curvas predictivas.

En este capítulo solo desarrollaremos los ajustes asociados a sólidos en suspensión.

Los rangos de concentración para sedimentos calculados a partir de las ecuaciones obtenidas, se muestran en la Fig. 4.1 y 4.2 para Sept-87 y Enero-88, respectivamente.

4.3·Resultados

Como ya se ha señalado, en el Embalse Rapel, se reconocen claramente tres zonas de diferente reflectancia. Dos zonas que están bajo la influencia de los ríos Tinguiririca y Cachapoal, que le aportan gran cantidad de sólidos, y una tercera zona bajo la influencia del Estero Alhué que presenta una reflectividad principalmente debida a biomasa (clorofila-a) (Fig. 2.1 y capítulo V).

Las Fig. 4.1 y 4.2 muestran el estado del embalse para el 12 de Sept-87 y el 18 de Enero-88 en términos de la distribución cuantitativa de sólidos. La Fig. 4.1 muestra el aporte de sólidos producto de las lluvias correspondientes al final de la estación de invierno. La

concentración de partículas observada en la zona 1 es menor que para la zona 2, esto se debe a la presencia de zonas embancadas en el río Cachapoal, las cuales actúan como una muralla de contención, imprimiéndole una direccionalidad al flujo de sólidos, dado lo cual se producen áreas "protegidas" bajo menor influencia de estos últimos.

Las curvas obtenidas para sedimentos en suspensión para la banda 1 y 2 del MSS se muestran en las Fig. 4.3 y 4.4 respectivamente.

Las curvas obtenidas para los discos Secchi y los sólidos en suspensión se muestran en las Fig. 4.5 y 4.6.

La Tabla 4.1 muestra los modelos obtenidos en cada caso, su coeficiente de determinación y el error estándar de la medición.

Por otra parte, las altas concentraciones de sólidos en los estratos 1 y 2 permiten suponer una condición de alta reflectividad para las bandas espectrales 1 y 2 del MSS Landsat (Fig 2.1).

4.4 Discusión y conclusiones

En esta etapa se aplicaron las correcciones a

los datos obtenidos del satélite propuestas por Verdin (1985) y Alföldi & Munday (1978) respecto a variación del ángulo solar y dispersión atmosférica. Sin embargo, para los días en que se efectuaron las mediciones de terreno la atmósfera fue transparente y, las correcciones no variaron significativamente la precisión de los algoritmos construidos en base a las reflectancias sin corregir. Se observa un alto coeficiente de determinación, para la banda 1 y 2 y los sólidos en suspensión (Tabla 4.1). Ambos modelos en términos de su error y parámetros de regresión no son significativamente diferentes (Fig. 4.3 y 4.5).

El año 1987, se caracterizó por altas precipitaciones durante la estación de invierno. En el caso del Embalse Rapel, esto se reflejó en un arrastre de sedimentos que llegó a niveles de distribución y concentración no detectados anteriormente, esto es, una pluma homogénea que cubría los estratos 1 y 2, los cuales no eran diferenciables entre sí por medio de la banda 1 del MSS. Esta situación es la que Moore (1980) señala como saturación de la banda 1 en presencia de alta cantidad de sólidos en suspensión.

La información obtenida permite su generalización espacio-temporal en términos cuantitativos dentro del sistema. Esta representación de la

distribución de los sólidos, permite deducir un comportamiento heterogéneo del sistema. Si bien este tipo de parches es dinámico por tratarse de un fluido que transporta material particulado y es de fácil deformación por perturbadores como por ejemplo el viento, esta configuración primaria de tres zonas permanece constante en el tiempo (Sept-87 y Enero-88) para toda el área estudiada.

De lo anterior, y debido a las cantidades de sólidos en suspensión observadas dentro del embalse, es posible plantear como hipótesis que ellos modulan en un sector importante del sistema la distribución de la biomasa fitoplanctónica y secundaria, debido principalmente, a que cambia el coeficiente de atenuación vertical de la luz produciendo un efecto de pantalla y limitando su disponibilidad. Esto último se demuestra claramente a partir de los modelos de los discos Secchi Verde y Blanco (Fig. 4.5 y 4.6). Ambos modelos muestran que son los sólidos los determinantes en la dispersión de la luz difusa al interior del embalse. Los rangos de los coeficientes de correlación para los discos Secchi Verde y Blanco respectivamente, son semejantes (0,657 - 0,97) (0,62 - 0,97). De lo anterior, se deduce que para altas concentraciones de sólidos la respuesta de ambos discos no difiere.

Por otra parte, debido al origen arcilloso de los sedimentos, su capacidad de adsorción aumenta la afinidad con los nutrientes, lo que podría constituir una causa de la disminución en abundancia del fitoplancton (Mühlhauser com. pers.).

En conclusión, el aporte de la teledetección en procesos ambientales, permite aproximaciones a nivel de escala no previstos, deduciendo una serie de procesos no contemplados a partir de información puntual y que dada su variación en el tiempo es posible generalizarlos a todo el espacio involucrado.

FIGURA 4.2

DISTRIBUCION Y ABUNDANCIA DE SOLIDOS EN SUSPENSION 18 DE ENERO DE 1988 BANDA 2 MSS. Imagen pseudocolor.

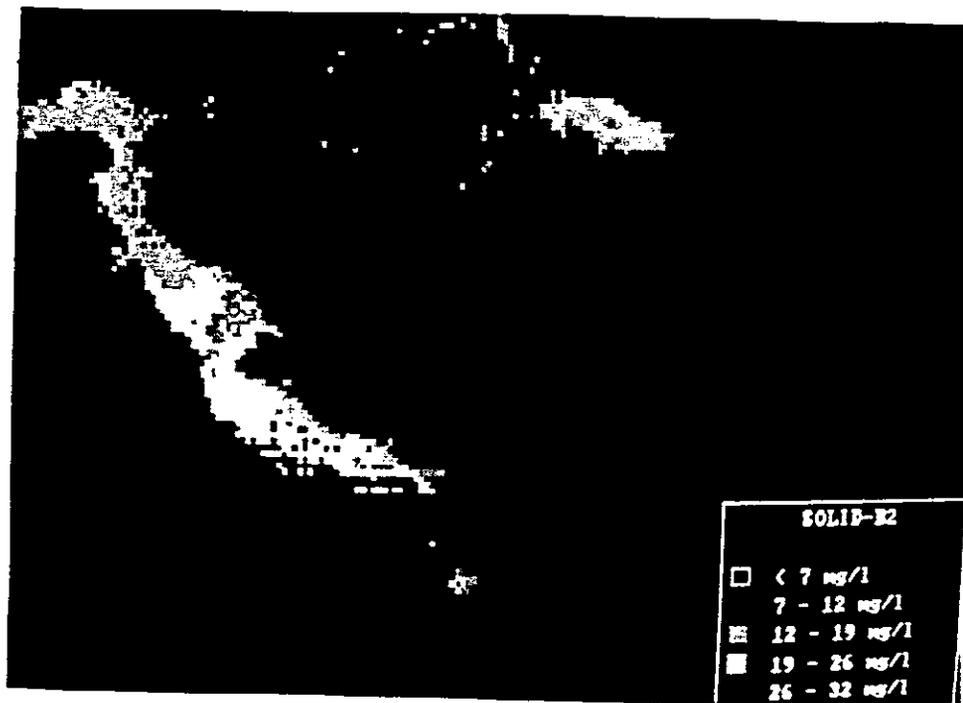
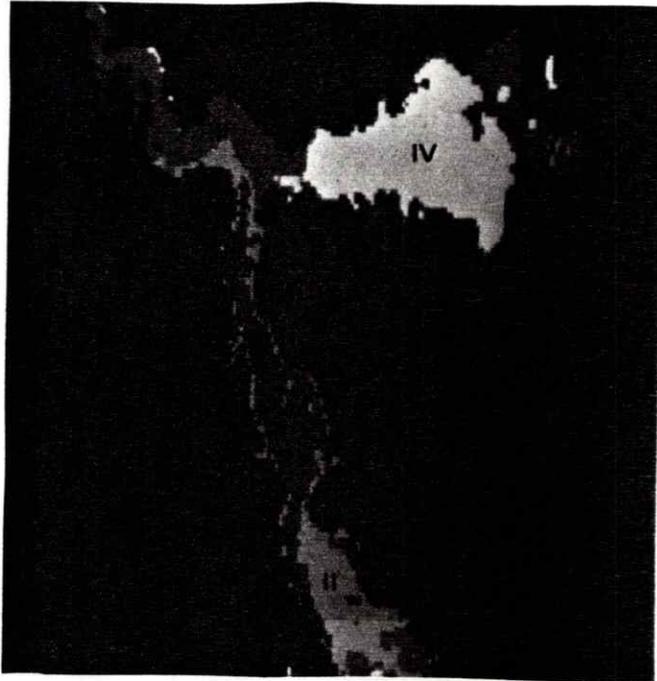


FIGURA 4.1

DISTRIBUCION Y ABUNDANCIA DE SOLIDOS EN SUSPENSION 12 DE SEPTIEMBRE DE 1987 BANDA 2 MSS. Imagen pseudocolor.



I	65 - 187	mg/l
II	22 - 64	mg/l
III	5 - 21	mg/l
IV	1 - 4	mg/l

FIGURA 4.3

MODELO DE SOLIDOS EN SUSPENSION Y REFLECTANCIA BANDA 1 MSS

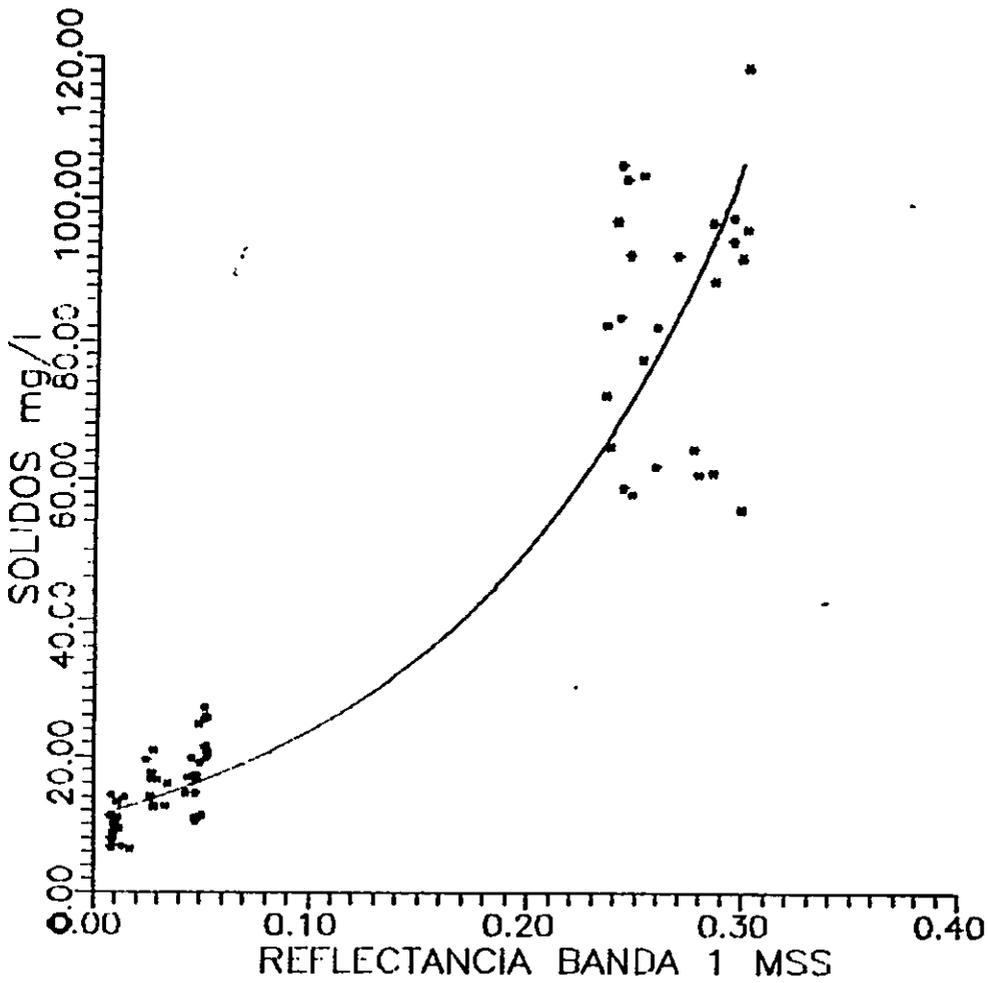


FIGURA 4.4

MODELO DE SOLIDOS EN SUSPENSION Y REFLECTANCIA BANDA 2 MSS

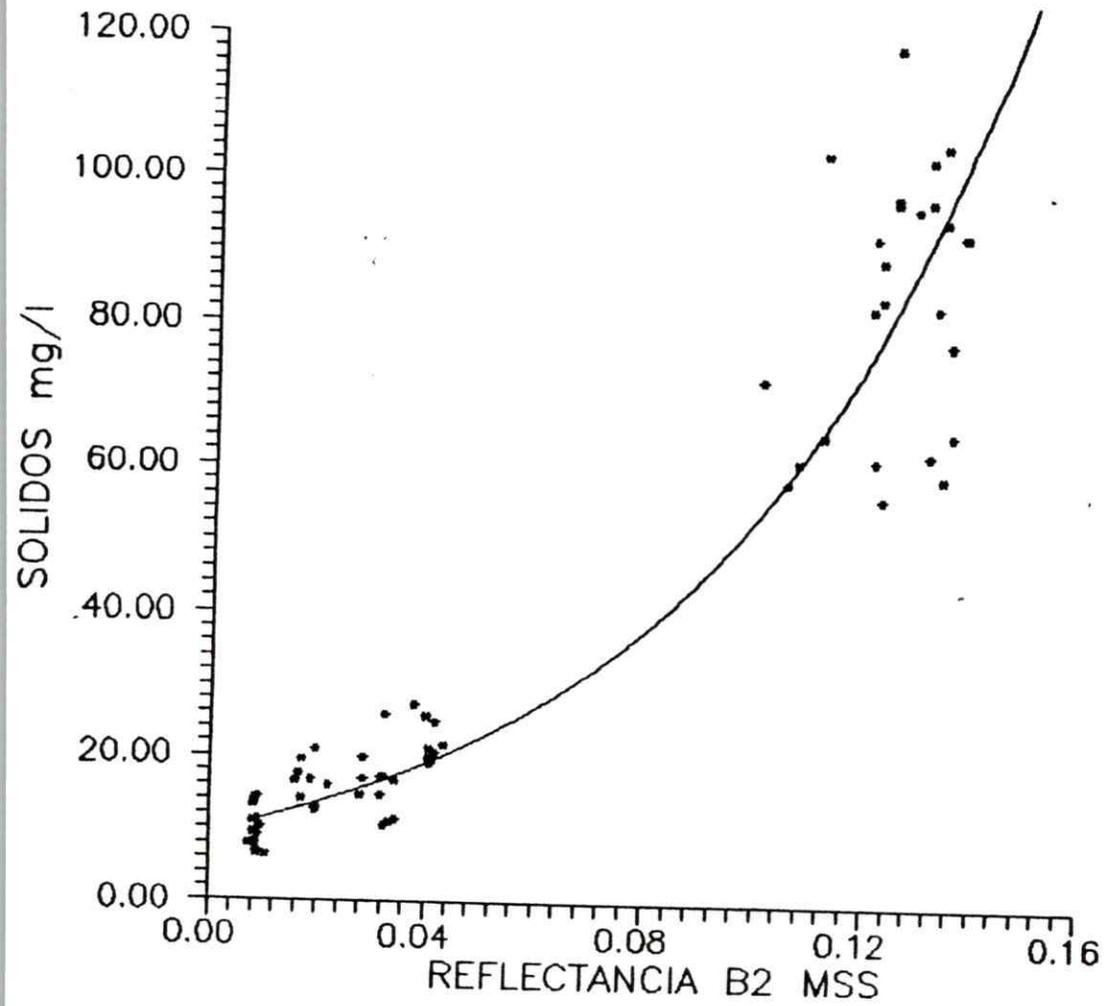


FIGURA 4.5

MODELO DE SOLIDOS EN SUSPENSION Y DISCO SECCHI BLANCO

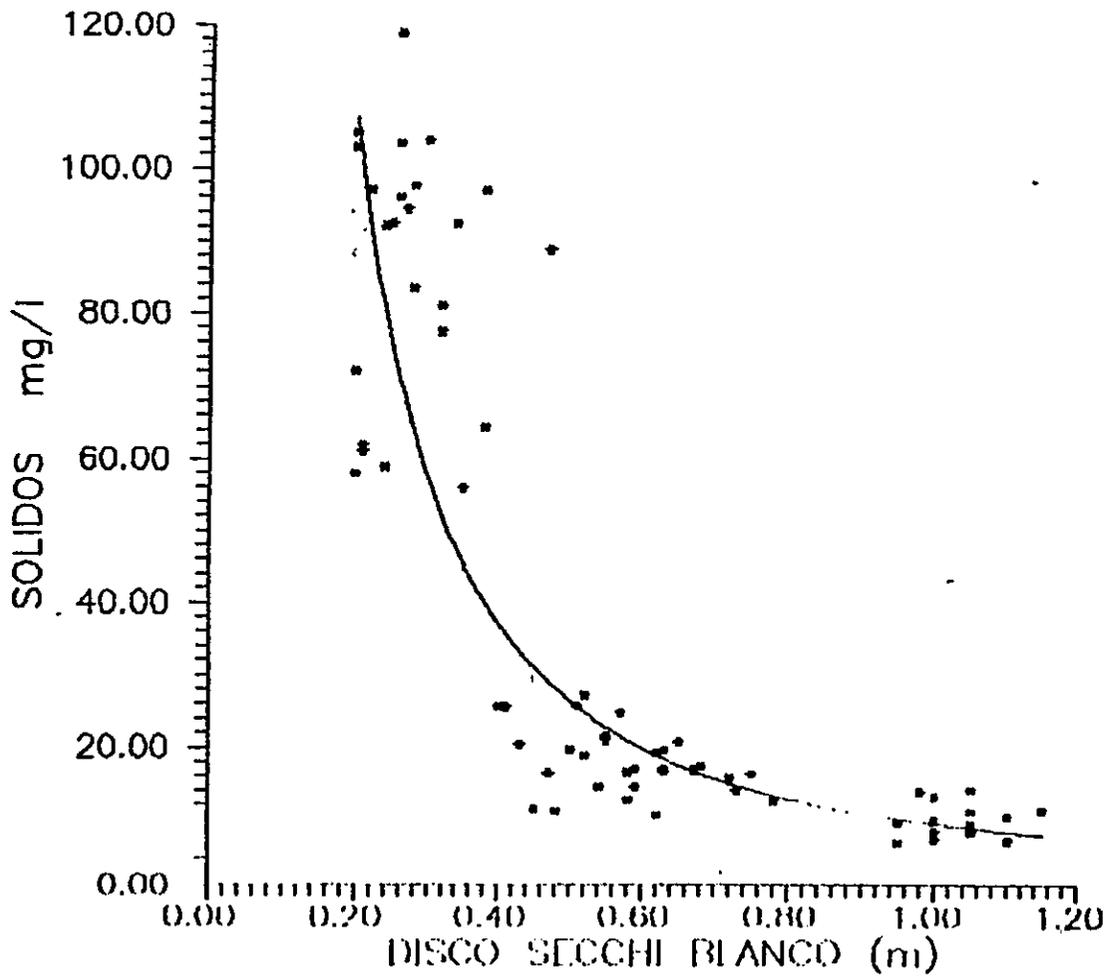


FIGURA 4.6

MODELO DE SOLIDOS EN SUSPENSION Y DISCO SECCHI VERDE

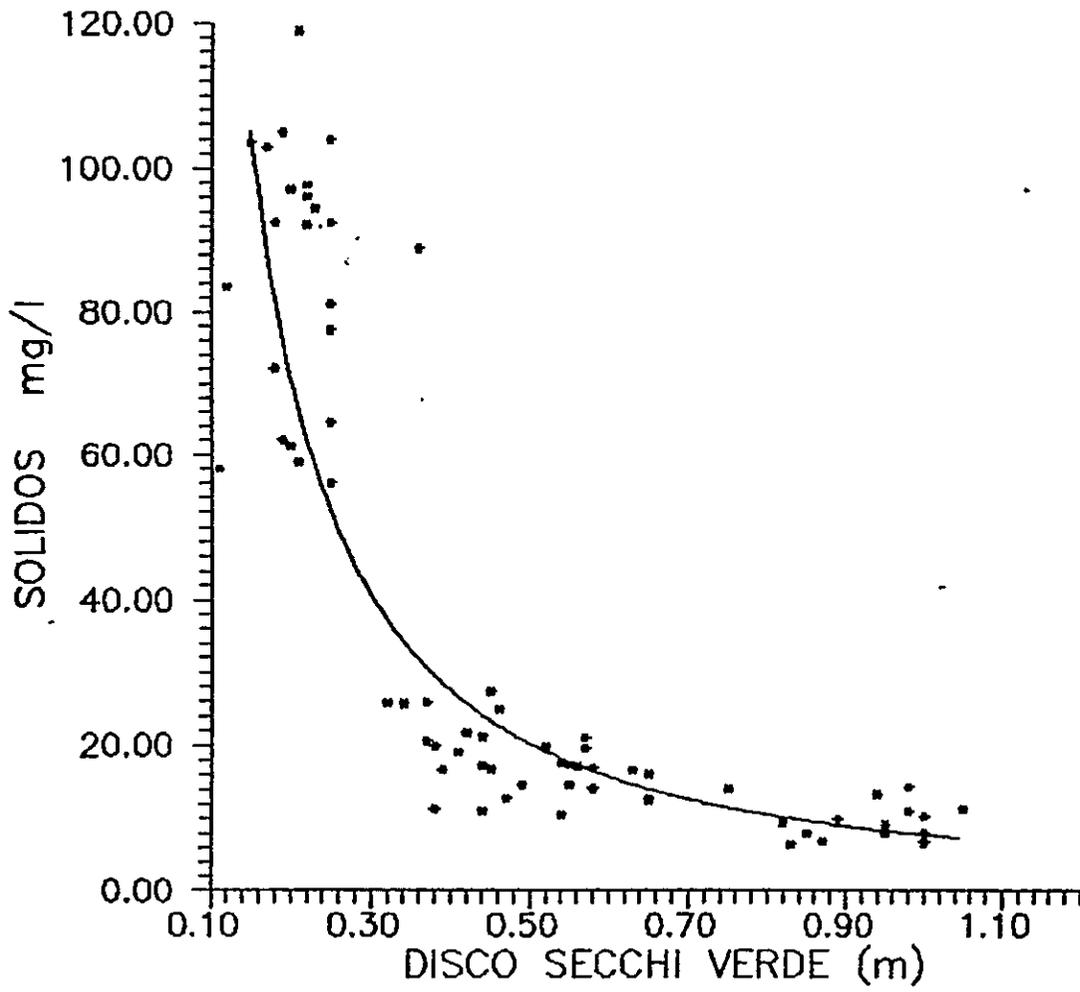


TABLA 4.1

MODELOS DE REGRESION
SOLIDOS V/S REFLECTANCIA BANDA 1 Y 2 MSS

SOLIDOS vs REFLECTANCIA B1 MSS					
$SOLIDOS = EXP(2,51 + 6.34*B1)$					
FUENTE	C.M.	F	PROB. >F	R ²	e
MODELO	45,21	229,97	0,000	0,76	0,44
ERROR	14,55				
SOLIDOS vs REFLECTANCIA B2 MSS					
$SOLIDOS = EXP(2,30 + 17,16*B2)$					
FUENTE	C.M.	F	PROB. >F	R ²	e
MODELO	53,22	602,6	0,000	0,89	0,30
ERROR	6,54				
SOLIDOS vs DISCO SECCHI VERDE					
$SOLIDOS = 2,05*DSV - 1,37$					
FUENTE	C.M.	F	PROB. >F	R ²	e
MODELO	50,27	347,91	0,000	0,83	0,38
ERROR	10,26				
SOLIDOS vs DISCO SECCHI BLANCO					
$SOLIDOS = 2,22*DSB - 1,52$					
FUENTE	C.M.	F	PROB. >F	R ²	e
MODELO	49,68	324,8	0,000	0,82	0,39
ERROR	10,86				

CAPITULO V

MEDICION DEL ESTADO TROFICO BASADO EN REFLECTANCIA DE BIOMASA (clorofila-a) PARA EL EMBALSE RAPEL

5.1 Consideraciones generales

El desarrollo de índices para la caracterización de sistemas límnicos requiere de una serie de cualidades como por ejemplo, ser de fácil medición, no muy sofisticados, de precisión conocida y no localistas. Además, deben poder integrar cambios dentro de un período de tiempo (Uhlmann & Hrbáček 1976, Carlson 1977, Duncan & Rzoska 1978, Gliwicz & Kowalczewski 1978, Mühlhauser 1988).

En nuestro país, los estudios sobre distribución y abundancia de biomasa fitoplanctónica en el Embalse Rapel se han realizado en un número reducido de estaciones (Cabrera *et al.* 1977, Montecino & Cabrera 1982, Vila *et al.* 1987) generalizando condiciones de estado en forma inductiva.

El propósito de este trabajo es demostrar que la información digital multiespectral está asociada cuantitativa y cualitativamente a los cambios en

distribución y abundancia de la biomasa. Particularmente, si el satélite es capaz de reflejar estos cambios para continuar con el mismo criterio de Carlson, que define la duplicación de la biomasa fitoplanctónica como el paso de un estado a otro en el sistema. Sin embargo, difiere del índice de Carlson en que la duplicación de la biomasa estará asociada a la reflectancia producida por ésta, y que es capaz de percibir el satélite.

Carlson (1977), supone como variable de estado la biomasa fitoplanctónica (clorofila-a) y su dinámica de crecimiento en términos cuantitativos como criterio para medir el cambio de estado. Lo anterior, asociado a cambios en la transparencia de la columna de agua medida a través del disco Secchi.

Si bien las críticas a este índice son fundamentalmente las interferencias que produce el componente particulado abiótico para el disco Secchi, además del estrecho rango de predicción con que este trabaja (Megard et al. 1980), es posible introducir una optimización a partir de la información física obtenida por sensores remotos. En general, la señal captada por el sensor MSS a bordo del satélite Landsat, es producto de la energía reflejada devuelta por un objeto y que, como habíamos mencionado en capítulos anteriores para el Embalse Rapel, se debe principalmente a sólidos en

suspensión (Lavanderos et al. 1988) y que por la morfología del embalse, el aporte de sus afluentes y la acción de distintos perturbadores ambientales se produce una distribución heterogénea tanto en la biomasa como en los sólidos en suspensión.

La optimización propuesta al índice de Carlson consiste en considerar la distribución espacial de la biomasa calculada mediante un parámetro físico como la reflectancia, a través de las diferentes bandas del MSS Landsat, corrigiendo las interferencias debidas a la componente abiótica.

Como se explicará en los próximos párrafos, este índice contemplará necesariamente una representación de grilla de la biomasa dentro del sistema.

Por otra parte, utilizando el concepto de dato geográfico (Burrough 1987) la representación del estado trófico del Embalse Rapel asociado a la distribución y abundancia de biomasa posee: una posición respecto a un sistema de coordenadas (atributo espacial), atributos no espaciales (concentración de partículas en suspensión de origen biótico como abiótico), y relaciones topológicas entre los atributos espaciales. De esta manera, hemos introducido conceptos de arquitectura espacial y supuestos de anisotropía en la reconstrucción topológica de las

zonas que componen el Embalse Rapel (Rapoport 1975, Forman & Godron 1986, Lavanderos y Pattillo 1988). Dado este tipo de suposiciones, la construcción de un índice de medición del estado trófico contempla en forma explícita la distribución espacial de rangos de concentración de biomasa fitoplanctónica dentro del embalse.

5.2 Métodos

Los modelos de regresión para la reflectancia por banda y clorofila-a fueron desarrollados a partir del método de cuadrados mínimos utilizando el paquete estadístico para computador personal "Statgraf".

Se desarrollaron modelos para disco Secchi, clorofila-a y sólidos totales en suspensión con el propósito de encontrar ecuaciones funcionales que ayudaran a predecir cambios en la abundancia de la biomasa (n=116).

Finalmente, se relacionó el cambio de la biomasa con un valor índice (β) basado en los trabajos de Hardy & Jefferies (1981), Lindell et al. (1986) y Alföldi & Munday (1978). Este valor se construyó como una normalización entre las reflectancias de la banda infrarroja comprendida entre 0.7 y 0.8 μm y la banda 1 (0.5 - 0.6 μm). Las suposiciones hechas para considerar la banda infrarroja es que ésta no es absorbida totalmente por el agua si existe

presencia de partículas en suspensión.

Los modelos de regresión empleados son de tipo II, ambas variables son medidas con error, lo que nos lleva a suponer un espacio bivariante normal. Esta condición permite definir la variable dependiente según sean los objetivos planteados. En este trabajo, todas las variables asociadas a la condición de calidad de agua son tomadas como variables dependientes.

Uno de los mayores problemas en el desarrollo de algoritmos lo produce el efecto de pantalla de los sólidos sobre la biomasa cuando los primeros se hallan presentes en altas concentraciones (zona 1 y 2). El comportamiento de la curva producida entre la banda infrarroja (banda 3) y la clorofila-a no corresponde a lo esperado, esto se traduce en la relación de tipo inverso. Sin embargo, como se puede observar en el análisis estadístico el modelo explica un 90% de la varianza total, siendo cada parámetro de la regresión estadísticamente significativo.

5.3 Resultados

Clorofila y Sólidos

Los modelos obtenidos para estas dos variables son de tipo inverso (Fig. 5.1 y Tabla 5.1). El modelo obtenido es de tipo multiplicativo y muestra un rango de correlación entre -0.6 y -0.97 para un 95% lo que demostraría una alta relación funcional.

Por otra parte, la desviación estándar de la regresión es de $0.423 \mu\text{g/l}$ lo que nos indica una alta precisión del modelo.

De esta forma, el modelo obtenido está explicando las variaciones de la biomasa (clorofila-a) a partir de la concentración de sólidos en un 84,4%.

Clorofila-a y Reflectancia infrarroja (banda 3 MSS Landsat).

La relación existente entre clorofila-a y la reflectancia de la banda 3 es de tipo multiplicativo, correlacionándose negativamente con esta última. El modelo explicaría la variación de la clorofila-a en un 94 % y el error estándar de la estimación sería de $0,29 \mu\text{g/l}$ (Fig. 5.2 y Tabla 5.2). El intervalo de confianza para el

coeficiente de correlación a un 95% está entre 0,85-0,98.

Este modelo fue calculado para 111 datos de 116, 5 de estos datos producían una zona diferente de la población total. El test utilizado para extraer estos puntos fue una comparación entre las medias de los 5 puntos y los 111 restantes. La media de la muestra 1 (n=5) es de 14,416 y la de muestra 2 (n=111) es de 8,83595. Se rechazó la hipótesis nula ($\mu_1 = \mu_2$) para un valor de $t = 2,123$ a un nivel del 95%.

Una hipótesis posible para estos cinco puntos, es que dada su ubicación en una zona de alto uso antrópico (zona 3) lo que implicaría que la entrada de nutrientes debiera ser mayor, de esta manera, aunque los niveles de sedimentos sean altos la biomasa fitoplanctónica podría encontrarse en concentraciones significativamente mayores que las encontradas bajo las mismas concentraciones de sólidos en las zonas 1 y 2.

El comportamiento inverso observado se debe a la presencia de los sólidos que a partir de una determinada concentración empiezan a producir un efecto de pantalla en la reflectancia debido a la biomasa (clorofila-a). Esto último, se traduce en que la señal recibida por la banda infrarroja se debe a una mezcla no separable de ambos componentes, de esta forma, a medida que aumenta la

concentración de sólidos la señal queda determinada mayoritariamente por los sólidos.

5.4 Desarrollo del índice del estado trófico

A partir del concepto de topología , definiremos el estado trófico de acuerdo al área ocupada por una determinada concentración de biomasa fitoplanctónica en relación al área total por zona en un momento dado. La reconstrucción del sistema la basaremos en una malla repetitiva de una unidad simétrica denominada pixel (aproximadamente un cuadrado de 0,5 ha en la realidad). En cada unidad supondremos que la información de reflectancia contenida está asociada a biomasa fitoplanctónica. De esta manera, a partir de determinados rangos de concentraciones y su distribución en la malla asociaremos un determinado estado.

Por otra parte, ya que las unidades de área en nuestra malla son invariantes, cualquier cambio está asociado a la información contenida en cada una de éstas. El estado trófico del sistema en términos de las unidades que lo representan estará asociado a la variación en información asociada a la biomasa para cada unidad entre una y otra fecha. De esta manera, construiremos un índice Beta (β) el cual se relacionará con la concentración de

biomasa en presencia de sólidos en suspensión (Fig. 5.3 y Tabla 5.3), además representaremos estos resultados de acuerdo a nuestra reconstrucción de grilla (Fig. 5.4).

El índice Beta es una relación entre las bandas 1 y 3 del MSS Landsat. El coeficiente de correlación para β y biomasa es de 0,83 con un 95%.

$$\beta = \frac{R1 + R3}{R1 - R3} \quad \text{ec. 5.1}$$

A partir de β es posible construir un índice de producción I_p , que mide la tendencia en el tiempo para los cambios de concentración por área en el caso del componente particulado :

$$I_p = \frac{\sum A_{oi} * \beta_{ni}}{\sum A_{oi} * \beta_{oi}} \quad \text{ec. 5.2}$$

Donde A_{oi} son las unidades de área por estrato, y β_{oi} el valor de β medio por estrato observado para un estado inicial (la relación β y la biomasa es inversa), β_{ni} es la variación del valor beta en un estado n.

El índice de producción I_p mide principalmente la

tendencia de los estratos en el tiempo, por lo tanto, existe una tendencia que predominará en el tiempo y será la que definirá en última instancia el estado del o parte del sistema. Los límites a lo largo del eje oligotrófico - eutrófico (Tabla 5.4) se basaron en una división modificada del índice de Carlson (1977) y la tabla ocupada por Verdin (1985). La Tabla 5.5 muestra los valores asociados a Ip.

TABLA 5.1

MODELO DE REGRESION SIMPLE PARA CLOROFILA-A Y SOLIDOS
 TOTALES EN SUSPENSION

CLOROFILA-A vs SOLIDOS					
- 0,9305					
CLOROFILA = 100,5 * SOLIDOS					
FUENTE	C.M.	F	PROB. >F	R ²	e
MODELO	52,4174	292,06	0,000	0,804	0,42
ERROR	12,743				

TABLA 5.2

MODELO DE REGRESION SIMPLE PARA CLOROFILA-A Y REFLECTANCIA
 BANDA 3 MSS.

CLOROFILA-A vs REFLECTANCIA B3 MSS					
-0,5898					
CLOROFILA = 0,552 - B3					
FUENTE	C.M.	F	PROB. >F	R ²	e
MODELO	56,92	633,24	0,000	0,90	0,29
ERROR	6,202				

TABLA 5.3

MODELO DE REGRESION PARA VALOR β y CLOROFILA-A.

BETA vs CLOROFILA-A					
$- 1,6560$					
CLOROFILA = 17,22 - BETA					
FUENTE	C.M.	F	PROB. >F	R ²	e
MODELO	44,527	165,19	0,000	0,70	0,51
ERROR	18,599				

TABLA 5.4

RANGOS PARA β ASOCIADOS A LOS DISTINTOS ESTADOS TROFICOS. División de estados en el eje oligotrófico - eutrófico para el componente particulado (BIOMASA y SOLIDOS [$\mu\text{g/l}$ y mg/l]), y el valor β .

BIOMASA [$\mu\text{g/l}$]	SOLIDOS [mg/l]	β	ESTADO
< 4	> 32	> 2,41	OLIGOTROFICO
4-10	32 - 12	2,41 - 1,38	MESOTROFICO
> 10	< 12	< 1,38	EUTROFICO

TABLA 5.5

CALCULO DE I_p A PARTIR DE LOS VALORES β .

ESTRATOS	AREA	β_{oi}	β_{ni}	β_{o-area}	β_{n-area}	$I_{pi}\%$
1	833	2,33	1,711	1940,9	1425,3	73,41
2	934	2,32	1,716	2166,9	1602,7	73,96
3	727	1,85	1,883	1345,0	1368,9	101,77
TOTAL				5452,8	4396,9	
Número índice I_p				100	0,806	

5.5 Discusión

Existen dos representaciones gráficas posibles de un objeto en el espacio, a saber: en forma de celda o grilla y en forma vectorial o poligonal (Burrough 1987). En nuestro caso, suponiendo una operacionalidad en el espacio independiente de la topología, hemos utilizado una representación de grilla. El utilizar esta representación implica reconocer unidades que cumplan una condición común. En el Embalse Rapel las unidades de grilla se asocian a rangos de concentración de sólidos totales en suspensión y biomasa (clorofila-a).

Por otra parte, la resolución de la grilla (0,5 ha) está limitada a la resolución espacial del satélite. Lo anterior implica que para determinados fenómenos, esta resolución no sea la más adecuada. Sin embargo, lo fundamental es utilizar la representación de grilla variando el tamaño de la celda de acuerdo a la escala en que el fenómeno de interés se exprese.

En el caso de este estudio la cuadrícula de 0,5 ha da cuenta de la ocupación diferencial del espacio tanto por sólidos como por biomasa fitoplanctónica, pudiéndose apreciar las variaciones temporales en la línea de orilla.

La representación del Embalse Rapel en términos

de su heterogeneidad ha sido abordada por diferentes autores (Cabrera et al. 1977, Soto et al. 1984, Vila et al. 1987). Estos trabajos demostraron mediante un número reducido de estaciones que existe una heterogeneidad biológica-espacial dentro del embalse como un efecto de la componente física. Sin embargo, el concepto asociado dado el uso de un método inductivo implica no poder generalizar a todo el espacio en términos de áreas o zonas, solo es posible hablar de estaciones puntuales diferentes. Por otra parte, no se discute en que rangos de escala debe ser representada esta heterogeneidad, si así fuera cada estación podría ser tratada como un área o simplemente como un punto.

En el sector estudiado del Embalse Rapel fue posible reconocer tres zonas. De estas tres, la influenciada por el Estero Alhué, debido a la direccionalidad de los sólidos en suspensión queda aislada, presentando características de estabilidad en los cambios de estado y distribución de la biomasa. El componente antrópico por el desarrollo de la línea de orilla asociado a las irregularidades y escasa pendiente de los bordes que presenta, debe tener mayor influencia respecto a todo el sistema en términos del aporte de nutrientes, lo que la definiría en una zona de tendencia meso-eutrófica. Las zonas 1 y 2 si bien reciben el

impacto del aporte de sólidos del Tinguiririca y del Cachapoal difieren entre ellas en concentración media de biomasa y sólidos, incluso en la estación de primavera donde se esperaría el florecimiento algal. La zona 2 actuaría como una zona de mezcla de sólidos lo que permitiría una ocupación especialmente favorable para el desarrollo de Melosira granulata (Montecino & Cabrera 1982, Reynolds et al. 1986). A diferencia de la zona tres, estas dos zonas en término de la entrada de sólidos tienden a la oligotrofia de manera transiente recuperándose hacia la meso-eutrofia en los meses de verano. Si observamos la Tabla 5.5, el I_p nos muestra que al compararse el valor de β_{oi} (Sept-87) con β_{ni} (Enero-88) la tendencia en términos de estado trófico y área para la zona 1 ha sido cambiar aproximadamente 221,6 unidades de área a un estado mesotrófico (aproximadamente 110,8 ha). La zona 2 también ha experimentado esta misma tendencia observándose una ocupación de biomasa en aproximadamente 243,2 unidades de área.

El β_3 da cuenta de un estado del embalse para el estrato 3 donde las variaciones respecto a las condiciones del primer muestreo son menores que las encontradas en los estratos 1 y 2. Si comparamos la tendencia del I_{p3} en el tiempo, la tendencia esperada sería marcadamente eutrófico, sin embargo lo observado es lo contrario

disminuyendo en 12,86 ha la ocupación por biomasa. Una hipótesis explicativa podría plantearse en términos de la evacuación de CuSO_4 detectada en el Estero Alhué (Lavanderos y Mühlhauser 1988).

Finalmente el Ip muestra que el valor β por unidad de área de representación ha disminuido dentro del período de muestreo en un 19,36% si se toma todo el embalse (Tabla 5.5) lo que significa una ocupación del espacio por la biomasa (clorofila-a) de acuerdo a la relación con β . Si medimos parcialmente, el estrato 1 ocupa un 33,4%, el estrato 2 un 37,4% y el estrato 3 un 29,0%.

El uso de información satelital tiene por objeto independizar el monitoreo del sistema de información obtenida en terreno. Nuestra calibración entre la biomasa y la radianza medida se construyó a partir del índice β (Tabla 5.3 y Fig. 5.3) de esta manera, podemos en sucesivas imágenes conocer las variaciones espacio-temporales para sólidos y biomasa, y predecir cuantitativamente a partir de la radianza satelital las concentraciones presentes para cada momento en que fue tomada la imagen. Las limitaciones las impone la tecnología satelital ya sea por la capacidad de resolución espectral, espacial o por las condiciones climáticas existentes durante la grabación, esto es, la presencia de

nubes.

En base a la información del MSS Landsat para la banda 2, las zonas distinguidas para todo el sistema son superiores en número a 4, y dependen del régimen hidrológico y del grado de mezcla, de esta manera, tanto la variación en concentración de sólidos y biomasa producen una heterogeneidad espacial del sistema que para 137 Km² no puede ser medida en la componente horizontal por un número de estaciones reducido ya que supondría continuidad entre un punto y otro.

Con respecto al parámetro β los valores para la zona 1 y 2 muestran cambios pronunciados por estrato en términos de la variación de radianza (asociada a biomasa) (Tabla 5.5). Las explicaciones posibles en términos físicos son un retroceso de la biomasa por causa de la calidad y cantidad particulada en el flujo de los tributarios, o un efecto de pantalla de los sólidos respecto al recurso luz. Esto es corroborado por el valor β Enero-88 (Fig. 5.4). La imagen muestra un aumento en la ocupación de la zona 1 y la zona 2, principalmente por biomasa (clorofila-a).

Por otra parte y debido al origen de la cuenca, el componente particulado rico en carbonatos podría aumentar el pH de ambas zonas y limitar la asimilación de carbono por parte del fitoplancton (Margalef 1983).

Si bien esta ocupación por biomasa es diferencial en el espacio y en el tiempo, debe explicitarse a partir de la toma de nuevos datos ya que implica una serie en el tiempo. El Ip debe enriquecerse de acuerdo a futuras mediciones correlacionándolo con causales distintas a escalas diferentes, de esta manera el sistema es separable en unidades de mayor o menor productividad con lo cual las políticas de control y manejo deberán ser particulares.

5.6 Conclusiones

El uso de la Percepción Remota particularmente la información multiespectral del satélite Landsat, permite la medición de variables abióticas y bióticas, permitiendo establecer una topología dirigida.

La información obtenida para las aguas superficiales del Embalse Rapel a través del MSS Landsat está en su mayoría asociada a la dinámica de las partículas en suspensión.

En este embalse, el análisis multiespectral como valor BETA permitió seguir la dinámica de variación cuantitativa entre los sólidos y la biomasa (clorofila-a) a través del índice de cambio (Ip) de información en las unidades de área que conforman un estrato.

El número de estratos y su composición en cuanto a sólidos y biomasa determinados por satélite y corroborados en terreno, asociados a una época del año y al régimen hidrológico, no permite clasificarlo en un único estado trófico sino con situaciones transientes presentando diferentes estados en un mismo momento y también entre los diferentes estratos.

El índice I_p puede ser aplicado a cualquier sistema que presente patrones espaciales distinguibles espectralmente por percepción remota.

El indicador beta (β) depende directamente de las características cualitativas del componente particulado del cuerpo de agua.

La categorización trófica de un sistema lacustre debe tomar en cuenta no sólo la composición comunitaria en un determinado momento y lugar sino que considerar los cambios de abundancia y de su distribución espacial, entendiendo el espacio como anisotrópico. Esto último, si bien es conocido y aplicado por definición se encuentra en la práctica con problemas metodológicos que en función de la escala pueden ser superados a través de la tecnología de sensores remotos.

5.7 Proyecciones

La limnología regional no permite generalizaciones de sistemas ecológicos forzados en términos de evaluar causalidades, si el factor antrópico está directamente asociado al sistema en forma simétrica o asimétrica. Lo anterior se explica en que si observamos la cuenca de los ríos Tinguiririca y Cachapoal la producción agrícola y la práctica social con que ésta se lleva a cabo determina entradas de determinados elementos que se distribuyen según el régimen hidrológico. La práctica en el uso de abonos o el tipo de producción no son generalizables a los cuerpos de agua que están cercanos a las unidades de producción. De lo anterior las condiciones objetivas para encontrar una u otra determinada especie no son determinadas en última instancia por una categoría abiótica o biótica sino por el componente antrópico que puede estar distribuido alrededor del sistema (simétrico) o puede influenciar sólo en el aporte de los tributarios (asimétrico).

A partir de la representación del espacio mediante una unidad repetitiva, donde los cambios al interior de la unidad permiten describir una perturbación a través de una malla, y donde dependiendo de la escala, esta malla define bordes y límites de los objetos que definen una

configuración del espacio, encontramos en definitiva toda una riqueza en la variación horizontal que permite un avance en el proceso de verdad de la realidad objetiva.

La categorización de un ecosistema en términos de sus cambios estructurales o plasticidad, a través de indicadores de estado debe hacer explícita la tendencia de cambio de éste utilizando la topología mediada por la escala. De esta manera, causales que operan en diferentes escalas pueden ser integradas en términos del cambio estructural y en términos superiores, de la pérdida de la organización como es el caso de los sistemas forzados (Margalef 1983).

El definir un estado en base a la composición comunitaria sucesional en un momento, independientemente de categorías de representación superiores como es el paisaje, subestima la plasticidad y la heterogeneidad en el componente horizontal, por otra parte el no considerar la ocupación vertical del espacio, subestima los efectos que operan en la compartimentación del sistema. De esta manera, ni la componente vertical ni la horizontal en un sistema límnicó por sí solas globalizan los cambios al interior de éste.

En la categorización trófica en el eje oligotrófico- eutrófico se requiere integrar la estructura

horizontal de las diferentes variables que definen la condición de estado, particularmente en el caso de sistemas forzados.

El uso de índices tróficos tiene como propósito más que ayudar a explicar un grado de funcionamiento de un sistema, el poder medir una tendencia en forma simple y rápida, de esta manera, el recurso como tal puede ser seguido y controlado por los encargados de la toma de decisiones.

La verdad en ciencias es un proceso, depende en gran medida de la calidad perceptiva sobre el medio mediada por la tecnología. Una simple abstracción como es un índice acusa hoy la integración conceptual sobre el análisis y representación del espacio a partir de ciencias síntesis como lo son la Ecología y la Geografía. Todo esto apunta indiscutiblemente hacia la consolidación metodológica de la concepción transdisciplinaria.

FIGURA 5.1

MODELO DE CLOROFILA-A Y SOLIDOS EN SUSPENSION

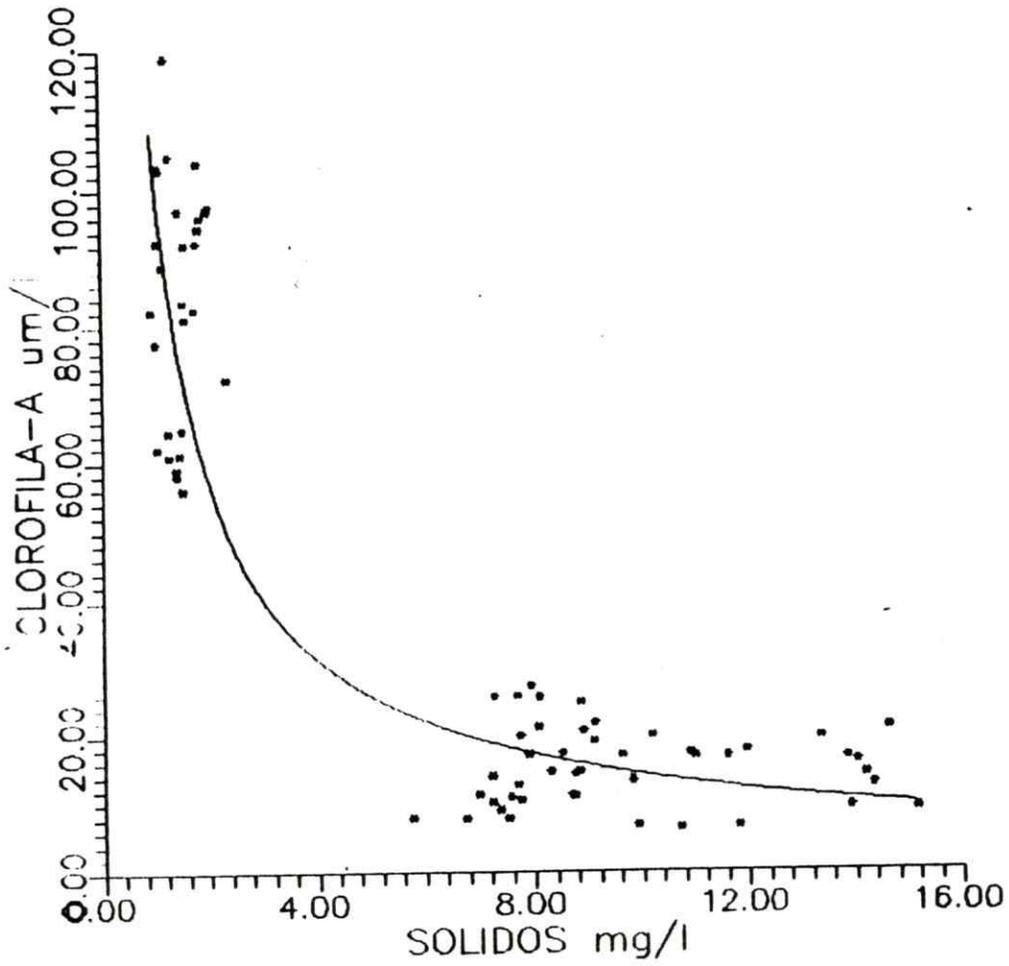


FIGURA 5.2

MODELO DE CLOROFILA-A Y REFLECTANCIA BANDA 3 MSS

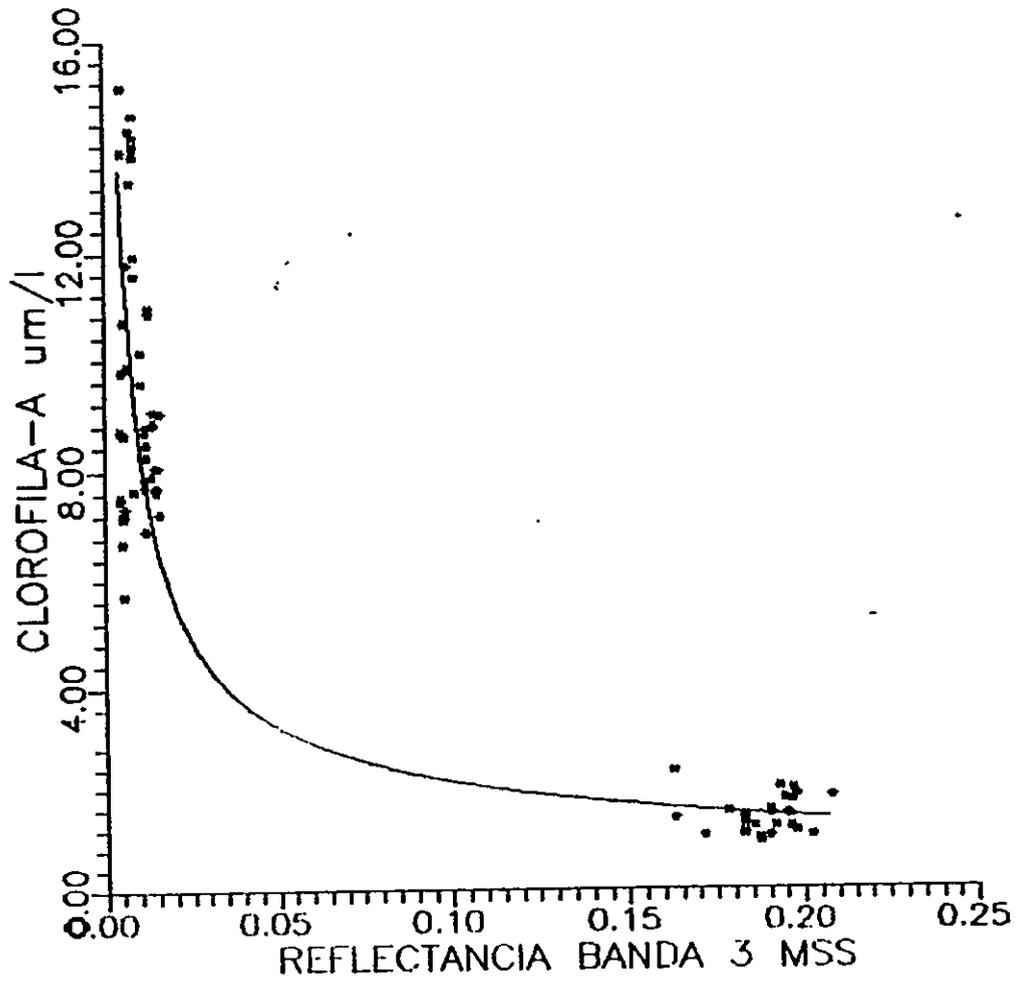


FIGURA 5.3

MODELO DE CLOROFILA-A Y EL INDICE BETA

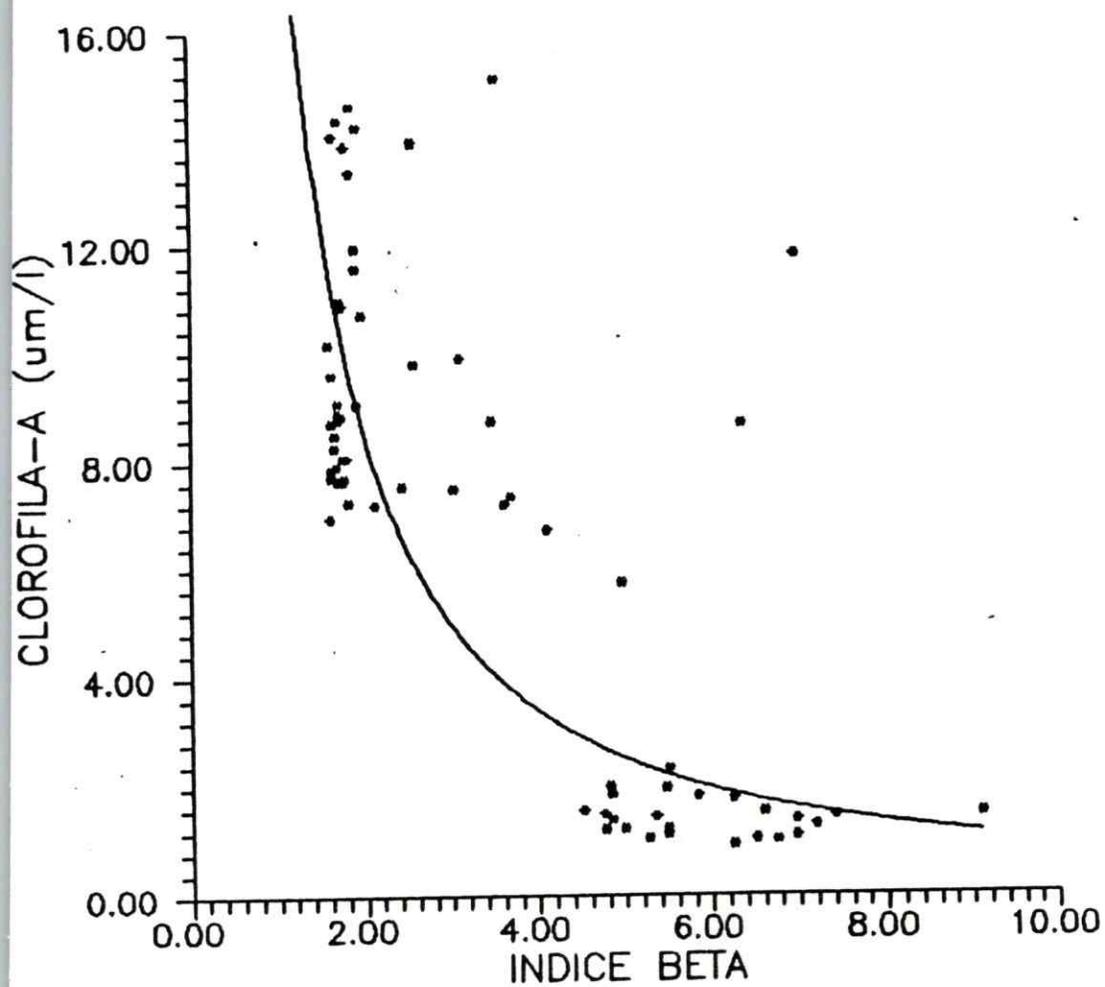
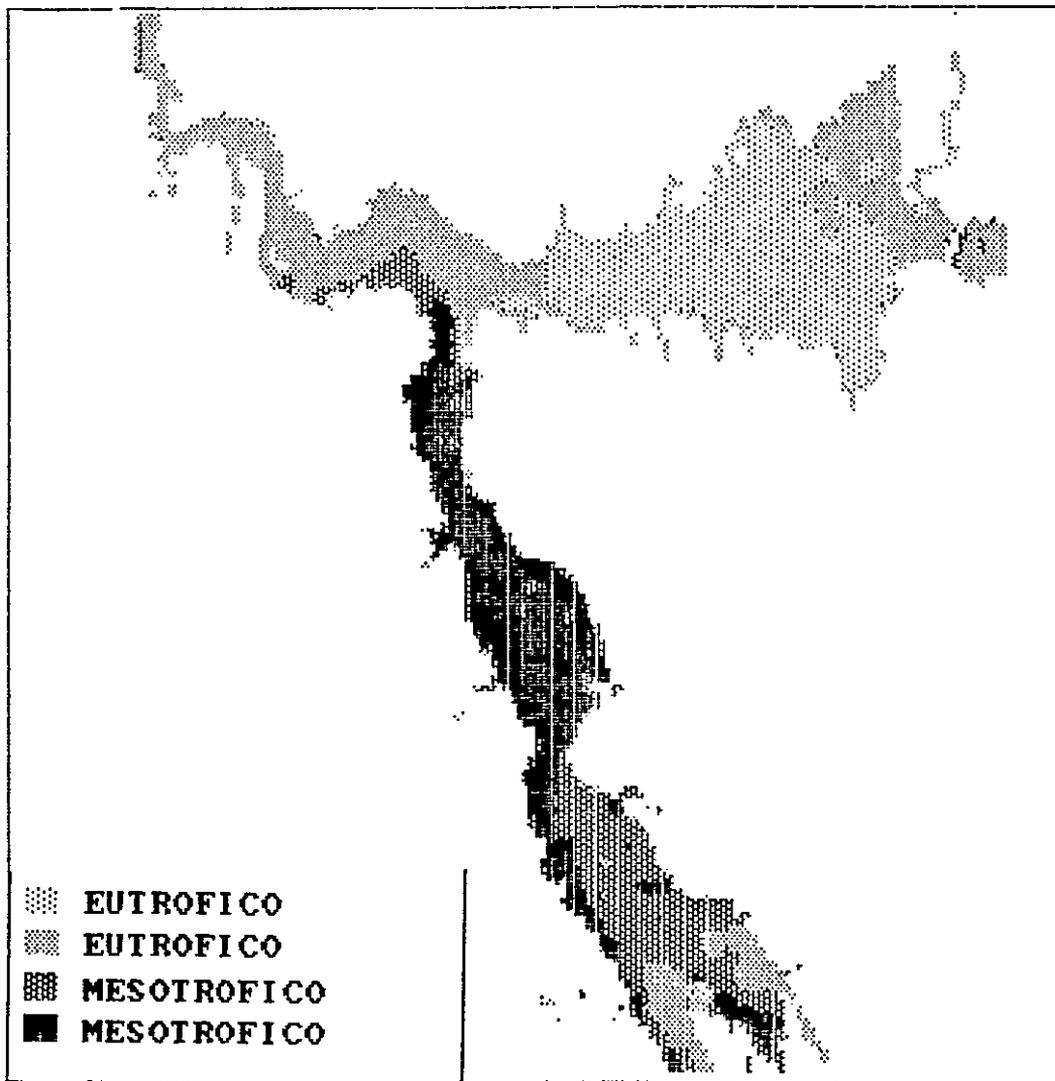


FIGURA 5.4

ESTADOS TROFICOS EMBALSE RAPEL SEGUN INDICE BETA
18 DE ENERO DE 1988



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AHERN F., D. GOODENOUGH, S. JAIN, V. RAO & G. ROCHON, 1977. Use of clear lakes as standard reflectors for atmospheric measurements. Proceedings of the Eleventh International Symposium on Remote Sensing of the Environment, Environmental Research Institute of Michigan, 1: 731-755.

ALFÖLDI T. & J.C. MUNDAY, 1978. Water quality analysis by digital chromaticity mapping of Landsat data. Canadian Journal of Remote Sensing, 4: 108-126.

APHA 1978. Standard methods for the analysis of water and waste waters.

BARTHOLDI J. & S. FOLVING, 1986. Sediment classification and surface type mapping in the danish wadden sea by remote sensing. Netherlands Journal of Sea Research, 20: 337-345.

BOLOS M. 1985. Problemática actual de los estudios de paisaje integrado. Revista Geográfica de Barcelona, 20: 45-68.

BRAKEL H.W., 1984. Seasonal dynamics of suspended-sediment plumes from the Tana and Sabaki rivers, Analysis of Landsat imagery. Remote Sens. Environ., 16: 165-173.

BURROUGH P.A., 1987. Principles of geographical information systems for land resources assessment. Monographs on soil and resources survey No 12. Clarendon Press-Oxford. 193 pp.

CABRERA S. y V. MONTECINO, 1987. Productividad primaria en ecosistemas límnicos. Arch. Biol. Med. Exp., 20: 105-116.

CABRERA S., V. MONTECINO, I. VILA, N. BAHAMONDE, I. BAHAMONDES, I. BARENDIS, R. RODRIGUEZ, R. RUIZ y D. SOTO, 1977. Características limnológicas del Embalse Rapel. Chile central. Seminario sobre medio ambiente y represas, 1: 40-61.

CARLSON R.E., 1977. A trophic state index for lakes. Limnol. Oceanogr., 22: 361- 369.

CARLSON R.E., 1980. More complications in the chlorophyll-Secchi disk relationship. *Limnol. Oceanogr.*, 25: 379-382.

COCHRAN W.G., 1976. Técnicas de muestreo. John Wiley & Sons, Inc. Compañía Editorial Continental, México.

CORDOVA F., V. MONTECINO, R. ORELLANA & C. PATTILLO, 1986. Procesamiento de imágenes digitales: técnicas fundamentales y aplicaciones en la investigación en Biología. *Arch. Biol. Med. Exp.*, 19: 359-373.

DUNCAN N. & J. RZOSKA, 1978. Land use impacts on lake and reservoir ecosystems. Proceedings of the Project 5 Workshop May 26-June 2, Warsaw, Poland. Facultas Verlag, Wien. 294 pp.

DUSSART B.H., 1984. Los sedimentos en los embalses. En Bahamonde N. y S. Cabrera (eds.), *Embalses: Fotosíntesis y Productividad Primaria*. Universidad de Chile, Santiago. 27-31.

FORMAN R. & M. GODRON, 1986. *Landscape Ecology*. Wiley & Sons, Inc. USA. 620 pp.

FRASER R.S., 1975. Interaction Mechanisms Within the Atmosphere. En Reeves R.G., A. Anson y D. Landen (eds.), *Manual of Remote Sensing*. 181-233 pp.

GLIWICZ Z.M. & A. KOWALCZEWSKI, 1978. Eutrophication of Great Masurian Lakes recorded by some indices. Citado por Mühlhauser 1988.

GOLTERMAN H.L., 1975. *Physiological Limnology: An approach to the physiology of lake ecosystems*. Elsevier Scientific Publishing C.O. Netherlands. 489 pp.

GONZALEZ R.C. & P. WINTZ, 1981. *Digital image processing*. APMCC 13 Addison-Wesley Publishing Co. U.S.A. 431 pp.

HARDY N.E. & W.C. JEFFERIES, 1981. Chromaticity analysis of color aerial photography and its application to detection of water quality changes in acid-stressed lakes. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 7: 4-23.

JEFFREY S.W. & G.F. HUMPHREY, 1975. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c, and c₂ in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochem. Physiol. Plant.*, 167: 191-194.

KEDROV B., 1974. De la síntesis en las ciencias. En *Hombre, Ciencia, Técnica*, Academia de Ciencias de la U.R.S.S. Editorial Cartago, Buenos Aires. 61-82.

KHORRAM S., 1981. Water quality mapping from Landsat digital data. *International Journal of Remote Sensing*, 2: 145-153.

KHORRAM S., 1982. Remote sensing of salinity in the San Francisco Bay Delta. *Remote Sensing of Environment*, 12: 15-22.

KHORRAM, S. & H.M. CHESHIRE, 1985. Remote Sensing of water quality in the Neuse River Estuary, North Carolina. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 51: 329-341.

KIRK J.T., 1983. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Cambridge University Press, Cambridge.

KIRK J.T., 1984. Dependence of relationship between inherent and apparent optical properties of water on solar altitude. *Limnol. Oceanogr.*, 29: 350-356.

KLEMAS V., J. BORCHARDT & W. TREASURE, 1973. Suspended sediments observations from ERTS-1. *Remote Sensing of Environment*, 2: 205.

KOPNIN P.V., 1969. Hipótesis y verdad. Editorial Grijalbo, México. 58 pp.

KRITIKOS H., L. YORINKS & H. SMITH, 1974. Suspended solids analysis using ERTS-A data. *Remote Sensing of Environment* 3: 69.

LAVANDEROS L, 1987. Aplicación de la técnica de análisis multitemporal en estudio de sedimentos superficiales en sistemas lacustres. *Arch. Biol. Med. Exp.*, 20: 125-130.

LAVANDEROS L. y H. MÜHLHAUSER, 1988. Aproximación espacial a la distribución de contaminantes químicos en el Embalse Rapel. Libro Resumen Congreso Química Ambiental de Suelo y Agua. Santiago, Chile.

LAVANDEROS L. y C. PATTILLO, 1988. Propositiones para optimizar la medición del estado trófico en sistemas lacustres (Uso de la Percepción Remota en la representación espacial de fenómenos superficiales). Libro resumen Taller Internacional de Biología Pesquera, 1987. FAO, UNESCO (En prensa).

LAVANDEROS L. y C. PATTILLO, 1988. Delimitación y caracterización estructural de formaciones vegetacionales en la zona altoandina de Chungará (Uso de la Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica como

aproximación metodológica). Ambiente y Desarrollo (En revisión).

LAVANDEROS L. y C. FONFACH, 1989. Determinación de patrones vegetacionales en la zona altoandina de Chungará de acuerdo a sus características estructurales. Ambiente y Desarrollo (En revisión).

LAVANDEROS L., M.E. POZO y C. PATTILLO, 1988. Cuantificación de sólidos en suspensión en el Embalse Rapel mediante información Landsat. Magazine SELPER 2: 25-30.

LAVANDEROS L., M.E. POZO, C. PATTILLO y H. MIRANDA, 1988. Landsat image and sample design for water reservoir (Rapel Dam central Chile). Journal of Environmental Monitoring & Assessment (En revisión).

LEMOALLE J. 1980, Application des données Landsat à l'estimation de la production du phytoplancton dans le lac Tchad. Cahiers ORS-TOM, s. Hydrobiol. 13: 35-46.

LILLESAND T.M., W.L. JOHNSON, R.L. DEWELL, O.M. LINDSTROM & D.E. MEISNER, 1983. Use of Landsat data to predict trophic states of Minnesota Lakes. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 49: 219-229.

LINDELL T., B. KARLSSON, M. ROSENGREN & T. ALFÖLDI, 1986. A further development of the chromaticity technique for satellite mapping of suspended sediment load. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 52: 1521-1529.

MARBLE D.F., H.W. CALKINS & D.J. PEUQUET, 1984. Basic readings in Geographic Information Systems, SPAD., Williamsville.

MARGALEF R., 1983. Limnología. Ediciones Omega, España. xvi+1009 pp.

MEGARD R. O., J.C. SETTLES, H.A. BOYER & W.S. COMBS Jr., 1980. Light, Secchi disks, and trophics states. Limnol. Ocenogr, 25: 373-377

MONTECINO V. & S. CABRERA, 1982. Phytoplankton activity and standing crop in an impoundment of central Chile. J. Plankton Res., 4: 943-950.

MOORE G.K., 1980. Satellite remote sensing of water turbidity. Hydrological, Sciences-Bulletin-des Sciences Hydrologiques 25: 407-421.

- MÜHLHAUSER H., 1988. Generalidades sobre el uso de índices de cambios ecológicos en ecosistemas acuáticos temperados. Una revisión. Libro resumen Taller Internacional de Biología Pesquera, 1987. FAO, UNESCO (En prensa).
- PATTILLO C., 1987. Identificación de viñedos mediante imágenes del sensor Thematic Mapper. Informe de Avance Proyecto Fondecyt 277/87. 43 pp.
- PREISENDORFER R.W., 1986. Secchi disk science: Visual optics of natural waters. *Limnology and Oceanogr.*, 31: 909-926.
- RAPOPORT E.H., 1975. Areografía. Estrategias geográficas de las especies. Gráfica Panamericana, México. 214 pp.
- REYNOLDS C.S., V. MONTECINO, M.E. GRAF & S. CABRERA, 1986. Short-term dynamics of a Melosira population in the plankton of an impoundment in central Chile. *Journal of Plankton Research*, 8: 715-740.
- ROBINOVE C.J., 1982. Computation with physical values from Landsat digital data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 48: 781-784.
- SCARPACE F., K. HOLMQUIST & L. FISHER, 1979. Landsat analysis of lake quality. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 45: 623-633.
- SHANNON L.V., S.A. MOSTER, N.M. WALTERS & F.P. ANDERSON, 1983. Chlorophyll concentration in the Southern Benguela current region as determined by satellite (Nimbus-7 Coastal Zone Colour Scanner). *Plankton Res.* 5.
- SOTO D., I. VILA & B. VILLALOBOS, 1984. Temporal and spatial distribution of rotifera in a Chilean reservoir: A possible effect of impoundment hydrodynamics. *Hydrobiologia*, 114: 67-74.
- STEEL R.G. y J.H. TORRIE, 1985. Bioestadística. Mc Graw-Hill Latinoamericana S.A. 622 pp.
- STRICKLAND J.D. & T.R. PARSONS, 1968. A practical handbook of seawater analysis. *Bull. Fish. Res. Bd. Can.*, 167: 311.
- SUKHATME P. V., 1962. Teoría de encuestas por muestreo con aplicaciones. Fondo de Cultura Económica. México. xxxi+495 pp.
- TILZER M., 1988. Secchi disk - chlorophyll relationships in a lake with highly variable phytoplankton biomass.

Hydrobiologia, 162: 163-171.

TOMLINSON R.F., 1984. Geographic Information System. A New Frontier. Keynote Address to the International Symposium on Spatial Data Handling, August 20-24, Zurich, Switzerland.

TURNER R. & M. SPENCER, 1972. Atmospheric model for correction of spacecraft data. Proceedings of the Eighth International Symposium on Remote Sensing of Environment, Environmental Research Institute of Michigan, 895-934.

UHLMANN D. & J. HRBACEK, 1976. Kriterien der Eutrophie stehender Gewässer. Limnológica, 10: 245-253.

VERDIN J., 1983. Corrected vs. uncorrected Landsat 4 MSS data. Landsat Data Users Notes. National Oceanic and Atmospheric Administration, 4-8.

VERDIN J., 1985. Monitoring water quality conditions in a large western reservoir with Landsat imagery. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 51: 343-353.

VILA I., I. BARENDIS, y V. MONTECINO, 1987. Abundancia y distribución temporal del fitoplancton en el Embalse Rapel, Chile Central. Revista Chilena de Historia Natural, 60: 37-55.

WETZEL R.B., 1983. Limnology. W.B. Saunders Co., New York.

WEZERNAC C., F. TANIS & C. BAJZA, 1976. Trophic state analysis of Island lakes. Remote Sensing of Environment, 5: 147-165.

WEZERNAKE C.T., 1974. The use of Remote Sensing in Limnological studies. Proceed. 9th Int. Symp. on remote sensing of environment, 963-980.

WRIGLEY R.C. & A.J. HORNE, 1974. Remote sensing and lake eutrophication. Nature, 250: 213-214.

ANEXO 1

La percepción remota o teledetección es una técnica que consiste en captar la energía electromagnética emitida o reflejada por los objetos sin estar en contacto con ellos.

Todo objeto cuya temperatura sea mayor que 0°K emite energía electromagnética (E.E.). Para captar esta energía se utilizan instrumentos especiales denominados "sensores remotos". Estos equipos poseen detectores adecuados para recibir la E.E. emitida o reflejada por los objetos, en rangos de longitudes de onda o frecuencias específicas.

En este trabajo se utilizó el sensor MSS a bordo del satélite Landsat. A continuación explicaremos las características del sensor MSS, así como también algunos conceptos básicos en percepción remota.

SENSOR MSS (características generales)

- 4 bandas espectrales

Banda 1: 0.5 - 0.6 μm (verde)

Banda 2: 0.6 - 0.7 μm (rojo)

Banda 3: 0.7 - 0.8 μm (infrarojo cercano)

Banda 4: 0.8 - 1.1 um (infrarojo cercano) - Resolución radiométrica: 64 niveles de grises discriminables.

- Resolución espacial : 56 * 79 metros
- Tamaño de la escena : 185 * 185 Kms
- Resolución temporal : 16 días (Landsat 4 y 5)

Principales elementos discriminables por MSS en la cubierta del suelo:

Vegetación

Zonas urbanas

Agua

Nieve

Rocas, suelo desértico.

- Resolución espacial: corresponde a la menor separación angular o lineal que un sensor puede diferenciar. Se mide en unidades de distancia. Comúnmente se entiende como el grado de detalle entregado por un sistema.

- Resolución espectral: se refiere al ancho o rango en el que trabaja un detector. Por ejemplo el MSS trabaja en un rango que va desde el visible hasta el infrarojo cercano.

- Resolución radiométrica: es la sensibilidad del detector para diferenciar pequeños cambios en la energía incidente.

- Resolución temporal: es la periodicidad con la cual un sensor toma información de un objeto.

ANEXO 2

FIG. 1

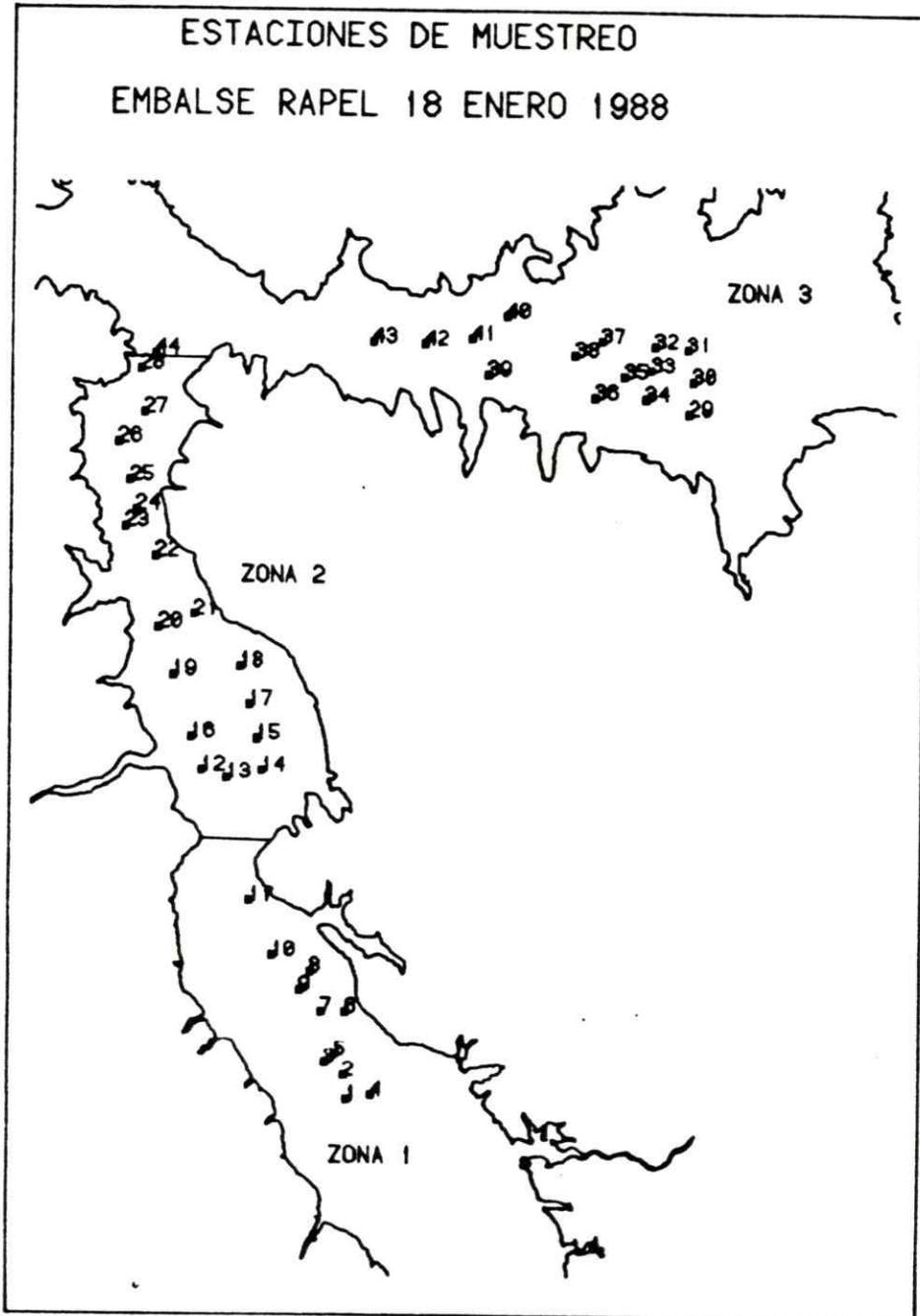


FIG. 2

