

**INFLUENCIA DE LA RESOLUCION ESPACIAL DE LA
TEMPERATURA DE SUPERFICIE TELEDETECTADA EN EL
CONTEXTO NDVI-T_s**

Por Daniela Teresita Girolimetto

Director: Dra. Virginia Venturini

Co-Director: Dra. Leticia Rodríguez

Tesis remitida al Comité Académico de Maestría de la

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS HÍDRICAS

Como parte de los requisitos para la obtención del grado de

MAGISTER EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

de la

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL

2008

Resumen

La teleobservación proporciona información invaluable acerca de diferentes ecosistemas. La evapotranspiración (ET) y por consiguiente la fracción evaporable, FE (definida como el cociente entre ET y la energía disponible) forman parte del balance de energía utilizable para cualquier ecosistema terrestre. La metodología propuesta recientemente por Jiang e Islam (2001, 2003), estima FE espacialmente distribuida usando una interpretación contextual de la relación entre dos variables fácilmente teleobservadas: temperatura superficial radiométrica (T) e índice de vegetación diferencial normalizado (Normalized Difference Vegetation Index-NDVI). Es común observar que el espacio generado con ambas variables tiene una forma triangular, con borde inferior (T_{\min}) y otro superior.

En particular, la T puede ser estimada a partir de un método monocanal o multicanal. En esta tesis, se usaron dos estimaciones diferentes de T con imágenes del sensor MODIS. La primera estimación se realizó con una sola banda, la 31 y la temperatura obtenida se denominó T_{31} . La segunda estimación consistió en usar el producto MOD11 que aplica un método split window (T_s). En ambos casos se analizó la influencia del tamaño del píxel de las imágenes de T en el espacio contextual NDVI-T.

Se observó que la característica espacial de T_{31} y T_s original no cambia notablemente con las diferentes resoluciones espaciales. En lo que respecta al modelo desarrollado por Jiang e Islam, este es aplicable con diferentes tamaños de píxeles siempre que se adopte T_{\min} como la temperatura media del agua para una resolución de 1x1 km. Si no es posible calcular T_{\min} con imágenes cuya resolución es 1x1 km por no estar disponible o por que la contaminación con nubes lo impide, los resultados solo podrían considerarse como aproximaciones y deben ser cuidadosamente analizados.

Abstract

At present, the remote sensing technology provides valuable information about different ecosystems. The evapotranspiration (ET) and the evaporative fraction, EF (defined as the ratio between ET and the available energy) are key variables in the energy balance used by any terrestrial ecosystem. Recently Jiang and Islam (2001, 2003), proposed a simple methodology to estimate EF based on a contextual interpretation of two remotely sensed variables, i.e. the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the radiometric temperature (T). These two variables usually form a triangle with a lower (T_{\min}) and an upper borders. Particularly, T can be estimated with a single channel method or split window methodology. In this thesis, both methods were analysed with MODIS images. A first estimation was done with band 31 and the temperature named T_{31} . Then, MOD11 product (T_s), obtained with an split-window method, was used. The influence of the different spatial resolutions of the T images were analysed in the context of the NDVI-T space.

The original spatial characteristics of T_{31} and T_s would not significantly change with changes in the images spatial resolutions. However, Jiang and Islam's method would be applicable with different pixel sizes when T_{\min} is obtained as the mean water temperature from images of 1x1 km spatial resolution. If this is not possible, because of cloud contamination or any other reason, the results should be considered as an approximation and must be carefully analysed.

DECLARACION DE LA AUTORA

Esta tesis ha sido remitida como parte de los requisitos para la obtención del grado académico Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos ante la Universidad Nacional del Litoral y ha sido depositada en la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas para que esté a disposición de sus lectores bajo las condiciones estipuladas por el Reglamento de la mencionada Biblioteca.

Citaciones breves de esta tesis son permitidas sin la necesidad de un permiso especial, en la suposición de que la fuente sea correctamente citada. Solicitudes de permiso para la citación extendida o para la reproducción parcial o total de este manuscrito serán concebidos por el portador legal del derecho de propiedad intelectual de la obra.

Firma:.....

*Este trabajo está dedicado a Miguel,
por haberme enseñado que más allá de los tiempos
y de las circunstancias de la vida,
todo es posible.*

INDICE DE CONTENIDOS

INDICE DE FIGURAS	iii
INDICE DE TABLAS	vi
Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Marco de la tesis	1
1.2 Conceptos generales	1
1.3 Modelos de uso corriente	5
1.4 Aportes de la teledetección	9
1.5 Objetivos	12
1.6 Contenido de la tesis	12
Capítulo 2: Metodología	14
2.1 Introducción	14
2.2 Método de Jiang e Islam (2001)	15
2.3 Procesamiento de imágenes	18
2.3.1 Software utilizado	18
2.3.2 Métodos para obtener la Temperatura de Superficie T_s	19
2.3.3 Tratamiento de imágenes	23
Capítulo 3: Área de estudio y datos utilizados	27
3.1 Ubicación	27
3.2 Hidrografía y clima	28
3.3 Utilización del suelo	29
3.4 Imágenes utilizadas	30
3.4.1 Productos MODIS.....	31

3.4.2 Imágenes procesadas.....	34
Capítulo 4: Resultados.....	35
4.1 Comparación de T_{31} y T_s	35
4.2 Análisis con T_{31}	39
4.2.1 Análisis del parámetro ϕ con T_{\min} constante	46
4.2.2 Análisis del parámetro ϕ con T_{\min} variable	52
4.3 Análisis con T_s	57
4.3.1 Análisis del parámetro ϕ con T_{\min} constante	62
4.3.2 Análisis del parámetro ϕ con T_{\min} variable	67
Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones.....	73
Bibliografía	77
Apéndice 1.....	81

INDICE DE FIGURAS

Figura N° 1.1: Esquema del fenómeno físico de evaporación.....	2
Figura N° 1.2: Balance de Energía	2
Figura N° 1.3: Modelo de una capa	4
Figura N° 1.4: Modelo de evapotranspiración de dos capas.....	5
Figura N° 1.5: Esquema de la curva de presión de saturación de vapor de agua y de los procesos adiabático y diabático utilizados por Penman.....	8
Figura N° 2.1: Ejemplo de un espacio contextual NDVI- T_s	16
Figura N° 2.2: Esquema del proceso de transferencia radiativa.....	20
Figura N° 2.3: Esquema de agregación de los píxeles de las imágenes de radiancia.....	25
Figura N° 2.4: Esquema de pixelado de las imágenes de T_{banda}	26
Figura N° 3.1: Ubicación área de estudio	27
Figura N° 4.1: Comparación de los valores medios regionales de T_{31} y T_s para las resoluciones espaciales analizadas. Días 259 y 268 del año 2004.....	36
Figura N° 4.2: Comparación píxel a píxel de la T_{31} y T_s - Día 259/2004 para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km.....	37
Figura N° 4.3: Comparación píxel a píxel de la T_{31} y T_s - Día 268/2004 para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km.....	38
Figura 4.4: Relación $R_{31}-T_{31}$ para el día 268/2004 para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km	40
Figura N° 4.5: Imagen de NDVI (1x1 km) correspondiente al día 268/2004	41
Figura N° 4.6: Imágenes de T_{31} del día 268/2004 para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km	42
Figura N° 4.7: Valores mínimos, medios y máximos de T_{31} para el día 268/2004	43

Figura N° 4.8: Histogramas de frecuencia de T_{31} – Día 268/2004 para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 4x4 km (e) 10x10 km.....	44
Figura N° 4.9: Diagramas triangulares NDVI- T_{31} con T_{\min} constante - Día 268/2004 para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km	47
Figura N° 4.10: Representación gráfica de los estadísticos de ϕ para diferentes resoluciones y T_{\min} constante: (a) medias regionales y (b) desvíos estándares	48
Figura N° 4.11: Histogramas de frecuencia de ϕ para el día 268/2004 con T_{\min} constante para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km.	50
Figura N° 4.12: Imágenes de ϕ para el día 268/2004 con T_{\min} constante, obtenidas con el producto MOD02 para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km.....	51
Figura N° 4.13: Diagramas triangulares NDVI- T_{31} con T_{\min} variable – Día 268/2004 para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km	53
Figura N° 4.14: Representación gráfica de las medias y desvíos estándares (S) de los valores regionales de ϕ a diferentes resoluciones para T_{\min} variable: (a) medias regionales y (b) desvíos estándares.....	54
Figura N° 4.15: Histogramas de ϕ con T_{\min} variable – Día 268/2004 para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km	55
Figura N° 4.16: Imágenes de ϕ con T_{\min} variable, obtenidas con el producto MOD02 – Día 268/2004 para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km.	56
Figura N° 4.17: Imágenes de T_s – Día 268/2004 para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km.	58
Figura N° 4.18: Valores mínimos, medios y máximos de T_s para el día 268/2004.....	59

Figura N° 4.19: Histogramas de frecuencia de T_s – Día 268/2004 para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km.....	60
Figura N° 4.20: Diagramas triangulares NDVI- T_s obtenidos con T_{min} constante – Día 268/2004 para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km.	62
Figura N° 4.21: Representación gráfica de las medias y desvíos estándares (S) de los valores regionales de ϕ para diferentes resoluciones para T_{min} variable. (a) medias regionales y (b) desvíos estándares.....	63
Figura N° 4.22: Histogramas de frecuencia de ϕ para T_{min} constante – Día 268/2004 para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km.	65
Figura N° 4.23: Imágenes de ϕ para T_{min} constante – Día 268/2004 para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km.	66
Figura N° 4.24: Diagramas triangulares NDVI- T_s para T_{min} variable - Día 268/2004 para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km.	67
Figura N° 4.25: Representación gráfica de las medias y desvíos estándares (S) de los valores regionales de ϕ para diferentes resoluciones y T_{min} variable: (a) medias regionales y (b) desvíos estándares.....	68
Figura N° 4.26: Histogramas de frecuencia de ϕ para T_{min} variable – Día 268/2004 para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km	69
Figura N° 4.27: Imágenes de ϕ para T_{min} variable – Día 268/2004 para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km.....	71

INDICE DE TABLAS

Tabla N° 1.1 : Símbolos y definiciones – Ecuaciones (1.4), (1.5), (1.6).....	6
Tabla N° 1.2 : Símbolos y definiciones – Ecuación (1.7).....	8
Tabla N° 2.1 : Símbolos y definiciones - Ecuación (2.5)	21
Tabla N° 2.2 : Símbolos y definiciones – Ecuación (2.6).....	22
Tabla N° 3.1: Año de adquisición de las imágenes, día del año, producto MODIS, hora de adquisición y calidad de las imágenes.	34
Tabla N° 4.1: Comparación de los valores mínimos, medios y máximos de T_{31} (°K) a diferentes resoluciones espaciales	43
Tabla N° 4.2: Características de los bordes superiores de los espacios triangulares obtenidos para cada día y cada resolución espacial.	46
Tabla N° 4.3: Comparación de las medias y desvíos estándares (S) de los valores regionales de ϕ a diferentes resoluciones para T_{\min} constante.	48
Tabla N° 4.4: Comparación de las medias y desvíos estándares (S) de los valores de ϕ a diferentes resoluciones para T_{\min} variable.	54
Tabla N° 4.5: Comparación de los valores mínimos, medios y máximos de T_s (K) a diferentes resoluciones espaciales	59
Tabla N° 4.6: Características de los espacios triangulares para diferentes resoluciones espaciales.	61
Tabla N° 4.7: Comparación de las medias y desvíos estándares (S) de los valores de ϕ para diferentes resoluciones para T_{\min} constante	63
Tabla N° 4.8: Comparación de las medias y desvíos estándares (S) de los valores de ϕ para diferentes resoluciones para T_{\min} variable	68

Tabla N° 4.9: Comparación de las medias regionales del parámetro ϕ obtenido para T_{31} y T_s usando T_{\min} constante.....	72
Tabla N° 4.10: Comparación de las medias regionales del parámetro ϕ obtenido para T_{31} y T_s usando T_{\min} variable.....	72

Capítulo 1: Introducción

1.1 Marco de la tesis

El presente trabajo ha sido desarrollado en el marco del Proyecto CAI+D 24-138 2006 “Monitoreo de la Fracción Evaporable y Evapotranspiración en Zonas No-heterogéneas a través de Imágenes Satelitales”, financiado por la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional del Litoral (UNL).

El citado proyecto es llevado a cabo en el Centro de Estudios Hidro-Ambientales (CENEHA) de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Provincia de Santa Fe, Argentina.

1.2 Conceptos generales

La evapotranspiración (ET), puede definirse como el proceso de transformación de la fase líquida del agua de una superficie libre a la fase de vapor, proceso conocido como evaporación (E), más la transpiración de las plantas. ET es el segundo componente más importante del ciclo hidrológico luego de la precipitación. Es común encontrar valores de ET del orden del 60% a 65% del valor precipitado al cuantificar el movimiento del agua sobre la superficie de la tierra (*Brutsaert, 2005*), por esto es relevante comprender los mecanismos que la producen.

El proceso de transformación de agua de la fase líquida a la fase de vapor requiere en primer lugar (Figura N° 1.1), una fuente de energía que provea a las moléculas de agua de la energía cinética necesaria para permitir el escape de las mismas desde la superficie líquida; y en segundo lugar, es necesario algún mecanismo que remueva las moléculas escapadas desde la superficie hasta producir la condensación de las mismas.

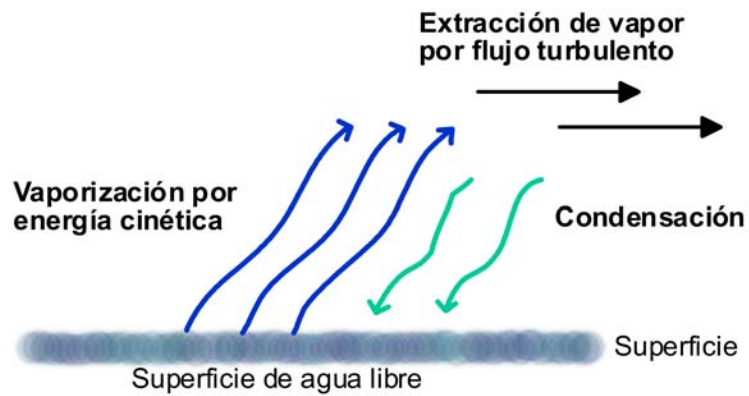


Figura N° 1.1: Esquema del fenómeno físico de evaporación

La transpiración (T_r), en cambio, es el proceso por el cual las plantas transforman el agua contenida en las hojas en vapor de agua y lo retornan a la atmósfera.

Toda la energía utilizada en los procesos físicos y biológicos de la tierra proviene del sol, por lo tanto es importante estimar o cuantificar la cantidad de radiación solar (onda corta) recibida en la superficie de la tierra así como también la energía terrestre (onda larga) intercambiada entre la atmósfera y la corteza terrestre (Figura N° 1.2).

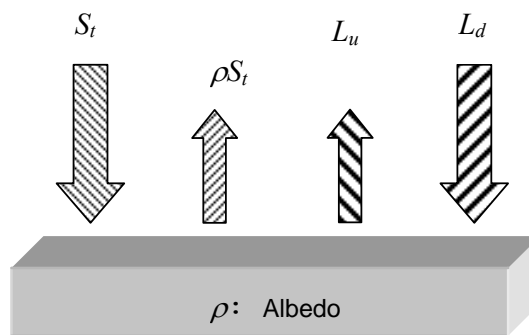


Figura N° 1.2: Balance de Energía

S_t : radiación solar entrante (onda corta) – rS_t : radiación solar saliente (onda corta) – r : albedo de la superficie – L_d : radiación en onda larga que llega a la superficie – L_u : radiación en onda larga que sale de la superficie.

El balance entre ambos tipos de energía (onda corta y onda larga), o Radiación Neta (R_n), se resume en la siguiente expresión:

$$R_n = (1 - \rho)S_i + L_d - L_u \quad (1.1)$$

Por otra parte, la expresión general del balance de energía está dada por:

$$R_n - \lambda E - H + L_p F_p - G + A_h = \frac{\partial W}{\partial t} \quad (1.2)$$

donde λE es el calor latente de vaporización, E es la evaporación, λ es la constante calor latente de vaporización del agua (J/g), H es el flujo de calor sensible que representa el calor que es emitido o absorbido durante un cambio de temperatura sin involucrar un cambio de estado, L_p es el factor de conversión termal por fijación del dióxido de carbono, F_p es el flujo específico de CO_2 , G es el flujo geotérmico o calor que pasa por conducción al suelo, A_h es la energía de advección expresada como flujo específico y $\frac{\partial W}{\partial t}$ es la variación de la energía por unidad horizontal de área .

Considerando que la evapotranspiración describe el proceso total de transferencia de agua a la atmósfera desde superficies de agua libre y suelos con vegetación, R_n puede cuantificarse a partir de una simplificación de la ecuación 1.2, asumiendo F_p , A_h y $\frac{\partial W}{\partial t}$ despreciables:

$$R_n = \lambda E + H + G \quad (1.3)$$

Por otro lado, cuando se requiere monitorear las actividades agrícolas o manejar el recurso hídrico y forestal, es necesario cuantificar la ET y la fracción evaporable (FE), definida como el cociente entre ET y la energía disponible, a diferentes escalas espaciales y temporales. En este sentido, la teleobservación o sensoramiento remoto satelital provee una cobertura espacial de datos que son fundamentales para el monitoreo de variables ambientales y ecosistemas en general. Tal es así que la teledetección permitió dividir los modelos de ET en (Courault et al., 2005):

***Modelo de una capa:** este tipo de esquema considera que el suelo y la vegetación forman un único proceso. Es aplicable a zonas donde la cobertura vegetal y el suelo presentan una composición tal que no es posible distinguir dos fuentes de energía (Figura N° 1.3).

La expresión (1.3) describe este tipo de modelo e indica que el flujo de radiación neta (R_n) es utilizado para evaporar el agua y las superficies, definidas aquí como el complejo suelo y vegetación, lo que se denomina flujo de calor latente (λE). Esta expresión no tiene en cuenta la energía utilizada en la fotosíntesis, la que se considera despreciable frente a otros flujos energéticos. Asimismo, se desprecian la divergencia horizontal de calor latente y de calor sensible y el almacenamiento de calor en el volumen considerado. En este modelo, el flujo de calor advectivo procedente de las zonas circundantes, suele considerarse despreciable.

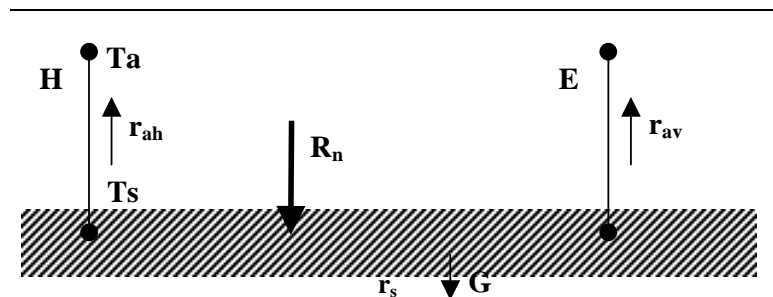


Figura N° 1.3: Modelo de una capa

R_n : radiación neta - E : flujo de calor latente (ET) - H : flujo de calor sensible - G : flujo geotérmico - r_{ah} y r_{av} : resistencias aerodinámicas para el calor sensible y el vapor del agua - r_s : resistencia del suelo a la transferencia de vapor de agua - T_s : temperatura de la superficie - T_a : temperatura del aire

***Modelo de dos capas:** este modelo considera al suelo y la vegetación como dos elementos generadores de energía (Figura N° 1.4).

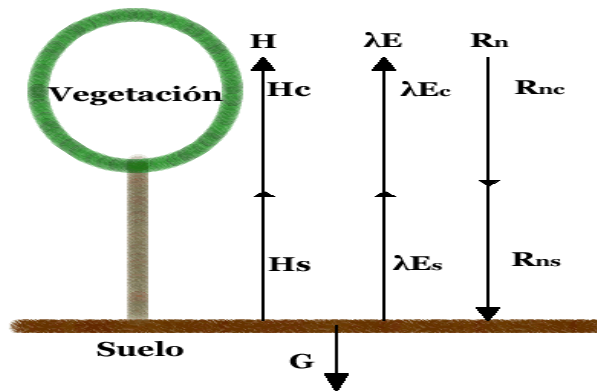


Figura N° 1.4: Modelo de evapotranspiración de dos capas

Se utilizó el subíndice “s” para indicar suelo y el subíndice “c” para indicar vegetación.

El balance de radiación puede ser extremadamente complejo cuando la superficie tiene algún elemento de heterogeneidad, como por ejemplo, vegetación dispersa. La heterogeneidad espacial hace que los flujos de energía y de vapor de agua provenientes de las diferentes superficies evaporantes interaccionen entre sí, lo que dificulta la determinación precisa de los mismos. Las resistencias superficiales y aerodinámicas se oponen a que el aire fluya y se produzca transporte de vapor de agua.

1.3 Modelos de uso corriente

En las últimas dos décadas muchos modelos han sido desarrollados para estimar el balance de energía y la ET. Ejemplos de ellos son los desarrollados por Priestley y Taylor (1972), Jackson et al. (1977), Noilhan y Planton (1989), Monteith y Unsworth (1990), Norman et al. (1995), Jiang e Islam (2001), Nishida et al. (2003), Rivas y Caselles (2004). En general, estos modelos se basan en el balance de energía (ecuación 1.3), el que

establece que el flujo de calor latente (λE) es generado al evaporar el agua y/o el complejo suelo-vegetación.

Los más utilizados actualmente, recomendados por la FAO, son el modelo de Penman o Penman-Monteith (*Monteith y Unsworth, 1990*) y el modelo de Priestley y Taylor (1972).

Por otra parte, según *Jackson et al. (1977)*, la ET puede escribirse a partir de la ecuación (1.3) como:

$$ET = R_n + D(T_a - T_s) \quad (1.4)$$

en la cual:

$$D = \frac{R_{nd} \rho C_p}{R_{ni} r_a^*} \quad (1.5)$$

$$r_a^* = r_a^a \left\{ 1 + \frac{(1 - P_v) r_a^s}{r_a^a} + \frac{(T_c - T_o)}{(T_o - T_a)} \left[1 + (1 - P_v) \left(1 - \frac{r_a^s}{r_a^c} \right) \right] \right\} \quad (1.6)$$

donde los símbolos y sus definiciones se presentan en la Tabla N° 1.1

Tabla N° 1.1 : Símbolos y definiciones – Ecuaciones (1.4), (1.5), (1.6)

Símbolo	Definición
ET	Evapotranspiración
R_n	Radiación neta
R_{nd}	Radiación neta diaria
R_{ni}	Radiación neta instantánea
ρ	Densidad del aire
C_p	Calor específico del aire
r_a^*	Resistencia equivalente
r_a^a	Resistencia aerodinámica del aire
r_a^c	Resistencia aerodinámica de la vegetación
r_a^s	Resistencia aerodinámica del suelo
T_c	Temperatura de la hoja
T_o	Temperatura aerodinámica
T_a	Temperatura del aire
T_s	Temperatura del suelo
P_v	Porcentaje de la superficie cubierta con vegetación

*** Modelo de Penman o Penman-Monteith (Monteith y Unsworth, 1990):**

Este método se basa fundamentalmente en el transporte de vapor de agua desde una superficie de agua libre al aire, para lo cual es necesario una fuente de energía: la radiación solar. El modelo también puede utilizarse para calcular la ET de una superficie extensa de pasto verde, por ejemplo la alfalfa, de altura uniforme, en activo crecimiento, que cubre completamente el suelo y que permanece en óptimas condiciones de humedad de suelo.

La diferencia entre el contenido total de energía del aire sobre una superficie húmeda y del aire circundante ocurre como resultado de la transferencia de energía de la superficie, lo que afecta el contenido de calor latente y sensible del aire. Si la tasa de transferencia de calor en forma adiabática y diabática es conocida, entonces la relación psicrométrica puede ser usada para estimar la densidad de flujo de calor latente.

Mediante el uso de la curva de presión de vapor de saturación (e), (Figura N° 1.5), la tasa de abastecimiento de energía necesaria para incrementar la presión de vapor de agua de “ e ” (punto A) a “ $e_s(T_o)$ ” (punto C) determina la densidad de flujo de calor latente total (λE). Desde el punto A al B el proceso es adiabático, donde la energía para incrementar la presión de vapor de “ e ” a “ $e_s(T_w)$ ” viene de la transferencia de calor sensible con el aire circundante. La tasa a la que esto ocurre depende de la resistencia aerodinámica de la transferencia de calor sensible del aire. Desde el punto B al C el proceso es diabático, donde la tasa de abastecimiento de energía depende del abastecimiento de energía externa neta (R_n) a nivel superficial generada por radiación y conducción.

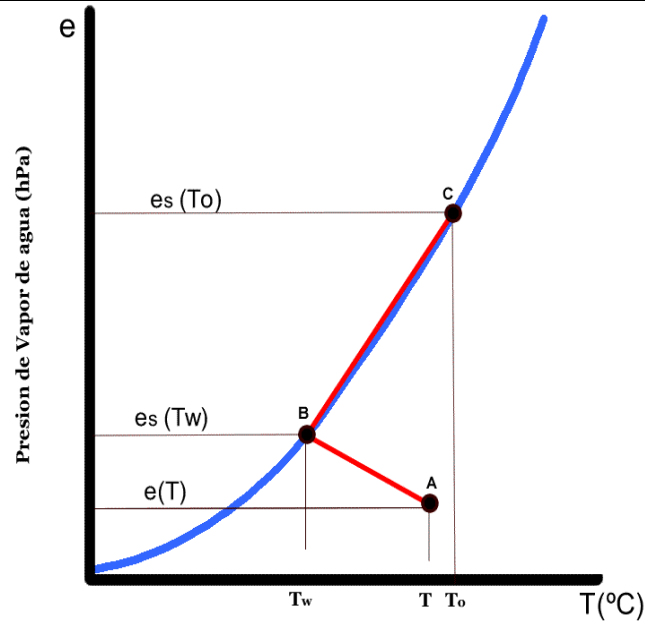


Figura N° 1.5: Esquema de la curva de presión de saturación de vapor de agua y de los procesos adiabático y diabático utilizados por Penman

La suma de los dos procesos, adiabático y diabático, permite estimar la λE mediante la siguiente expresión (Monteith y Unsworth, 1990):

$$\lambda E = \lambda E_d + \lambda E_a = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_n + \frac{\rho C_p}{r_H} \left(\frac{e_s(T) - e}{\Delta + \gamma} \right) \quad (1.7)$$

donde los símbolos y sus significados están descriptos en la Tabla N° 1.2

Tabla N° 1.2 : Símbolos y definiciones – Ecuación (1.7)

Símbolo	Definición
λE_d	Flujo de calor latente diabático
λE_a	Flujo de calor latente adiabático
Δ	Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor de agua
γ	Constante psicrométrica
r_H	Resistencia a la transferencia de calor sensible
ρ	Densidad del aire
$e_s(T)$	Presión de vapor de saturación a la temperatura del aire
e	Presión de vapor real a la temperatura del aire

*** Modelo de Priestley y Taylor (1972):**

Este modelo fue derivado a partir de la resolución de las ecuaciones de transferencia de energía en la capa límite atmosférica.

La derivación de esta ecuación asume que la superficie se encuentra saturada, por lo tanto representa una fuente permanente de agua. Por otra parte, considera que los procesos advectivos (transporte en sentido horizontal de energía o vapor de agua propios de la acción del viento), son mínimos o nulos, por lo que no incluye los términos y factores de resistencia.

Bajo estos dos supuestos se derivó la siguiente ecuación que permite calcular la evapotranspiración de una superficie saturada:

$$\lambda E = \alpha \left[\frac{\Delta}{(\Delta + \gamma)} \right] (R_n - G) \quad (1.8)$$

donde α es el coeficiente de Priestley-Taylor. Las demás variables fueron previamente definidas. Cabe aclarar que el valor de α fue obtenido en forma empírica. Los autores determinaron que α varía entre 1.26 y 1.28; sin embargo el valor aceptado por la comunidad científica es de 1.26.

La ecuación (1.8) ha sido objeto de diversas investigaciones en las últimas 2 décadas. Diferentes autores la han modificado para una gama amplia de superficies heterogéneas y no saturadas (*Brutsaert, 2005*).

1.4 Aportes de la teledetección

La información obtenida por los satélites meteorológicos, oceanográficos, ambientales, radares y sensores hiperspectrales, ha generado nuevos campos de investigación en hidrología, facilitando una cobertura de datos en el tiempo y en el espacio

fundamental para el monitoreo de variables ambientales y ecosistemas en general, difíciles de obtener por otros métodos.

Desde hace más de tres décadas se registran imágenes de casi toda la superficie de la tierra proporcionando una valiosa información para estudios multitemporales, con la que puede analizarse la evolución de numerosos espacios terrestres y acuáticos. La información detallada que ofrece la teledetección también permite registrar otros parámetros de las superficies de agua, como ser contaminación, salinización, cambios en la profundidad y extensión de la vegetación hidrófila entre otras. En cuanto a las aplicaciones de la teledetección a tiempo real, se destaca el seguimiento de corrientes oceánicas y su relación con otros factores naturales y socioeconómicos (www.innovanet.com.ar). Los datos de satélites ambientales son una herramienta cada vez más utilizada en la evaluación de riesgos naturales y en la cartografía de las áreas afectadas. Por ejemplo, los índices de vegetación son una herramienta poderosa que permiten medir la biomasa o el vigor del follaje. Los mismos están fundamentados en las propiedades de reflexión de energía de la cobertura vegetal y se calculan a partir de la reflectancia observada en imágenes de algunas bandas en el espectro visible e infrarrojo térmico (*Campbell, 2002*).

Por medio de los sensores térmicos, es posible captar la energía radiada por una superficie calentada por la radiación solar. Esta información permite, entre otras cosas, determinar la temperatura radiométrica de la superficie (T_s), variable fundamental en las evaluaciones medioambientales.

La teledetección también ha permitido modificar métodos “tradicionales” para estimar ET. En este sentido, Jiang e Islam (2001) han propuesto una metodología para la estimación directa de la fracción evaporable (FE) que sólo utiliza datos teleobservados. El método propuesto por los autores estima FE espacialmente distribuida basándose en una interpretación contextual de una relación entre dos variables teleobservadas: la T_s y el índice de vegetación diferencial normalizado (Normalized Difference Vegetation Index-

NDVI). La combinación de estas dos variables se denomina espacio NDVI-T_s. Este método se explica con más detalle en el capítulo siguiente.

Muchos métodos para calcular el balance de energía, o algunas componentes del mismo, se han basado en este espacio (*Gillies et al., 1997; Jiang e Islam, 1999; Nishida et al., 2003; Venturini et al., 2004; Stisen et al., 2007*).

En general, las investigaciones realizadas hasta el presente coinciden en que la variable T_s es la más importante y la que sintetiza la dinámica energética de la región en estudio, por lo que las limitaciones de los sensores infrarrojos térmicos son restrictivas para estas metodologías. Una posible solución para este problema son los radiómetros o radares pasivos que orbitan la Tierra diariamente y operan con longitudes de ondas más largas, que no son afectados por las condiciones climáticas ni por la fuente de iluminación. En la actualidad se cuenta con metodologías ya existentes para estimar T_s con este tipo de sensores (*Schmugge, 1978; Gage y Green, 1982; Basit et al., 1998; Williams et al., 2000; Fly et al., 2003*). Recientemente, en una evaluación general de estas metodologías, se reconoció la necesidad de mejorar los resultados obtenidos hasta el momento para días nublados o parcialmente nublados (*Jiang et al., 2005*). En este sentido los radiómetros presentan potenciales a explorar.

Uno de los desafíos que presentan los radiómetros es su baja resolución espacial, comparada con cualquier sensor de ondas térmicas infrarrojo, en general se puede pensar en una relación de 60 km/1km. Esto es particularmente importante cuando se quiere fusionar ambas fuentes de información (por ejemplo, durante días parcialmente nublados) y para variables, como la temperatura, que varían dentro de una superficie de 60x60 km². En este sentido cabe aclarar que una diferencia de 8 K entre dos píxeles, podría significar dos situaciones extremas dentro del contexto de los diagramas NDVI-T_s.

1.5 Objetivos

Como se mencionó antes, el monitoreo de actividades agrícolas, el manejo del recurso hídrico y forestal, entre otros, requieren la estimación de la ET a diferentes resoluciones espaciales y temporales. El objetivo general de esta tesis es analizar la influencia del tamaño del píxel de las imágenes satelitales en la determinación de la temperatura de superficie (T_s), para luego investigar las variaciones del espacio contextual NDVI- T_s a diferentes resoluciones espaciales características de los sensores infrarrojos y microondas pasivos (MP).

Los objetivos específicos son:

- ❖ Analizar la correlación espacial de T_s a diferentes resoluciones espaciales mediante técnicas de análisis estadístico.
- ❖ Comparar los resultados de los diagramas contextuales de la relación NDVI- T_s obtenidos con las resoluciones espaciales características de sensores infrarrojos y MP.
- ❖ Cuantificar la influencia de la resolución espacial de las imágenes de T_s en la geometría del espacio NDVI- T_s y en el cálculo de la fracción evaporable (FE).

1.6 Contenido de la tesis

El presente trabajo de tesis está organizado de la siguiente manera:

El Capítulo 1 contiene los conceptos generales de los procesos de vaporización - transpiración y balance de energía. Continúa con la caracterización de diferentes modelos para estimar la ET y finaliza con los aportes de la teledetección a esta temática y objetivo de la tesis. En el Capítulo 2 se describen las metodologías aplicadas. Se organiza a partir de una breve introducción, la descripción del método de Jiang e Islam y el procesamiento de las imágenes. Este último punto incluye las metodologías para determinar la T_s (monocanal

y split-window) y finalmente el tratamiento de las imágenes. En el Capítulo 3 se describen el área de estudio y las imágenes utilizadas. El Capítulo 4 contiene el análisis detallado de los resultados obtenidos. Por último, en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones.

El Apéndice 1 contiene todas las tablas, gráficos e imágenes de los días analizados a excepción del día 268/2004 que es presentado en el Capítulo 4.

Capítulo 2: Metodología

2.1 Introducción

Como se explicó en el apartado 1.4, recientemente Jiang e Islam (2001) han desarrollado una metodología para la estimación directa de FE. El método propuesto por los autores calcula FE espacialmente distribuida basándose en una interpretación contextual de una relación entre dos variables teleobservadas: la temperatura radiométrica de la superficie (T_s) y el índice de vegetación diferencial normalizado (Normalized Difference Vegetation Index-NDVI, Figura N° 2.1). La ventaja dominante de una formulación contextual es su validez para una amplia gama de condiciones superficiales y, posiblemente, para un amplio rango de resoluciones espaciales. Básicamente, este método utiliza el diagrama NDVI- T_s de forma tal que FE se puede calcular con un número mínimo de parámetros libres. Otra ventaja sobresaliente de este método es que no requiere exactitud en las estimaciones de la temperatura de la superficie. Jiang e Islam (2001, 2004) y Venturini et al. (2004), han demostrado que la temperatura obtenida con una sola banda térmica (T_{banda}), la que se considera un subrogante de T_s , es suficiente para extraer valores razonablemente precisos de FE.

El método se ha validado y su sensibilidad a los aspectos técnicos de diferentes sensores satelitales fue investigada (Jiang e Islam, 2001; Venturini et al., 2004; Batra et al., 2006). Como se explicó en el Capítulo 1, la determinación de T_s es la principal limitante dado que las ondas térmicas infrarrojas emitidas por la superficie terrestre no penetran las nubes, por lo que no alcanzan a ser registradas por los sensores ópticos bajo condiciones climáticas adversas. Una posible solución para este problema son los sensores de microondas pasivos (MP) que registran información diariamente y operan con longitudes de ondas más largas, que no son afectados por las condiciones climáticas ni por

la fuente de iluminación. En la actualidad se cuenta con metodologías para estimar T_s con este tipo de sensores (*Basit et al., 1998; Fly et al., 2003*).

Se han realizado estudios sobre la variabilidad de la geometría del espacio NDVI- T_s a escalas espaciales inferiores a 1 km². Por ejemplo, Kustas et al. (2003) investigaron las variaciones del diagrama NDVI- T_s con imágenes del satélite Landsat TM. En dicho trabajo se usaron píxeles de 96 x 96m. Recientemente, French et al. (2005) utilizaron imágenes ASTER, cuya resolución espacial es de 15-90 m. Sin embargo, estudios con resoluciones espaciales compatibles con las de los radiómetros (unos 60 Km²) no se han encontrado en la búsqueda bibliográfica realizada hasta ahora. Por ejemplo, el sensor Advanced Microwave Scanning Radiometer - Earth (AMSR-E) a bordo del satélite EOS-Aqua, si bien opera a resoluciones espaciales bajas, tiene previsto técnicamente la posibilidad de reproducir los datos registrados a una resolución de 10x10 km en todas las frecuencias de microondas que este sensor explora (*Ashcroft y Wentz, 2000*). En consecuencia, la combinación de la información registrada con sensores ópticos y MP requiere un exhaustivo análisis previo, dada las características de variabilidad espacial de T_s .

En este trabajo se analizó la influencia del tamaño del píxel en la determinación de la temperatura de superficie (T_s). Posteriormente, se analizó la influencia de la resolución espacial de la temperatura en el diagrama NDVI- T_s e indirectamente en el cálculo de FE a través del parámetro ϕ propuesto por Jiang e Islam (2001).

2.2 Método de Jiang e Islam (2001)

El método de Jiang e Islam (2001), propone una modificación de la ecuación de Priestley y Taylor (1972), reemplazando el parámetro α de Priestley-Taylor por un nuevo parámetro ϕ . A diferencia de la ecuación de Priestley-Taylor, la ecuación modificada

puede ser aplicada a regiones heterogéneas y con diferentes condiciones de humedad en la superficie.

Esta metodología se basa en la interpretación del espacio formado por las variables NDVI- T_s , llamado espacio triangular, por la distribución en forma de triángulo que adoptan los píxeles al plotear las variables T_s y un índice de vegetación, como por ejemplo el NDVI, tal como se puede observar en la Figura N° 2.1. El espacio triangular representa la distribución de zonas de suelo desnudo (C), de cobertura parcial (B), de cobertura total (A) y de agua (D) para el área de estudio.

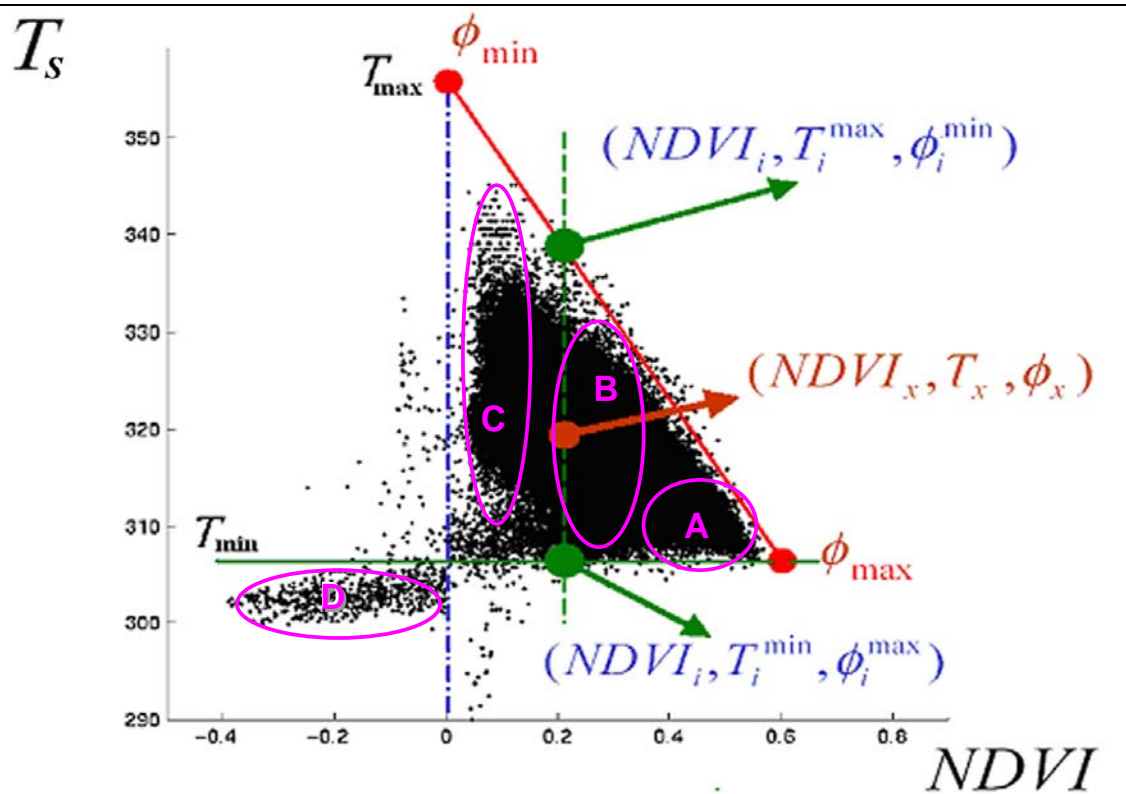


Figura N° 2.1: Ejemplo de un espacio contextual NDVI- T_s

La interpretación física de la relación NDVI- T_s ha sido objeto de diversas publicaciones. Estas discusiones se centran en la definición del lado superior (o borde cálido) del triángulo, en donde los píxeles con altas T_s tienden a alinearse en forma de una recta bien definida en todo el rango del NDVI. Jiang e Islam (2001) interpretaron que el

borde superior constituye el mínimo valor de ET para cada clase de NDVI, mientras que el borde frío (o lado inferior del triángulo) representa la máxima ET. De esta forma, la magnitud de ET para cada píxel varía dentro de los límites del triángulo.

El valor del parámetro ϕ de Jiang e Islam es estimado como una simple interpolación lineal entre ambos lados del triángulo. Esta interpretación del espacio NDVI- T_s es la base de la obtención del parámetro ϕ y ET para cada píxel de una imagen satelital.

El modelo propuesto por Jiang e Islam es entonces:

$$ET = \phi \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] (R_n - G) \quad (2.1)$$

$$FE = \frac{ET}{(R_n - G)} \quad (2.2)$$

por lo que, FE es:

$$FE = \phi \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] \quad (2.3)$$

De acuerdo a estos autores, existe una relación singular entre el rango de variación de ϕ y ciertas características de la superficie. Estas características físicas estarían asociadas a la humedad, la conductancia y la temperatura de la superficie. De este modo, el parámetro ϕ puede variar desde cero, para un suelo desnudo y seco, hasta 1,26 para una superficie saturada.

El valor de ϕ para cada píxel de una imagen se obtiene en dos etapas. Primero se debe definir la pendiente del lado superior del triángulo para los píxeles cuyos NDVI estén comprendidos en el rango [0,1]. El valor mínimo global de ϕ ($\phi_{\min} = 0$), está asociado a una superficie seca sin vegetación y con temperatura T_{\max} , cuyo NDVI=0. El valor máximo global de ϕ ($\phi_{\max} = \alpha = 1.26$), se define para la temperatura media de los píxeles que indican la existencia de agua en la superficie (T_{\min}). Luego se interpola linealmente el valor de ϕ para los píxeles que están dentro de los límites del triángulo (ver Figura N° 2.1).

Cabe aclarar que en este trabajo de tesis no se realiza un análisis de FE; el mismo se restringe al cálculo y discusión del parámetro ϕ del modelo de Jiang e Islam, que difiere de FE en la constante $\frac{\Delta}{(\Delta + \gamma)}$ como se puede observar en la ecuación (2.3). Los resultados obtenidos para ϕ pueden ser directamente extrapolados a FE (*Venturini et al., 2004*).

2.3 Procesamiento de imágenes

2.3.1 Software utilizado

El proceso de simulación de imágenes se realizó a través del programa ENVI (*ITT Industries, 2005*).

ENVI, Entorno para Visualización de Imágenes (Environment for Visualizing Images), es un sistema moderno de procesamiento de imágenes diseñado para proporcionar análisis multiespectral de los datos obtenidos por teledetección, en un entorno simple, novedoso y de fácil uso para analizar imágenes de cualquier tamaño y tipo de datos en un amplio rango de plataformas. ENVI también incluye herramientas para extraer espectros, usar librerías espectrales, o analizar conjuntos de imágenes de alta resolución espectral.

ENVI está completamente escrito en IDL (Interactive Data Language), Lenguaje de Datos Interactivo. IDL es un potente lenguaje de programación estructurado, basado en matrices, que permite un procesamiento de imágenes integrado y grandes capacidades de visualización.

2.3.2 Métodos para obtener la Temperatura de Superficie T_s

En este trabajo se procesaron imágenes de temperatura obtenidas a partir de un sensor óptico derivadas de la aplicación de un método monocanal y split-window (T_s), por lo que a continuación se describen ambos métodos.

En general, las imágenes obtenidas desde satélites deben ser corregidas por diferentes efectos, a saber:

- ❖ Correcciones atmosféricas, debido a que la atmósfera es un medio absorbente y emisor ya que contiene elementos como H_2O , CO_2 , O_3 , entre otros; y es un medio no dispersivo (excepto por los aerosoles).
- ❖ Efecto de la emisividad, ya que modifica la emisión térmica de la superficie.

La Figura N° 2.2 sintetiza el proceso de transferencia radiativa. La atmósfera es una fuente de radiación de energía térmica, producida principalmente por el vapor de agua. Esa radiación es emitida hacia la tierra ($L_{atm} \downarrow$) y directamente hacia el satélite ($L_{atm} \uparrow$). Parte de la energía que llega a la superficie de la tierra es reflejada $[(1-\varepsilon) L_{atm} \downarrow]$ y parte es absorbida por la superficie, cuya emisividad es ε . A su vez, la superficie posee una temperatura y emisividad que la caracterizan, por lo que emite radiación en onda larga a la atmósfera ($\varepsilon B(T)$). A nivel de la atmósfera, la temperatura es considerada como la suma de la reflectancia y la radiación proveniente de la tierra $[L_{surf} = \varepsilon B(T) + (1-\varepsilon) L_{atm} \downarrow]$, donde T es la temperatura de superficie. La atmósfera contiene gases que absorben o reflejan la radiación en la base de la atmósfera, por lo que, esta energía que llega al satélite está afectada por la transmitancia, τ de la atmósfera (τL_{surf}).

Este proceso, es la base física para derivar la ecuación de transferencia radiativa:

$$L_{sat} = [\varepsilon B(T) + (1 - \varepsilon)L_{atm} \downarrow]\tau + L_{atm} \uparrow \quad (2.4)$$

La ecuación (2.4) permite la estimación de la temperatura de superficie (T_s) a partir de la energía térmica registrada por un sensor térmico a bordo de un satélite.

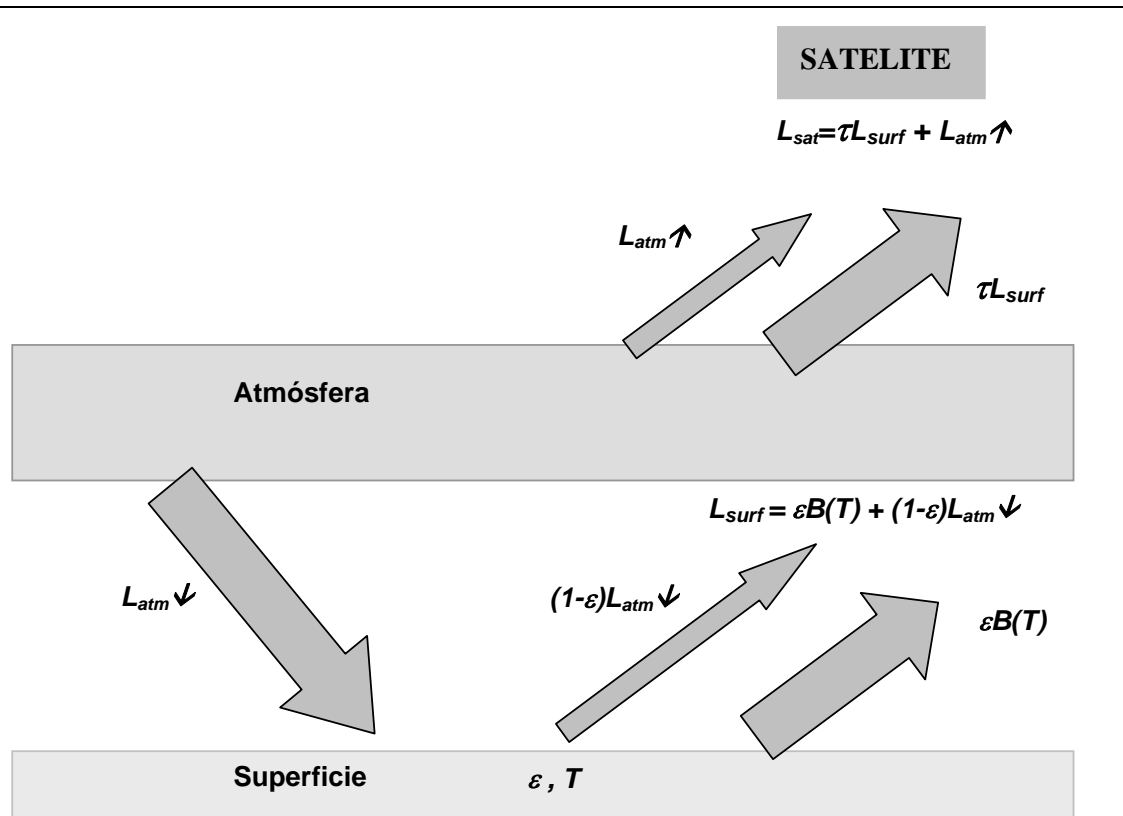


Figura N° 2.2: Esquema del proceso de transferencia radiativa.

Los métodos para calcular T_s se clasifican de acuerdo al nivel de corrección en:

❖ Métodos monocanales:

- Perfiles atmosféricos
- Modelos de transferencia radiativa

❖ Métodos de absorción diferencial:

- Modelos de split-window o multicanales
- Modelos bi-angulares

En este trabajo de tesis se utilizaron un método monocanal sin corrección atmosférica para obtener la temperatura de banda (T_{banda}) y un producto que utiliza un método split-window para obtener T_s .

***Métodos Monocanales**

Estos métodos se basan en la resolución de la ecuación de transferencia radiativa (2.4) a partir del conocimiento de los perfiles verticales de la atmósfera, utilizados como datos de entrada de un modelo de transferencia radiativa, como por ejemplo ModTran (Kneizys et al., 1983), LowTran (Berk et al., 1998) y HITRAN (Rothman et al., 2005). Si bien estos modelos permiten calcular T_{banda} en forma más precisa, requieren de información que no siempre está disponible en el área en estudio.

La ecuación general de corrección monocanal es:

$$T = T_i + \left[\frac{1 - \tau_i}{\tau_i(T_i - T_a \uparrow)} \right] + \frac{(1 - \varepsilon_i)b_i}{\varepsilon_i} \quad (2.5)$$

donde los símbolos y sus definiciones se presentan en la Tabla N° 2.1

Tabla N° 2.1 : Símbolos y definiciones - Ecuación (2.5)

Símbolo	Definición
T	Temperatura (K)
T_i	Temperatura de banda del píxel (Temperatura a nivel de satélite) (K)
τ_i	Tramitancia del perfil atmosférico por encima del píxel
$T_a \uparrow$	Temperatura efectiva de la atmósfera (K)
ε_i	Emisividad de la superficie que conforma el píxel
b_i	coeficiente que corrige la emisividad obtenido como función de T_i y τ_i

En este trabajo se utilizó la ecuación de Planck para obtener la temperatura de banda (T_{banda}). Cabe aclarar que no se realizó la corrección por emisividad por falta de la información correspondiente.

La intensidad espectral de la radiación electromagnética emitida por un cuerpo negro a temperatura T está dada por la ley de cuerpos negros de Planck (Rees, 2001):

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (2.6)$$

donde los símbolos y sus definiciones se muestran en Tabla N° 2.2

Tabla N° 2.2 : Símbolos y definiciones – Ecuación (2.6)

Símbolo	Definición
I	Radiancia espectral, energía por unidad de tiempo por unidad de superficie por unidad de ángulo sólido por unidad de frecuencia ($\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{Hz}^{-1}$)
v	Frecuencia (Hz)
T	Temperatura del cuerpo negro (K)
h	Constante de Planck igual a 6.626e^{-33} (JHz^{-1})
c	Velocidad de la luz (mseg^{-1})
e	2.718282... (adimensional)
k	Constante de Boltzmann igual a 1.381e^{-22} (JK^{-1})

La longitud de onda está relacionada a la frecuencia de la siguiente forma:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (2.7)$$

Esta ley es a veces escrita en términos de la densidad de la energía espectral:

$$\nu(\nu, T) = \frac{4\pi}{c} I(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (2.8)$$

La ecuación (2.8) tiene unidades de energía por unidad de volumen por unidad de frecuencia ($\text{joule/m}^3/\text{hertz}$).

La densidad de energía espectral también puede expresarse en función de la longitud de onda (λ), en lugar de la frecuencia:

$$\nu(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (2.9)$$

***Métodos de absorción diferencial - Split-window:**

El método Split-window permite determinar la temperatura de superficie a partir de la medida de la radiancia de dos bandas dentro de la ventana atmosférica que va desde la longitud de onda $10 \mu\text{m}$ a los $12,5 \mu\text{m}$ (*Dash et al., 2002*).

Al utilizar dos canales dentro de una misma ventana, los procesos de absorción y emisión atmosférica son similares, lo que permite obtener una buena correlación entre la corrección atmosférica en un canal y la absorción diferencial entre las dos bandas.

La ecuación general de split-window es:

$$T = T_1 + A(T_1 - T_2) + \Lambda + B_{(\varepsilon)} \quad (2.10)$$

$$B_{(\varepsilon)} = \alpha(1 - \varepsilon) - \beta \Delta\varepsilon \quad (2.11)$$

$$\varepsilon = \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{2} \quad (2.12)$$

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \quad (2.13)$$

donde, A y Λ son coeficientes atmosféricos que se obtienen por regresión sobre una base de datos empírica (T, T_1, T_2) ; $B_{(\varepsilon)}$ es el efecto de la emisividad; α y β son coeficientes que dependen del contenido de vapor de agua de la atmósfera; ε es la emisividad media; $\Delta\varepsilon$ es la diferencia espectral de emisividad

En particular, en esta tesis, se utilizó la temperatura de superficie T_s obtenida con el método Split-window desarrollado para productos MODIS por el Institute for Computational Herat System Science de la Universidad de California. El mismo se describe en la sección 3.4.1, en la que se presentan los datos usados en esta tesis.

2.3.3 Tratamiento de imágenes

Se describe aquí el procedimiento utilizado sin hacer mención del área particular de estudio ni los datos utilizados. El área en estudio y los datos utilizados se detallan en el Capítulo 3.

La temperatura estimada de un píxel es el resultado de la cantidad de radiación emitida por una superficie mixta (suelo y vegetación), la que es captada por el sensor, como una única señal. Por ejemplo, si el tamaño de un píxel es de 10x10 km, la radiación medida dependerá de la temperatura “promedio” de un área físico-geográfica de 10x10 km.

Es de pensar que dentro del área del píxel existan variaciones naturales, aún dentro de superficies cuya cobertura vegetal y tipo de suelo varían muy gradualmente. La influencia de la resolución espacial de las imágenes de T_s toma mayor relevancia cuando se intenta rellenar datos faltantes con diferentes fuentes de obtención de los mismos. Con este fin, se procesaron imágenes de temperatura de un sensor óptico derivadas a partir de la aplicación de un método monocanal (T_{banda}) y uno split-windows (T_s), ya descritos en el apartado 2.3.2.

A fin de clarificar la metodología utilizada, se presentan a continuación las definiciones usadas en esta tesis y la relación entre las variables.

R_o : Radiancia espectral. Flujo de energía procedente de una superficie elemental, en una dirección dada, por unidad de ángulo sólido, por unidad de superficie, por unidad de tiempo y por unidad de frecuencia. ($J / \text{seg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{Hz}$).

T_{banda} : Temperatura de banda. Temperatura de la superficie derivada de una única banda térmica (K).

T_s : Temperatura de superficie. Temperatura radiométrica de la superficie obtenida a través de un algoritmo multicanal (K).

La relación entre la radiación y la temperatura radiométrica está dada por la ley de Planck, presentada en el apartado 2.3.2.

En primer lugar las imágenes se georregistraron a partir de las coordenadas geográficas (Latitud y Longitud) originales de la imagen. Posteriormente se procedió a cortar la ventana que comprende la región en estudio. Luego, las cuentas digitales (CD) fueron traducidas a valores de radiancia (R_o) y reflectancia a partir de los factores de escala y aditivo incluidos en las imágenes. Si bien Planck establece una relación no lineal entre radiancia y temperatura, para la zona en estudio y el rango de temperaturas analizado, se verificó que dicha relación era cuasi-lineal para las imágenes a resolución 1x1 km, por lo que la agregación por simples promedios aritméticos fue posible. De este modo, se

procedió a la agregación de los píxeles a fin de modificar la resolución espacial original de las mismas. Los píxeles originales de 1x1 km, se agregaron mediante un simple promedio aritmético de los valores de radiancia (R_o) de la banda térmica en cuestión. Por ejemplo, para obtener la imagen de radiancia a resolución 2x2 km, se promediaron de a cuatro los píxeles a partir de la imagen de R_o a resolución 1x1 km como lo muestra la Figura N° 2.3

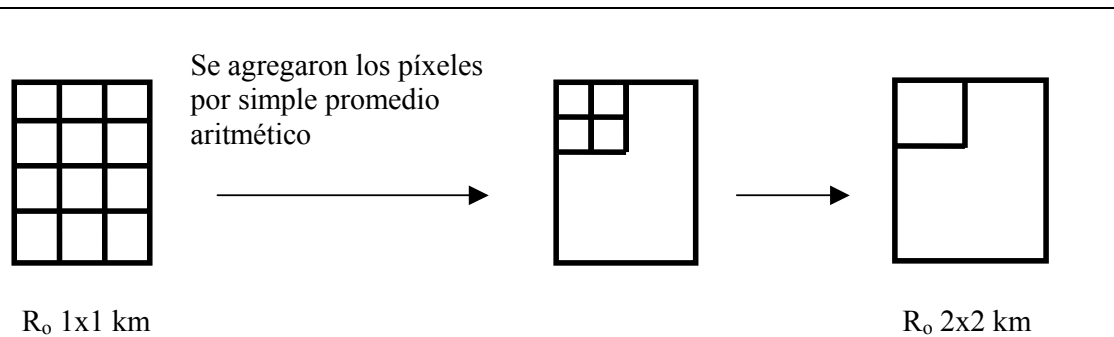


Figura N° 2.3: Esquema de agregación de los píxeles de las imágenes de radiancia.

Las imágenes de R_o agregadas se tradujeron en valores de temperatura agregadas mediante la ecuación de Planck. Posteriormente se pixelaron las imágenes de T_{banda} agregadas. Este procedimiento consistió en subdividir los píxeles agregados en unidades menores, más específicamente a 1x1 km. Por ejemplo, cada píxel de la imagen de T_{banda} a resolución 2x2 km, fue dividido en cuatro píxeles de 1x1 km de igual temperatura (Figura N° 2.4). Esto fue necesario dado que en este trabajo, las imágenes de NDVI se trabajaron con su resolución original de forma tal de conservar el detalle. Cabe destacar que el NDVI es obtenido en función de dos bandas, una correspondiente al espectro visible y la otra al infrarrojo cercano (NIC), lo que demanda un análisis profundo en lo que respecta a la agregación de los píxeles de dicha variable.

Luego se obtuvieron los espacios contextuales NDVI- T_{banda} con las imágenes de T_{banda} pixeladas y se compararon las geometrías de los diagramas obtenidos. Finalmente se

obtuvieron las imágenes de ϕ y se confrontaron los resultados para las diferentes resoluciones analizadas.

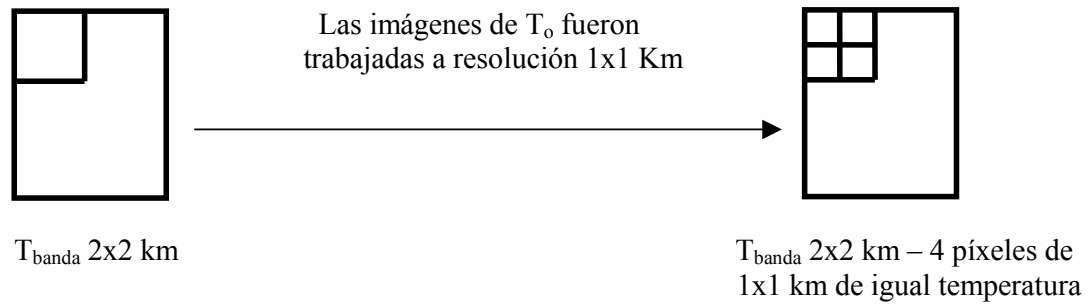


Figura N° 2.4: Esquema de pixelado de las imágenes de T_{banda}

Para el tratamiento de las imágenes de T_s se repitió el mismo análisis que el descrito para las imágenes de T_{banda} . Las imágenes de T_s fueron agregadas mediante simple promedio aritmético a partir de la imagen original a resolución 1x1 km (Figura N° 2.3)

Posteriormente se pixelaron a 1x1 km las imágenes de T_s agregadas, de igual forma a lo realizado para T_{banda} , ver Figura 2.4.

Luego se obtuvieron los espacios contextuales NDVI- T_s con las imágenes de T_s pixeladas y se compararon las geometrías de los diagramas obtenidos. Finalmente se obtuvieron las imágenes de ϕ y se confrontaron los resultados para las diferentes resoluciones analizadas.

Cabe destacar que no se incluye en este análisis el efecto de la resolución espacial del NDVI. El objetivo de este trabajo es solamente estudiar el efecto de la resolución espacial de las imágenes de T_{banda} y T_s , dado que la temperatura es la variable que sintetiza el estado energético de la superficie en estudio.

Capítulo 3: Área de estudio y datos utilizados

3.1 Ubicación

El área de estudio corresponde a la cuenca inferior del Río Salado, Santa Fe, Argentina, ubicada entre los 29° y 31° de latitud sur y los 62° y 60,5° de longitud oeste (Figura N° 3.1)

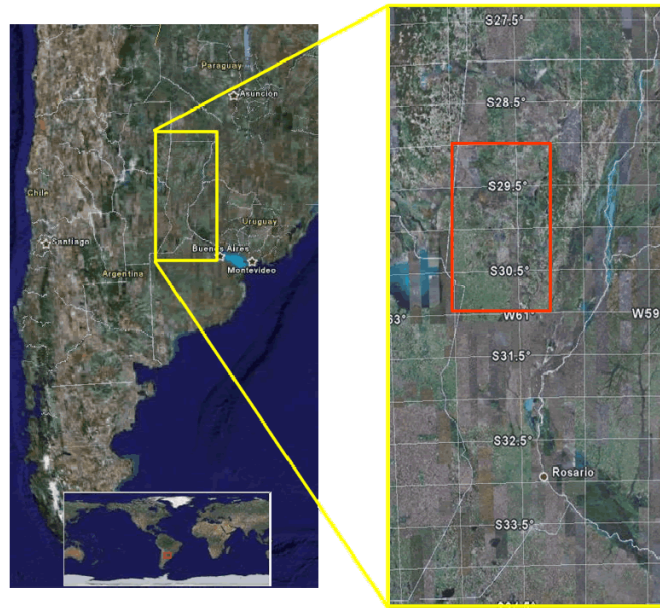


Figura N° 3.1: Ubicación área de estudio

El río Salado se extiende a lo largo de 2000 kilómetros; nace en la provincia de Salta y desemboca en el sistema del río Paraná. La cuenca hidrográfica comprende a unos 58.000 km², de los cuales unos 30.000 km² conforman la cuenca propiamente dicha mientras que el resto, corresponde a la subcuenca denominada Bajos Submeridionales que desagua en el río Salado a través del río Calchaquí.

El incremento del caudal medio del río Salado, que pasó de 71 m³/s en el período 1954-1970 a 176 m³/s en el período 1971-2002, (FICH-INA-INTA, 2007) es reflejo del período húmedo que atraviesa la provincia de Santa Fe, por la que escurre el tramo inferior del río. Paralelamente a los cambios de la condición hidrológica externa, se han inducido

cambios en el uso del suelo, creciendo la superficie cultivada en detrimento de la ganadera. Paulatinamente, la dinámica hídrica natural fue modificada por la construcción de obras que, en muchos casos, interfieren con el libre escurrimiento de las aguas.

3.2 Hidrografía y clima

Si bien la provincia de Santa Fe es una provincia mediterránea, tiene salida al mar a través del río Paraná, el que continúa en el río de la Plata. El río Salado señalaría la separación aproximada entre la zona norte, incluida en la región chaqueña, y la zona sur que pertenece a la llanura pampeana. Dicha llanura es el producto de la acumulación de sedimentos del macizo de Brasilia durante la era precámbrica. Las partes más elevadas se encuentran al oeste de la provincia.

Las zonas boscosas se distribuyen entre la llamada "cuña boscosa" del norte, que separa la llanura chaqueña del oeste de las zonas bajas del este junto al río Paraná.

Por su pendiente, todo el territorio santafesino, pertenece a la cuenca del río Paraná. Sólo muy pocos cursos de agua, localizados en un pequeño sector del oeste provincial, de pobre caudal, desaguan en la laguna de Mar Chiquita, ubicada dentro de la extensa cuenca sin desagüe que se extiende en diagonal desde la Puna hasta el sudoeste bonaerense.

En la región norte y central, amplios cañadones y vaguadas con franco declive hacia el sur encauzan a las lentas corrientes fluviales a seguir paralelas al Paraná por muchos kilómetros, originando en su recorrido lagunas y bañados. El curso del río Salado es un ejemplo del comportamiento de las aguas superficiales en esta parte de la provincia.

En sus aspectos climáticos, la provincia de Santa Fe se caracteriza por presentar rasgos transicionales en sus condiciones térmicas y pluviométricas entre los climas tropicales a templados.

Dos elementos dinámicos son los causantes de los cambios más significativos de sus condiciones meteorológicas: los anticiclones del Atlántico y del Pacífico Sur, a los que se une su situación extratropical y subcontinental. En el norte de la provincia, el clima es cálido, se registran altas temperaturas durante el verano y los inviernos no son muy rigurosos.

La temperatura media anual oscila entre los 15° y los 21° en los extremos sur y norte, respectivamente. La amplitud anual de los valores medios mensuales está entre los 12° en el extremo norte y los 16° en el extremo sur-oeste.

Los vientos regulares que penetran por el nordeste, cálidos y húmedos se hacen sentir en todo el territorio de la provincia, en especial durante el verano. Además se observa la existencia de otros vientos locales, como el pampero, el norte y la sudestada. El pampero corre en dirección sudoeste-noroeste y alcanza a veces grandes magnitudes.

Esta provincia en general tiene clima medianamente húmedo en verano y muy húmedo en invierno, ya que la humedad media relativa oscila alrededor de 65 % en enero y de 75 % en julio (www.argentour.com/es/provincia/santa_fe/santa_fe.php)

3.3 Utilización del suelo

Santa Fe se encuentra en un área con suelos destinados principalmente a la actividad agrícola ganadera, siendo una zona de muy buena producción de soja en los últimos años, con prácticas intensivas de monocultivo o de dobles cultivos anuales, los que reducen la porosidad y capacidad de infiltración del suelo, aumentando el potencial de escurrimiento y favoreciendo los procesos de erosión de la capa superficial por lavado. En la zona noreste de la provincia se destaca la actividad arrocerá y el cultivo de algodón. También se localiza una de las cuencas lecheras de mayor importancia a nivel nacional (*FICH-INA-INTA, 2007*).

3.4 Imágenes utilizadas

El programa EOS (Earth Observing System) desarrollado por NASA consiste en una serie de satélites que orbitan la tierra en forma sincronizada. Los satélites incluyen a:

- ❖ Terra, lanzado en 1999, que transporta cinco sensores, entre ellos sensores de Canadá y Japón que estudian las interacciones entre la atmósfera, la superficie terrestre, los océanos y la energía radiante de la Tierra (calor y luz).
- ❖ Aqua, lanzado en el 2002, es un proyecto conjunto de Estados Unidos, Japón y Brasil que transporta seis sensores para observar los océanos, la atmósfera, superficie terrestre, la cubierta de hielo y nieve y la vegetación.
- ❖ Jason-1, lanzado en el 2001, es una misión conjunta oceanográfica de la NASA y del Centro Nacional Francés de Estudios Espaciales, que observa las interacciones climáticas mundiales entre el mar y la atmósfera.

El primer satélite del programa EOS, EOS-Terra, fue puesto en órbita en diciembre de 1999, con el sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) entre los 5 sensores a bordo. EOS-Terra orbita a una altitud de 705 Km y recorre la Tierra varias veces al día.

MODIS es uno de los instrumentos tanto del satélite Terra (EOS a.m.) como del Aqua (EOS p.m.). La órbita de EOS Terra alrededor de la tierra va de norte a sur cruzando el Ecuador por la mañana, mientras que el Aqua recorre la misma órbita por la tarde.

MODIS proporciona información en 36 bandas espectrales en el rango de longitudes de onda de 0,4 - 14,385 μm (visible a infrarrojo térmico), con una resolución espacial que varía entre los 250 m a los 1000 m, y un ancho de barrido de 2330 km. En la actualidad se distribuyen 44 productos derivados de las 36 bandas, los que se dividen en las siguientes categorías: Calibración, Atmosféricos, Superficiales, Criosfera y Oceánicos (<http://modis.gsfc.nasa.gov>).

3.4.1 Productos MODIS

En esta tesis en particular, se utilizaron los productos MOD02 y MOD11.

El producto MOD02 contiene la radiancia o cuentas digitales calibrada y geoposicionada de las 36 bandas. Las imágenes correspondientes a la banda 1 (rojo) y la banda 2 (infrarrojo cercano) fueron utilizadas para obtener el índice de vegetación NDVI. La banda 31, que registra información en el rango espectral de longitud de onda 10,78-11,28 μm , se usó para determinar T_{banda} .

El producto MOD11 contiene la temperatura de superficie georreferenciada y los valores de las emisividades de la banda 31 y 32, para cada uno de los píxeles de una imagen. Ambos productos poseen una resolución temporal diaria y resolución espacial de 1x1 km. Estos productos fueron utilizados en el trazado del espacio contextual NDVI- T_s y en la obtención de las imágenes correspondientes al parámetro ϕ del modelo de Jiang e Islam (*Jiang e Islam, 2001; Venturini et al., 2004*).

Como ya fue descrito, en este trabajo se usaron las imágenes de T_s que ofrece el producto MOD11, es por ello que a continuación se describe el algoritmo generalizado de Split-window para imágenes MODIS.

****Algoritmo Generalizado de Split-window para imágenes MODIS***

Las características espectrales de la emisividad de los tipos de superficies terrestres son relativamente estables en la gama de longitud de onda 10,5-12,5 μm , donde se localizan las bandas 31 y 32 de MODIS. Estudios realizados por el Institute for Computational Herat System Science (1999), demostraron que el rango medio de emisividad terrestre de los materiales, para las bandas 31 y 32 de MODIS, presenta las siguientes características:

- Toda ϵ_{31} y ϵ_{32} es mayor a 0.825
- En general, la relación $-0.012 \leq \epsilon_{32} - \epsilon_{31} \leq 0.023$ es válida para todas las firmas espectrales.

- ϵ_{31} y ϵ_{32} son mayores a 0.91 para follaje fresco, suelo desnudo, agua y hielo.

A partir de diferentes mediciones y simulaciones (*Snyder y Wan, 1998*), determinaron que las bandas 31 y 32 de MODIS son relativamente estables en cuanto a su respuesta espectral.

El método de Split-window (*Wan y Dozier, 1996*) ha sido desarrollado con la finalidad de corregir los efectos atmosféricos y la emisividad a partir de las bandas de emisividad conocidas, basándose en las siguientes consideraciones:

1) Las condiciones atmosféricas, especialmente el contenido de vapor de agua, son muy variables con el tiempo tanto en dirección vertical como horizontal, por lo que no es fácil de medir la humedad relativa en un perfil con una precisión inferior a 10%.

2) La T_s varía en el espacio y en el tiempo. Las diferencias entre las temperaturas diurnas y nocturnas de la tierra pueden ser mayores a los 10 ° C.

3) La emisividad de la mayoría de las coberturas terrestres, para las bandas 31 y 32 de MODIS, es relativamente estable.

En el desarrollo de este algoritmo, se estableció una base de datos de valores de radiancia para las bandas 31 y 32 a partir de simulaciones de transferencia radiativa para 12 perfiles atmosféricos de temperatura, que abarcan la gama de temperaturas del aire (T_{air}) en el rango de 256 K a 310 K, temperatura de la superficie terrestre, en el rango de $T_{air} - 16$ K a $T_{air} + 16$ K y la emisividad de la superficie entre 0.8 a 1.0 para cada perfil de temperatura atmosférica analizado.

El Institute for Computational Herat System Science (1999) demostró que los efectos atmosféricos en los canales 4 y 5 de NOAA-AVHRR mantienen una relación estable para una amplia gama de condiciones atmosféricas. Por otra parte, la longitud de onda de las bandas 31 y 32 de MODIS se encuentra en el mismo rango espectral de los canales 4 y 5 de AVHRR, pero el ancho de banda y la respuesta espectral es diferente. Es por ello que fue posible establecer una relación entre el algoritmo de split-window

desarrollado para NOAA-AVHRR y el algoritmo generalizado de split-window para MODIS:

$$T_s = \left[A_1 + \frac{A_2(1-\varepsilon)}{\varepsilon} + A_3 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} \right] \frac{T_{31} + T_{32}}{2} + \left[B_1 + B_2 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + B_3 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} \right] (T_{31} - T_{32}) + C \quad (3.1)$$

donde: T_{31} y T_{32} son las temperaturas radiométricas de las bandas 31 y 32 de MODIS;

$\varepsilon = 0.5 (\varepsilon_{31} + \varepsilon_{32})$; $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{31} - \varepsilon_{32}$ y $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3, C$ son coeficientes que se obtienen teniendo en cuenta los perfiles atmosféricos.

Es común que existan variaciones espaciales importantes de la emisividad y la temperatura en la escala de unos pocos kilómetros, además existen varios tipos de cobertura terrestre en un solo píxel de una imagen de MODIS dando lugar a píxeles mixtos. Una primera aproximación en el MOD11 para hacer frente a este problema de píxeles mixtos es determinar la media de la emisividad y la temperatura efectiva radiométrica mixta de la superficie en los píxeles.

El máximo ángulo de visión de MODIS es de 65° desde el nadir, por lo tanto el algoritmo desarrollado para determinar T_s con MODIS (Ecuación 3.1) incluye el coseno del ángulo de visión (θ_v) (*Wan y Dozier, 1996*).

El algoritmo generalizado de split-window MODIS T_s , arroja resultados con errores inferiores a 1 K siendo el máximo error de 3 K en el borde de barrido donde el ángulo de visión es mayor a 55° , cuando la columna de contenido de agua precipitable es mayor de 4 cm. La precisión del método depende del conocimiento de la emisividad real de la superficie para las bandas 31 y 32 de MODIS. (*Institute for Computational Herat System Science, 1999*)

3.4.2 Imágenes procesadas

En este trabajo se procesaron seis imágenes MOD02, tres de ellas correspondientes al mes de septiembre de 2004 y tres correspondientes a enero de 2005. También se procesaron tres imágenes MOD11 correspondientes al mes de septiembre de 2004. Es importante destacar que sólo para los días 259/2004 y 268/2004 fue posible obtener imágenes de ambos productos (MOD02 y MOD11).

La fecha y hora de adquisición de las imágenes, el producto al que corresponde cada una de ella, y el porcentaje de nubes observado se presentan en Tabla N° 3.1.

Tabla N° 3.1: Año de adquisición de las imágenes, día del año, producto MODIS, hora de adquisición y calidad de las imágenes.

Año	Día del año	Producto	Hora de adquisición (UTC)	Calidad de la imagen (% nubes)	
2004	259	MOD02	MOD11	14:15	0 - 2
2004	261	MOD02		14:05	32
2004	266		MOD11	14:20	0,8
2004	268	MOD02	MOD11	14:10	0 - 9
2005	04	MOD02		13:35	0
2005	05	MOD02		14.15	57
2005	07	MOD02		14:05	12

Capítulo 4: Resultados

El objetivo de este capítulo es analizar la influencia que la T_s (obtenida con diferentes resoluciones espaciales), tiene sobre la estimación del parámetro ϕ propuesto por Jiang e Islam (2001). La variable T_s fue obtenida mediante dos métodos diferentes, por esto el capítulo se organiza de la siguiente forma: en primer lugar se comparan las temperaturas superficiales obtenidas a través del método monocanal (T_{31}) y el producto MOD11, que se refiere de ahora en más como T_s . Luego se presentan los resultados obtenidos al aplicar el método de Jiang e Islam con T_{31} . Estos resultados se dividen en dos análisis: en una primera instancia se consideró T_{\min} (definido en 2.1.2) constante, es decir obtenida a partir de la imagen original a resolución 1x1 km. Estos resultados se describen en la sección 4.2.1. En segunda instancia se consideró T_{\min} variable, es decir definida para cada imagen agregada, tal lo descrito en 4.2.2.

Finalmente, en los apartados 4.3.1 y 4.3.2 se presenta el mismo análisis usando el producto MOD11, que provee la T_s calculada mediante un método split-window (*Wan y Dozier, 1996*).

4.1 Comparación de T_{31} y T_s

Como se explicó en el apartado 2.2.2, las imágenes de temperatura de superficie se obtuvieron mediante un método monocanal (T_{31}) y split-window (T_s). Al comparar ambos métodos en lo que respecta a los valores de temperatura media de la superficie, se encontró que la diferencia entre T_{31} y T_s es del orden de los 2 K, compatible con lo publicado por otros autores (*Venturini et al., 2004*). En cuanto al análisis de las imágenes agregadas de T_s y T_{31} , no estarían significativamente afectadas por la resolución espacial. A modo de ejemplo, en la Figura N° 4.1 se observa la comparación de los valores medios regionales de la temperatura de superficie obtenida con ambos métodos.

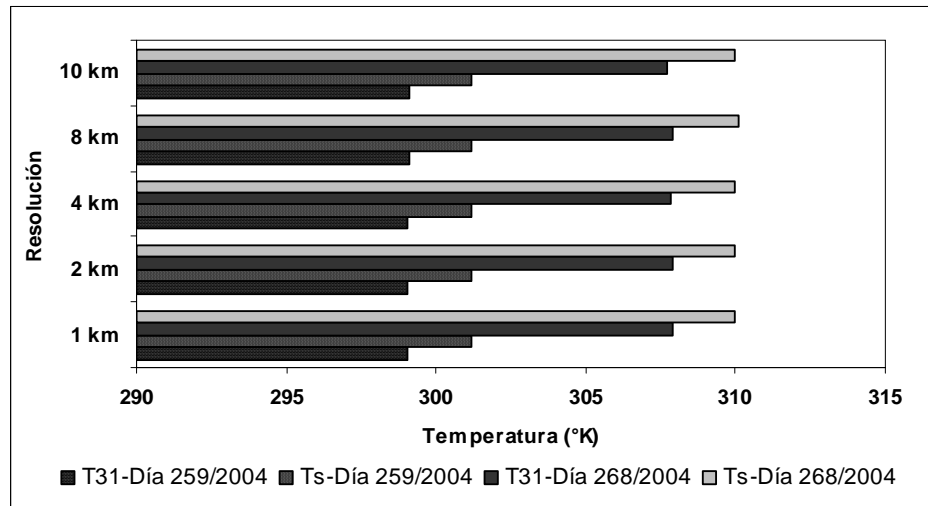


Figura N° 4.1: Comparación de los valores medios regionales de T_{31} y T_s para las resoluciones espaciales analizadas. Días 259 y 268 del año 2004.

Debido a que T_{31} no fue corregida por efectos atmosféricos ni por la emisividad, se confrontaron píxel a píxel los valores de T_{31} y T_s encontrándose diferencias del orden de 7 K, lo que estaría indicando que las correcciones atmosféricas sobre T_{31} no son significativas en lo que hace a la metodología analizada. Esto se puede observar en la Figura N° 4.2 y Figura N° 4.3, donde se contrastan T_{31} y T_s para diferentes días y diferentes resoluciones espaciales. Cabe destacar que Venturini et al. (2004), encontraron diferencias del orden de los 11 K al analizar diferentes sensores a resolución 1x1 km.

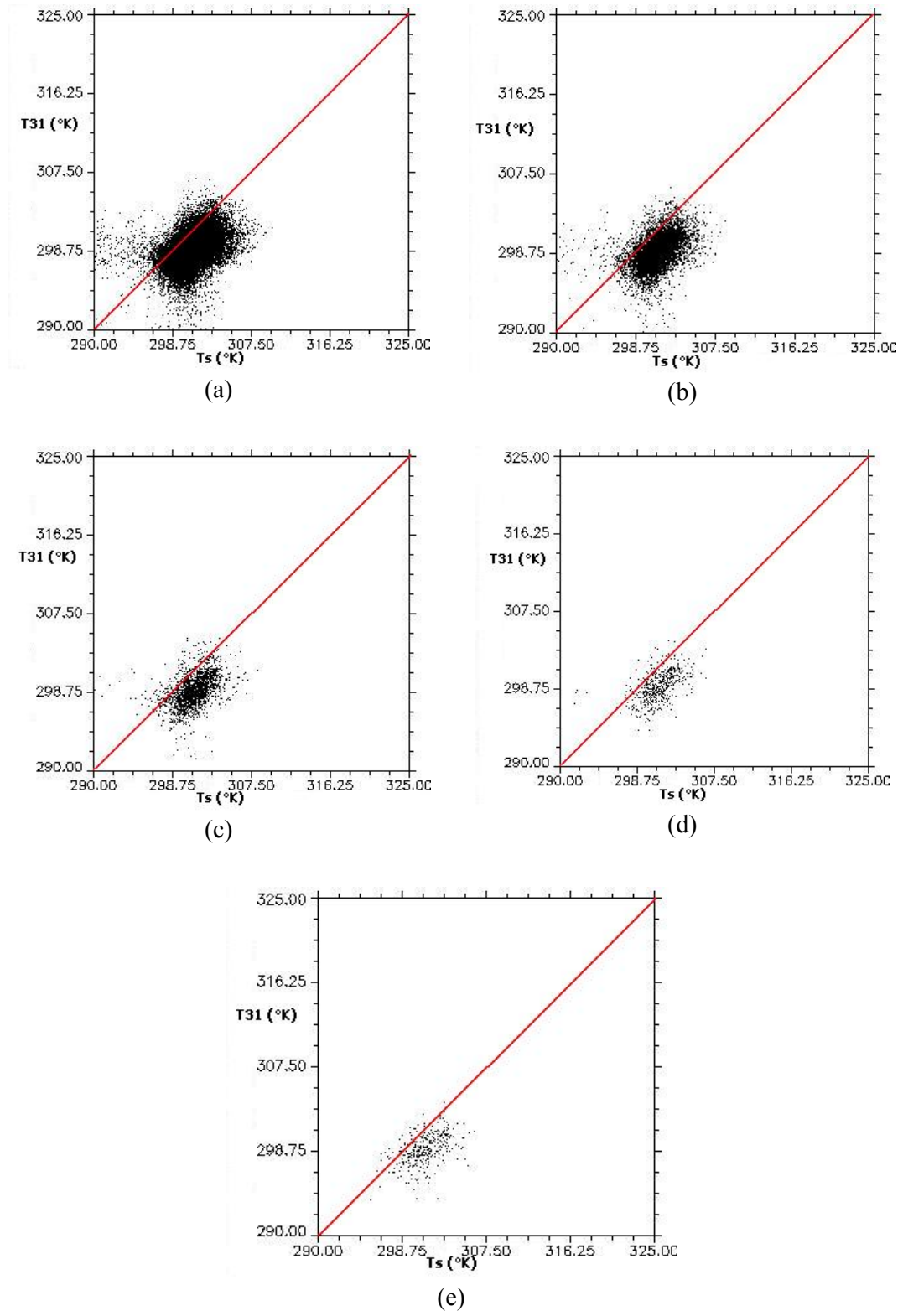


Figura N° 4.2: Comparación píxel a píxel de la T_{31} y T_s - Día 259/2004 para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km

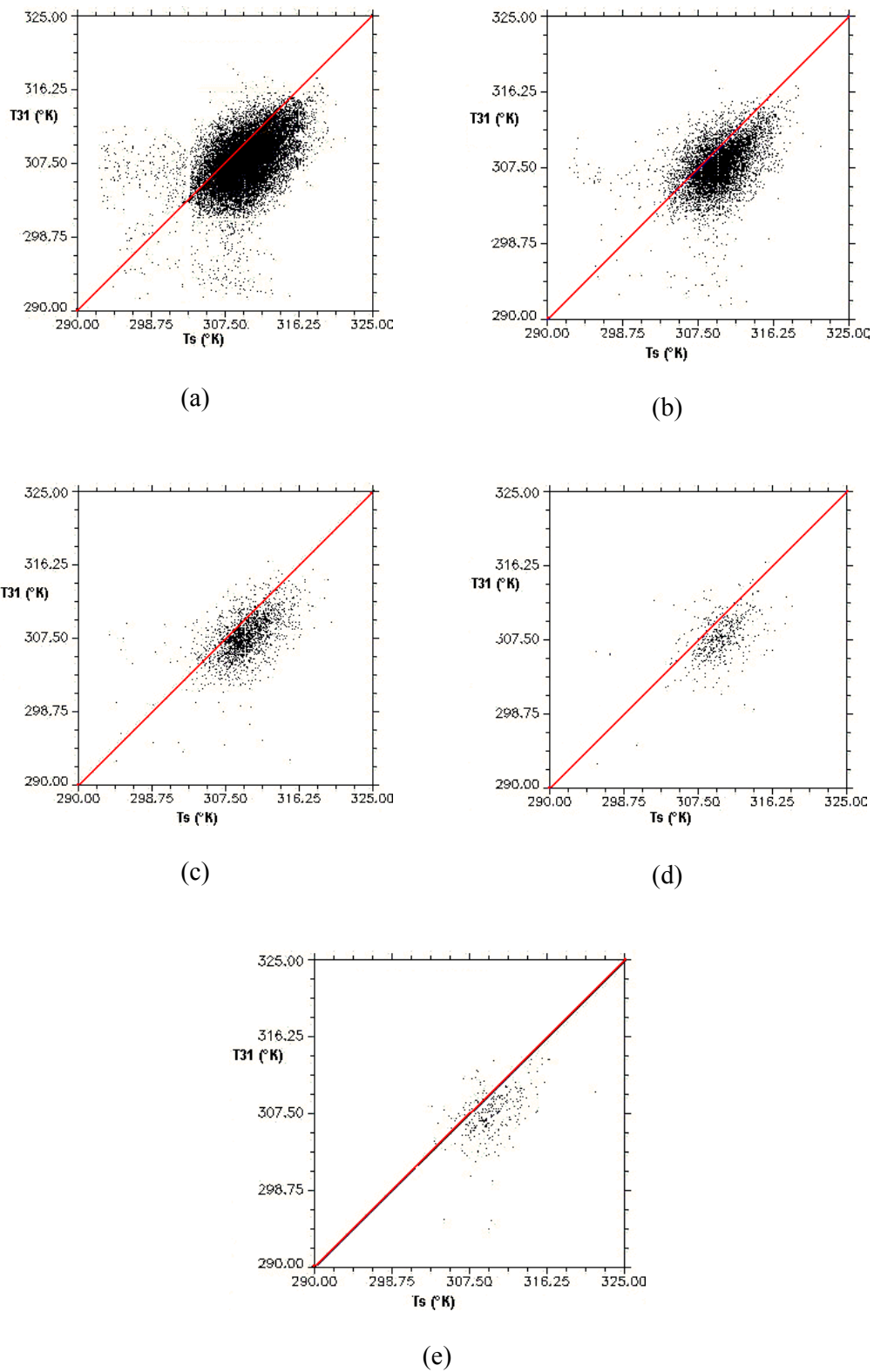


Figura N° 4.3: Comparación píxel a píxel de la T_{31} y T_s - Día 268/2004 para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km

4.2 Análisis con T₃₁

El proceso de simulación de imágenes se realizó a través del programa ENVI (*ITT Industries, 2005*).

Como se explicó en el apartado 2.2.2, las imágenes de temperatura de banda de la banda 31 de MODIS (T₃₁) se calcularon a partir de las imágenes MOD02 (de resolución 1x1 km), mediante la utilización de la ecuación de Planck (*Rees, 2001*). Si bien esta ecuación establece una relación no lineal entre R_o y T_{banda}, la misma se verificó para la zona en estudio. Se observó que para el rango de temperaturas registrado, dicha relación se comportaba de forma cuasi-lineal para píxeles de 1x1 km, como se muestra a modo de ejemplo en la Figura N° 4.4. Dado este comportamiento, fue posible suponer una relación lineal entre la radiancia de la banda 31 (R₃₁) y T₃₁ para resoluciones mayores a 1km (Figura N° 4.4).

Consecuentemente, la agregación de píxeles se realizó por simple promedio aritmético de R₃₁, a partir de las cuales se obtuvieron las imágenes de T₃₁.

Con la reflectancia de la banda 1 (correspondiente a la frecuencia del rojo) del producto MOD02, se realizó una primer máscara de nubes, la que se aplicó a las imágenes de temperatura. Luego, al trazar los espacios triangulares, los píxeles que se encuentran por debajo del borde inferior quedan fuera del análisis por considerarlos píxeles contaminados, lo que constituye en sí una segunda máscara de nubes.

Posteriormente con las bandas 1 y 2 (banda 2 correspondiente a la frecuencia del infrarrojo cercano) del producto MOD02, se calculó el NDVI para una resolución espacial de 1x1 km, cuya ecuación es:

$$NDVI = \frac{IC - R}{IC + R} \quad (4.1)$$

donde, *IC* es la reflectancia de la banda correspondiente al infrarrojo cercano y *R* la reflectancia de la banda correspondiente al rojo.

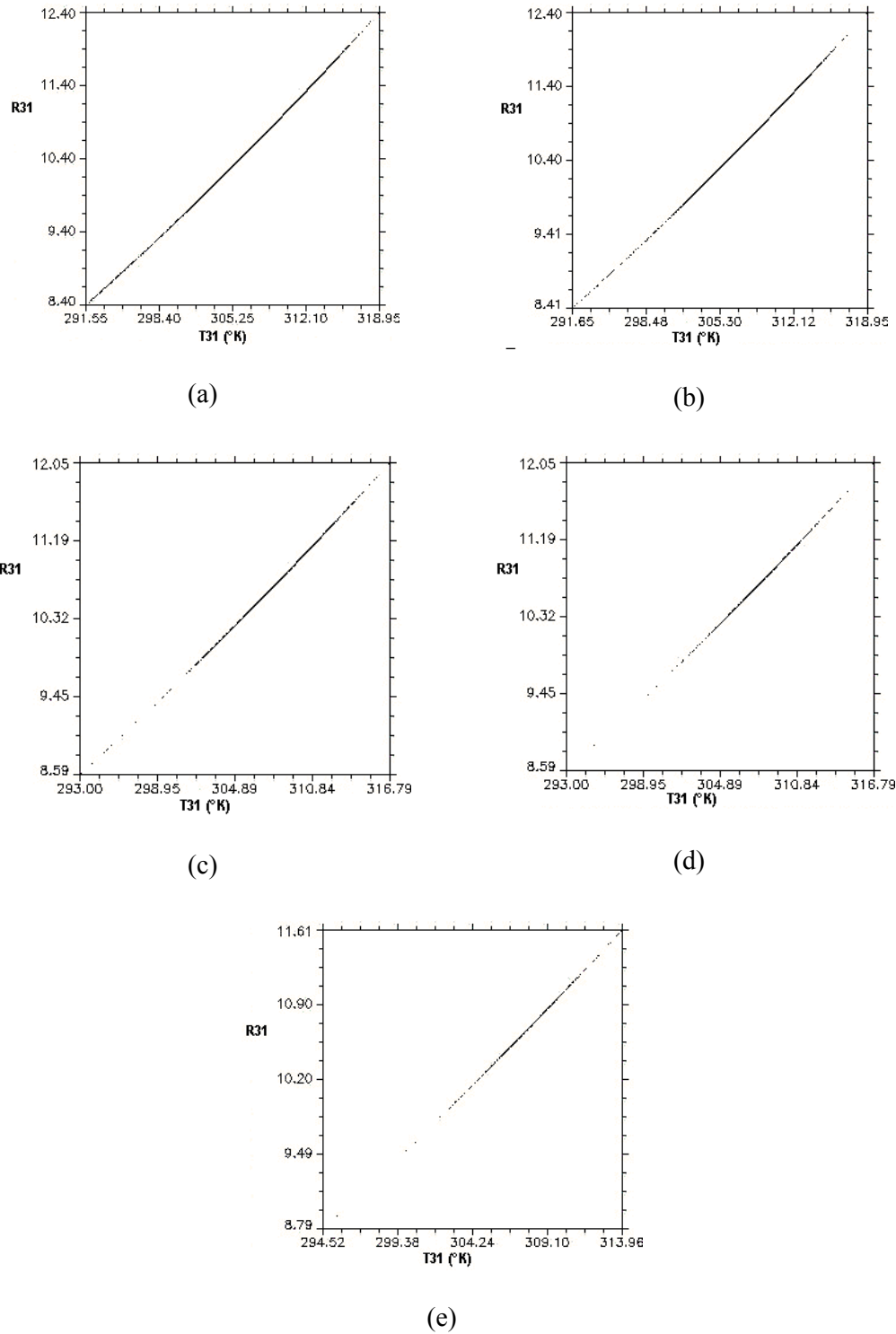


Figura 4.4: Relación R_{31} - T_{31} para el día 268/2004 para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km

Se calculó la T_{31} con la imagen original MOD02, cuyo tamaño de píxel es de 1x1 km. Luego se obtuvieron las imágenes agregadas para resoluciones de 2 km, 4 km, 8 km y

10 km. A modo de ejemplo, la Figura N° 4.5 muestra la imagen de NDVI y la Figura N° 4.6 las imágenes de T_{31} para diferentes resoluciones espaciales.

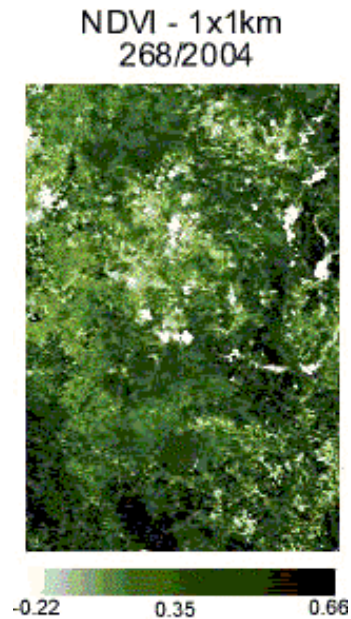


Figura N° 4.5: Imagen de NDVI (1x1 km) correspondiente al día 268/2004

El análisis visual de la Figura N° 4.6 indicaría que no existe pérdida sustancial de la información térmica de la región al ir reduciendo la resolución espacial. Sin embargo, el análisis visual no permite cuantificar las diferencias entre resoluciones espaciales. Por esto se calcularon los valores mínimos, medios y máximos de las imágenes agregadas, a fin de corroborar que la distribución espacial original de T_{31} se conservaría en cierta medida (Tabla N° 4.1). La Figura N° 4.7 permite observar las variaciones de los valores mínimos, medios y máximos de T_{31} para el día 268/2004 al ir aumentando el tamaño del píxel.

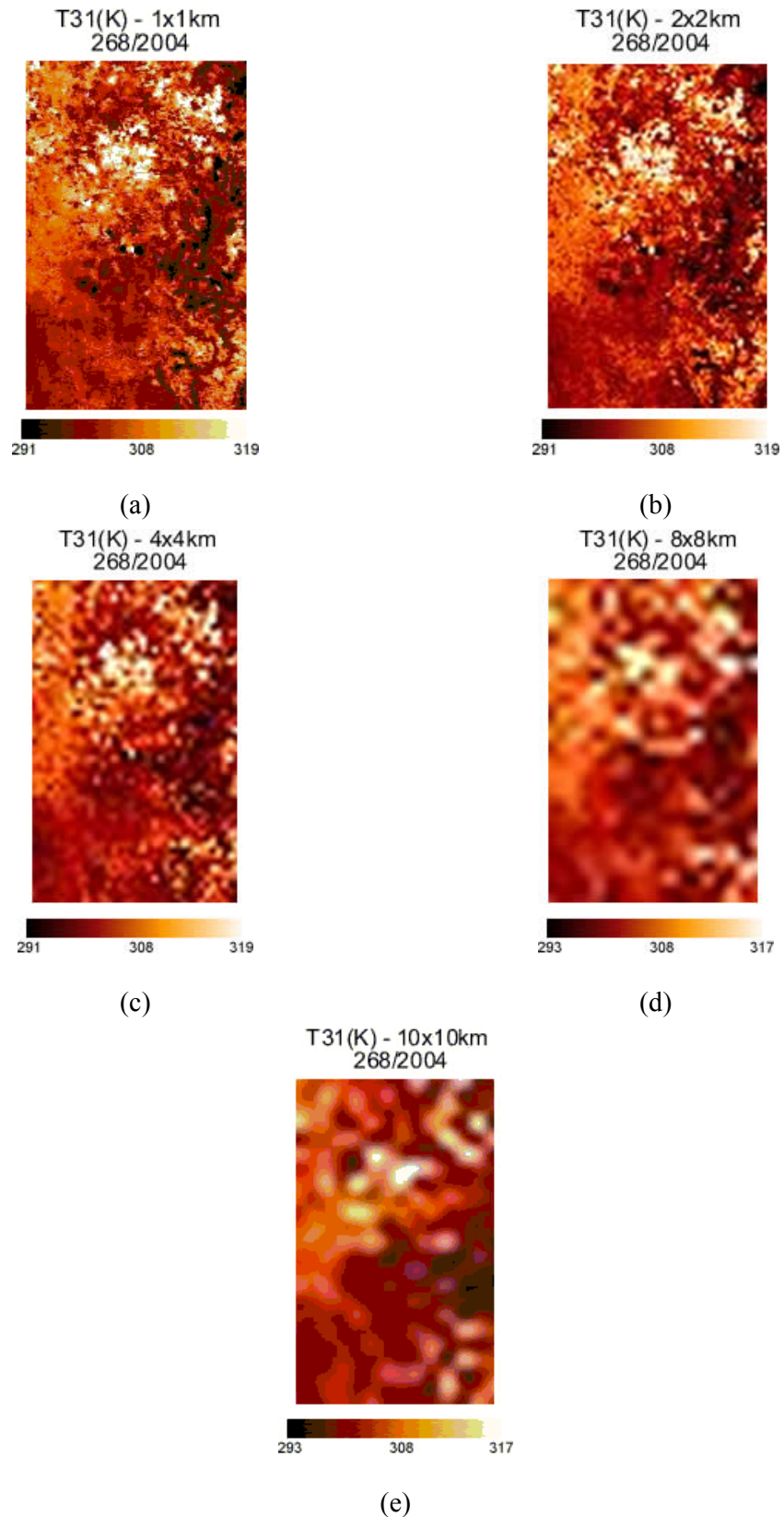


Figura N° 4.6: Imágenes de T₃₁ del día 268/2004 para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km

Tabla N° 4.1: Comparación de los valores mínimos, medios y máximos de T_{31} (°K) a diferentes resoluciones espaciales

Día	1x1 km			2x2 km			4x4 km		
	Mín	Med	Máy	Mín	Med	Máy	Mín	Med	Máy
259	287.03	299.02	306.97	287.03	299.03	306.19	287.97	299.04	304.94
261	274.58	298.82	307.75	273.80	298.81	307.75	274.70	298.81	307.75
268	291.55	307.88	319.95	291.65	307.88	318.95	293.00	307.86	316.79
04	297.06	300.40	302.78	297.61	300.40	302.42	297.82	300.39	302.34
05	273.01	302.47	315.53	273.02	302.49	315.07	273.03	302.19	313.69
07	273.40	305.95	315.04	273.72	305.94	314.52	274.31	305.92	314.52

Día	8x8 km			10x10 km		
	Mín	Med	Máy	Mín	Med	Máy
259	288.62	299.09	304.44	293.79	299.11	303.91
261	276.73	298.81	304.85	276.40	299.16	304.93
268	293.00	307.90	316.79	294.53	307.69	313.96
04	297.95	300.39	302.34	298.05	300.41	302.09
05	273.59	302.42	313.29	274.11	302.67	312.13
07	277.78	305.94	314.02	277.39	305.93	312.96

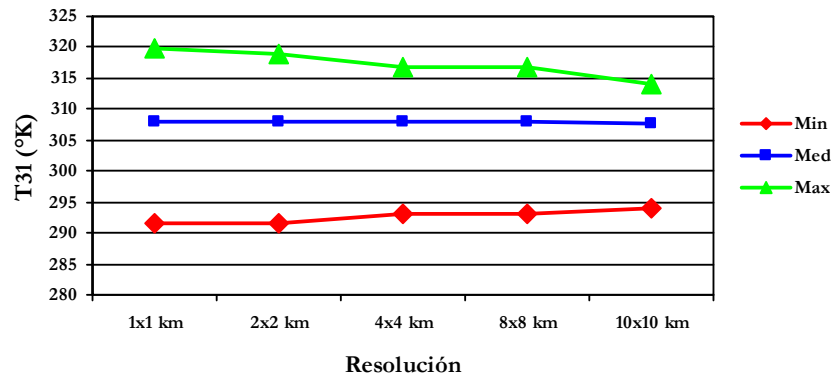


Figura N° 4.7: Valores mínimos, medios y máximos de T_{31} para el día 268/2004

Los estadísticos presentados en la Tabla N° 4.1 y la Figura N° 4.7, estarían indicando que, en la zona en estudio, los valores regionales de T_{31} no cambian significativamente con las diferentes resoluciones espaciales analizadas, sin embargo se pierde detalle en los extremos. Dado que se utilizó un promedio lineal, se verificó esta conclusión con un análisis de los histogramas de frecuencias, los que resumen la distribución areal de los valores de temperatura para cada resolución espacial estudiada. En general, en los días analizados se observó que para todas las resoluciones estudiadas, las

máximas y mínimas frecuencias se registran aproximadamente para los mismos valores de temperaturas (Ver Apéndice 1). En el caso particular del día 268/2004, las máximas frecuencias se observan para valores de temperatura del orden de los 307 K, y las mínimas frecuencias para valores de T_{31} inferiores a los 300 K y superiores a los 314 K (Figura N° 4.8). Estos resultados corroboran los valores de los estadísticos de la Tabla N° 4.1.

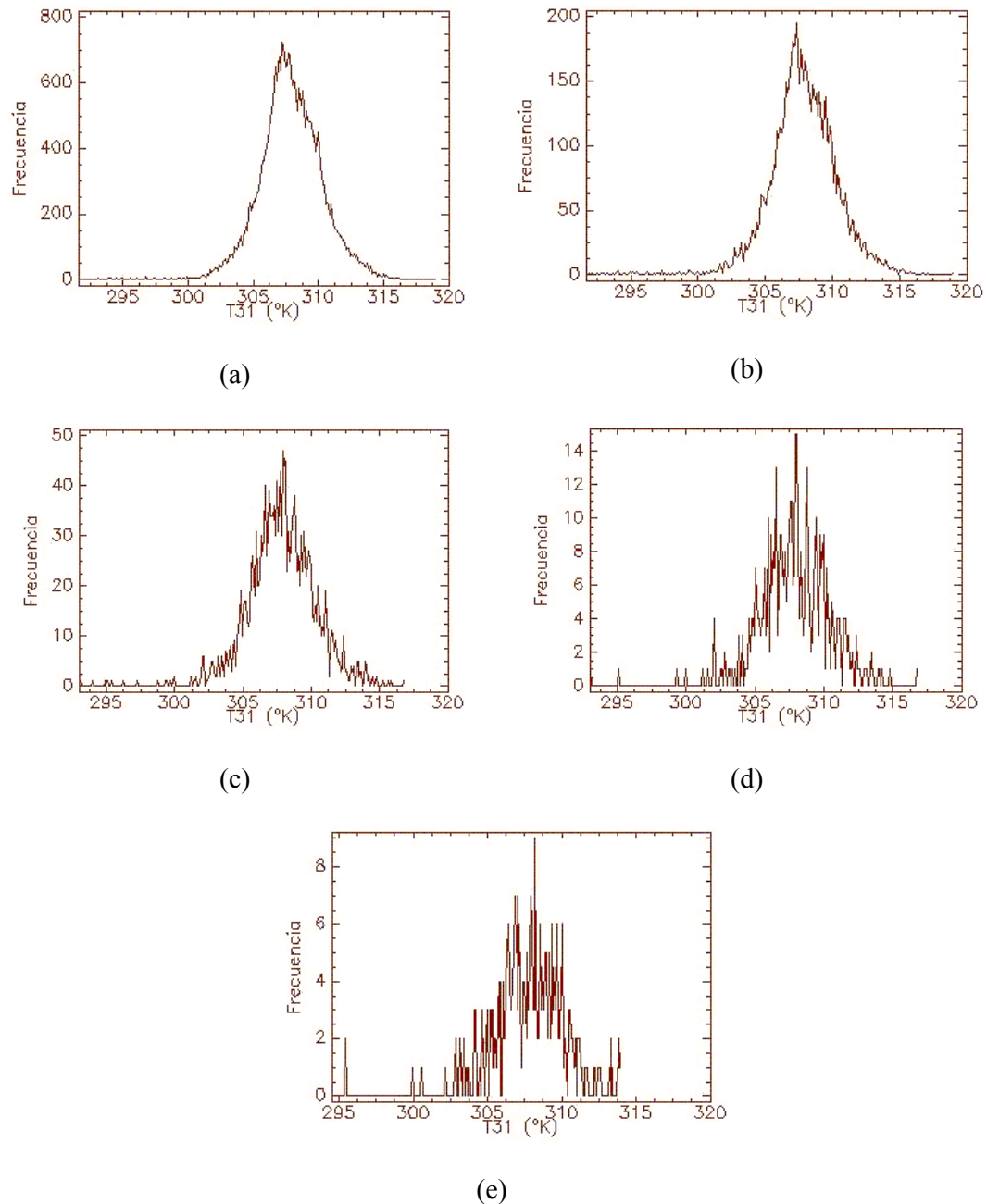


Figura N° 4.8: Histogramas de frecuencia de T_{31} – Día 268/2004 para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 4x4 km (e) 10x10 km

Si bien la información térmica regional no cambiaría con la disminución de la resolución espacial de las imágenes procesadas, esto no implica que la incertidumbre de las estimaciones hidrológicas que se puedan derivar de las diferentes imágenes agregadas, se mantenga. Es por esto que se debe analizar la influencia de los resultados presentados en la Tabla N° 4.1 en términos de ϕ .

El parámetro ϕ de Jiang e Islam, explicado en el Capítulo 2, se obtuvo con los espacios NDVI- T_{31} , generados con imágenes de T_{31} pixeladas a 1x1 km, de la forma y por los motivos que se explican en el apartado 2.3.3.

Como se explicó oportunamente (apartado 2.2), los bordes inferior y superior del triángulo son los elementos clave para la determinación de ϕ . Es por ello que en este trabajo se analizaron por separado las particularidades de cada uno de dichos bordes.

Las características que definen el borde superior de los diferentes espacios triangulares están resumidas en la Tabla N° 4.2, donde se presentan los valores de NDVI máximo (NDVImáx), pendiente del borde superior del triángulo NDVI- T_{31} y la $T_{máx}$ del método de Jiang e Islam para cada imagen agregada.

Se observan diferencias en las pendientes de los límites superiores de los triángulos NDVI- T_{31} que ocasionan variaciones en las temperaturas máximas (para NDVI=0) menores a los 6 K. Cabe destacar que no se encontró en la bibliografía trabajos en los que se haya analizado la temperatura máxima del modelo de Jiang e Islam.

En general, estos resultados indicarían que imágenes de T_{31} con píxeles más grandes de 1x1 km no influirían en el diagrama triangular, más específicamente en el valor de la temperatura máxima correspondiente a NDVI=0, cuyas diferencias están comprendidas dentro de los errores comunes en el cálculo de T_{31} . Esta conclusión se sustentaría en los resultados de trabajos antecedentes. Por ejemplo, Venturini et al. (2004) analizaron la temperatura de superficie de diferentes sensores ópticos con igual resolución

espacial encontrando diferencias similares al comparar los distintos sensores. Kustas et al. (2003), analizaron píxeles inferiores a 1 km obteniendo similares diferencias

Tabla N° 4.2: Características de los bordes superiores de los espacios triangulares obtenidos para cada día y cada resolución espacial.

Resolución	Día 259 Año 2004			Día 261 Año 2004		
	NDVI max	Pte.	Tmax (K)	NDVI max	Pte.	Tmax (K)
1 Km	0.70	-0.0510	309.12	0.60	-0.0310	315.24
2 Km	0.70	-0.0454	311.49	0.60	-0.0305	316.23
4 Km	0.70	-0.0623	307.74	0.60	-0.0279	317.98
8 Km	0.70	-0.0529	310.17	0.60	-0.0240	320.73
10 Km	0.70	-0.0571	311.45	0.60	-0.0364	314.53
Resolución	Día 268 Año 2004			Día 04 Año 2005		
	NDVI max	Pte.	Tmax (K)	NDVI max	Pte.	Tmax (K)
1 Km	0.66	-0.0336	325.35	0.74	-0.0690	309.95
2 Km	0.66	-0.0395	323.79	0.74	-0.0718	310.09
4 Km	0.66	-0.0423	322.58	0.74	-0.0586	312.05
8 Km	0.66	-0.0385	324.12	0.74	-0.0707	313.82
10 Km	0.66	-0.0410	322.66	0.74	-0.0869	311.49
Resolución	Día 05 Año 2005			Día 07 Año 2005		
	NDVI max	Pte.	Tmax (K)	NDVI max	Pte.	Tmax (K)
1 Km	0.79	-0.0298	328.54	0.81	-0.0378	325.26
2 Km	0.79	-0.0295	329.50	0.81	-0.0353	327.00
4 Km	0.79	-0.0311	329.69	0.81	-0.0368	327.76
8 Km	0.79	-0.0269	333.82	0.81	-0.0335	328.40
10 Km	0.79	-0.0246	334.35	0.81	-0.0475	324.27

4.2.1 Análisis del parámetro ϕ con T_{\min} constante

Se entiende por T_{\min} constante a la temperatura media de aquellos píxeles identificados como saturados o de agua libre (con $NDVI \leq 0$) obtenida para la resolución espacial original de 1x1 km, la cual se mantiene para las demás resoluciones analizadas. Este valor de T_{\min} obtenido con las imágenes originales representa el borde inferior del triángulo $NDVI-T_{31}$ en todos los casos.

Con T_{\min} así definido, se trazaron los espacios $NDVI-T_{31}$ para las diferentes resoluciones como se observa en la Figura N° 4.9. Para el día 268 se observa que no existen cambios importantes a medida que cambia la resolución espacial. Los espacios triangulares de los demás días analizados se presentan en el Apéndice 1.

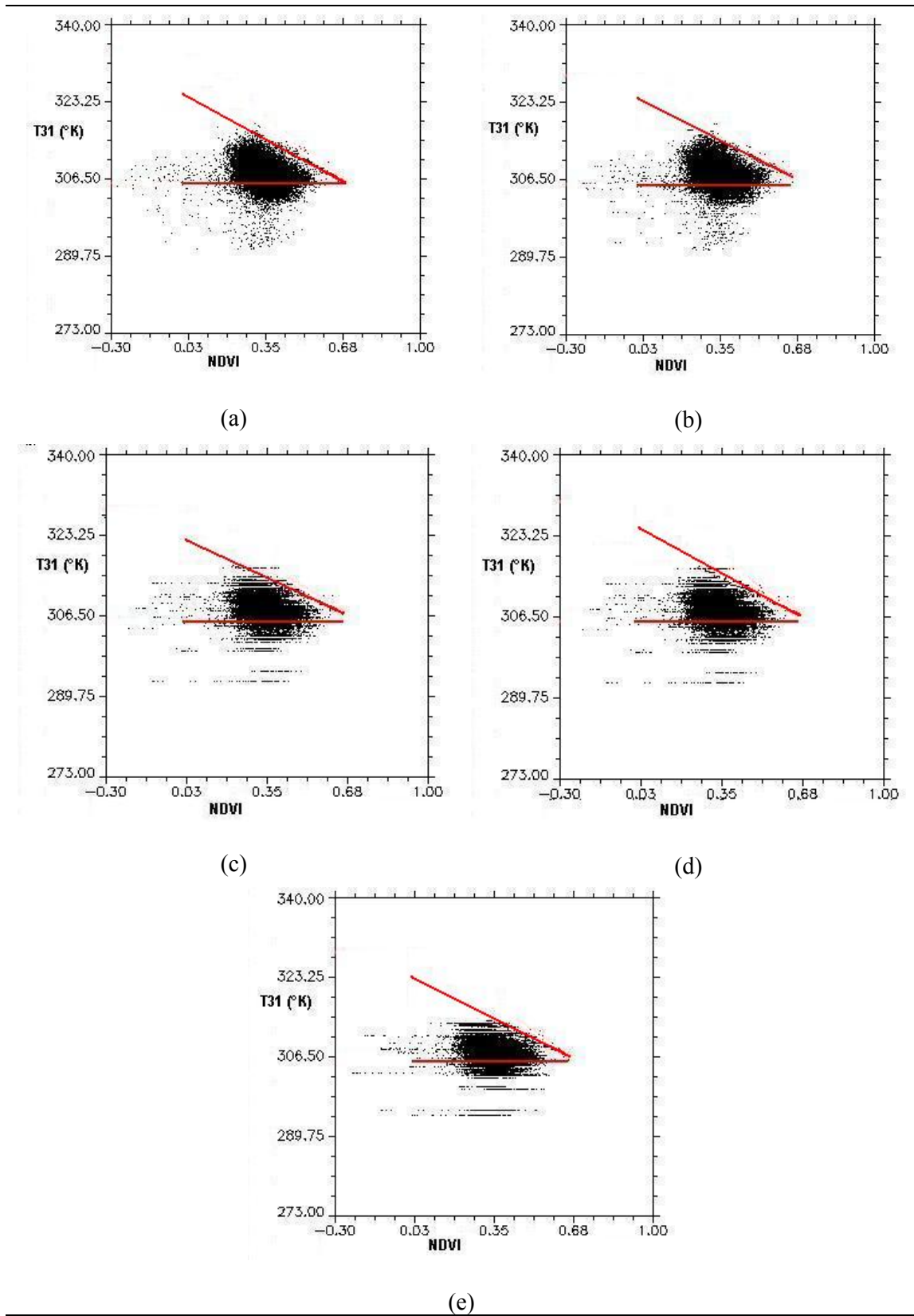


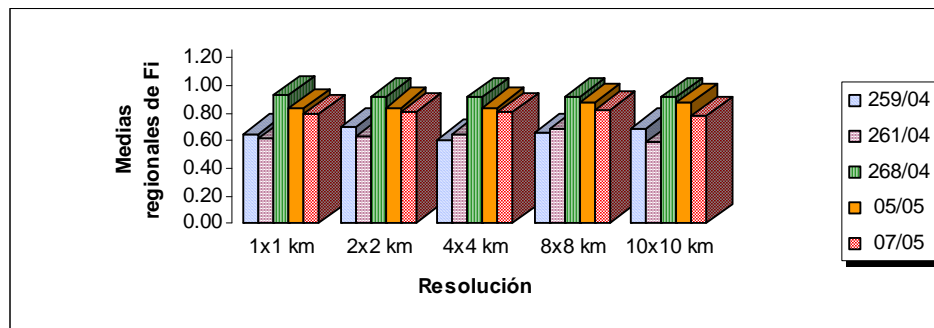
Figura N° 4.9: Diagramas triangulares NDVI- T_{31} con T_{\min} constante - Día 268/2004 para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km

Las imágenes de ϕ se generaron a partir de las temperaturas máximas (ver Tabla N° 4.2) y la T_{\min} constante. Cabe aclarar que para el día 04-2005 no se identificaron píxeles saturados o de agua libre, por lo que no fue posible obtener la temperatura media del agua.

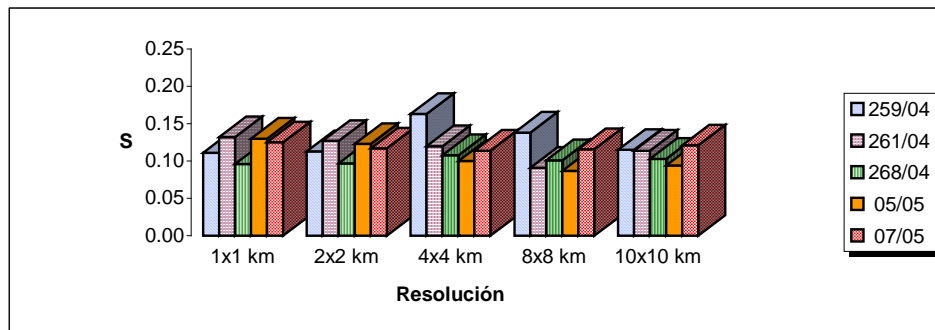
Los valores medios y desvíos estándares de las imágenes de ϕ se resumen en la Tabla N° 4.3. La representación gráfica de los estadísticos se observa en la Figura N° 4.10. El desvío estándar (S) es inferior al 20% de la media, por lo que no es representativo como para realizar un análisis del mismo.

Tabla N° 4.3: Comparación de las medias y desvíos estándares (S) de los valores regionales de ϕ a diferentes resoluciones para T_{\min} constante.

Día	1x1 km		2x2 km		4x4 km		8x8 km		10x10 km	
	Media	S	Media	S	Media	S	Media	S	Media	S
259/04	0.65	0.111	0.70	0.098	0.61	0.123	0.66	0.100	0.69	0.089
261/04	0.62	0.132	0.63	0.126	0.65	0.121	0.68	0.111	0.59	0.115
268/04	0.93	0.096	0.92	0.098	0.92	0.105	0.92	0.098	0.92	0.103
05/05	0.83	0.130	0.84	0.130	0.84	0.128	0.87	0.131	0.87	0.129
07/05	0.79	0.125	0.81	0.119	0.81	0.116	0.82	0.114	0.78	0.127



(a)



(b)

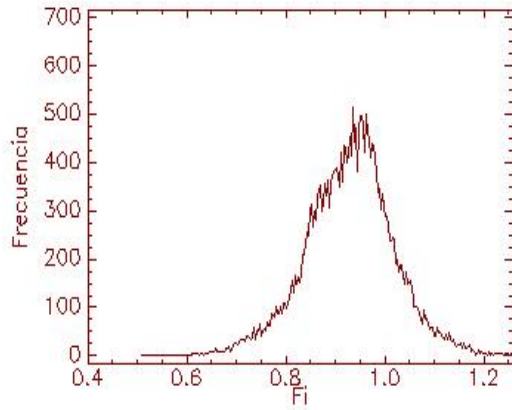
Figura N° 4.10: Representación gráfica de los estadísticos de ϕ para diferentes resoluciones y T_{\min} constante: (a) medias regionales y (b) desvíos estándares

Como se puede observar en la Tabla N° 4.3, no existe un patrón de variación en lo que respecta al valor medio regional de ϕ . Las diferencias encontradas oscilan entre 0,01 y 0,06 (aproximadamente 2 a 10 % del valor medio), evidenciándose las mayores a partir de tamaños de píxeles superiores a los 8 km. Batra et al. (2005) determinaron el valor de ϕ para diferentes sensores con resolución espacial 1x1 km. Estos autores obtuvieron diferencias de alrededor del 10% en el valor regional medio de ϕ . Venturini et al. (2004) encontraron diferencias en el valor medio de ϕ de aproximadamente un 15% para diferentes sensores, siempre con una resolución 1x1 km.

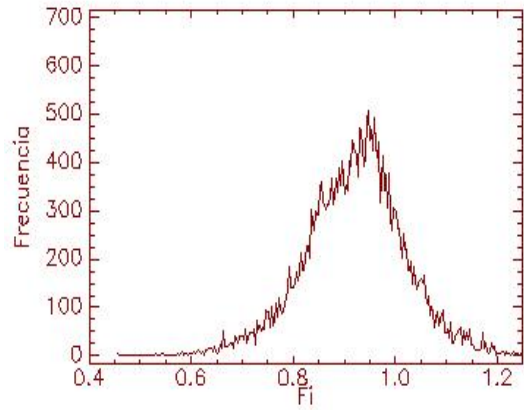
La Figura N° 4.11 permite observar los histogramas de ϕ a diferentes resoluciones espaciales y la Figura N° 4.12 las imágenes obtenidas de ϕ para diferentes tamaños de píxeles.

El análisis de los histogramas permite observar que para todas las resoluciones estudiadas, las máximas y mínimas frecuencias se registran para el mismo orden de valores de ϕ (ver Apéndice 1). En el caso particular del día 268/2004, las máximas frecuencias se registran para valores de ϕ del orden de los 0,9. Para todas las resoluciones las mínimas frecuencias se observan para valores de ϕ menores a 0,7 y mayores a 1,1, lo que es concurrente con lo analizado en la Tabla N° 4.3.

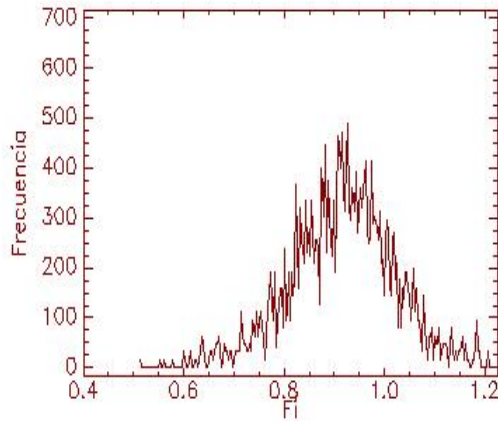
Estos resultados indicarían que el método desarrollado por Jiang e Islam estaría arrojando resultados aceptables en términos de ϕ con imágenes cuyas resoluciones espaciales son compatibles con las obtenidas con MP. Cabe destacar que en algunos casos, la distribución de los píxeles no presenta un borde inferior constante (representado por T_{\min}), por lo que la aplicación del método debería contemplar un borde inferior lineal, pero variable. De esta forma se evitaría deformaciones significativas en los triángulos, como los observados para los días 261/2004 y 07/2005 (Ver Apéndice 1).



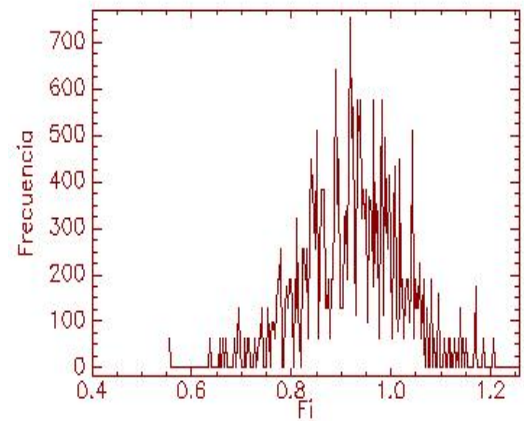
(a)



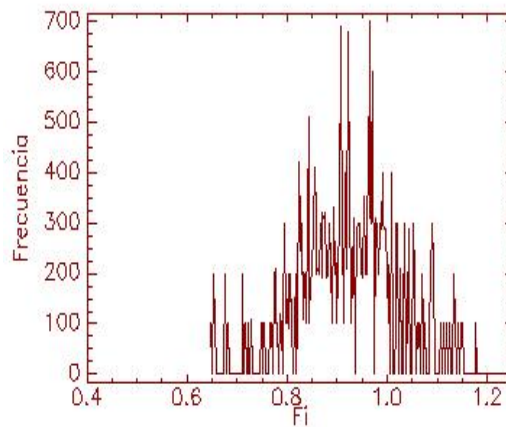
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura N° 4.11: Histogramas de frecuencia de ϕ para el día 268/2004 con T_{\min} constante para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km.

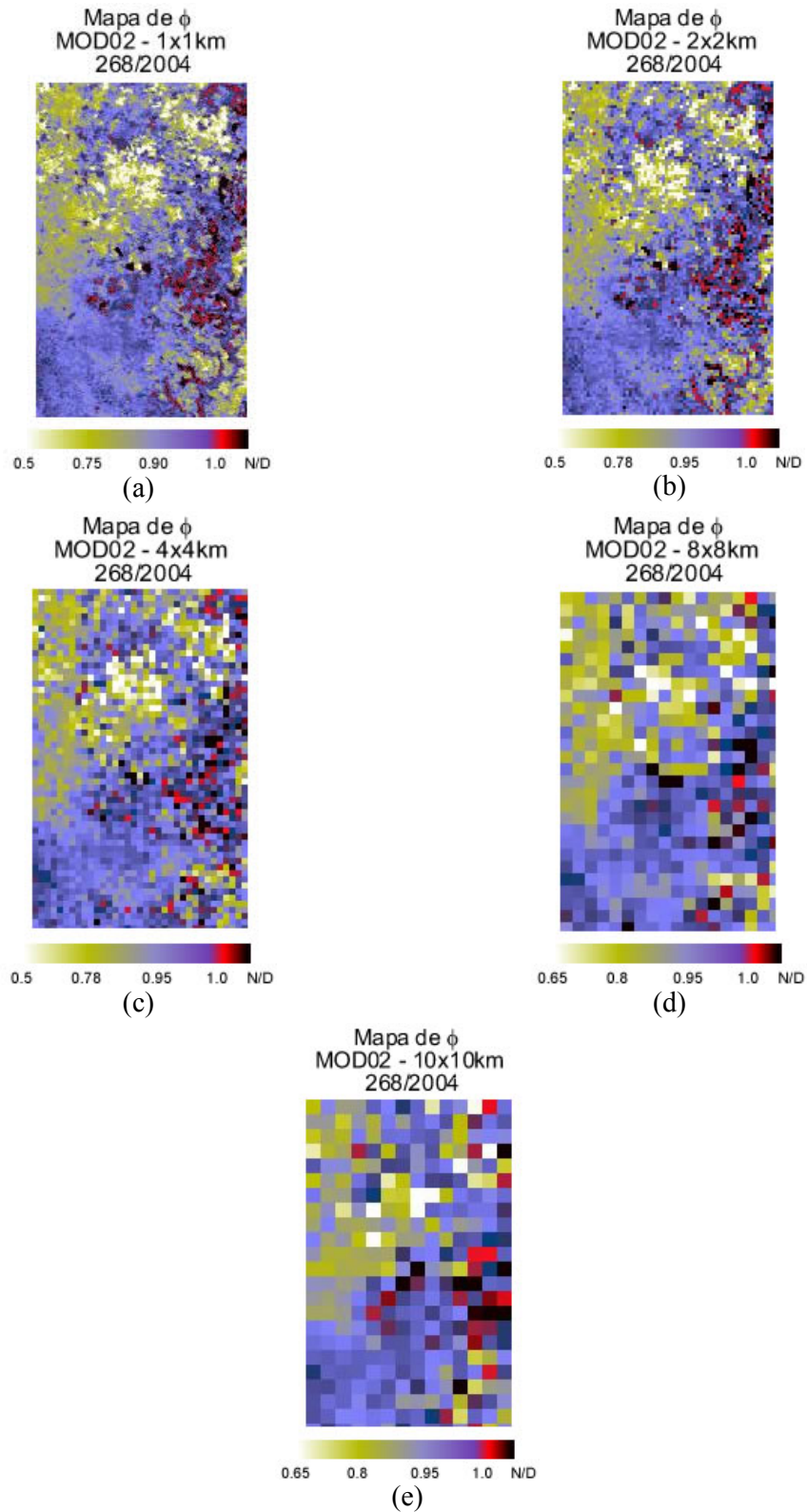


Figura N° 4.12: Imágenes de ϕ para el día 268/2004 con T_{\min} constante, obtenidas con el producto MOD02 para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km

4.2.2 Análisis del parámetro ϕ con T_{\min} variable

Se entiende por T_{\min} variable, a la temperatura media de aquellos píxeles identificados con $NDVI \leq 0$ obtenida para **cada una** de las imágenes agregadas, la que representa el borde inferior del triángulo NDVI- T_{31} . Se calculó el borde inferior del triángulo para cada imagen, independientemente de la resolución espacial. Cabe destacar que el problema de píxeles mixtos (esto es en cada píxel podrían coexistir diferentes tipos y usos de suelos y agua libre), es mayor a medida que mayor es el tamaño del píxel. Sin embargo los MP pueden ser la única fuente de datos para identificar zonas con presencia de agua libre, aunque se sabe que estos píxeles no son puros.

Se trazaron los espacios NDVI- T_{31} para las diferentes resoluciones (ver Figura N° 4.13). En dicha figura se observan cambios en los diferentes diagramas triangulares, fundamentalmente debido a cambios en los valores de T_{\min} . Nótese (Figura N° 4.13) que al ir disminuyendo la resolución espacial, los píxeles de la zona C y D de la Figura N° 2.1 van perdiendo definición, mientras que los píxeles de las zonas B y A se van densificando dentro del triángulo. En otras palabras los valores extremos se van perdiendo a medida que disminuye la resolución espacial con la consiguiente agregación de la información. Cabe aclarar que para el día 268/04 (día elegido arbitrariamente para mostrar los resultados de esta tesis) dichos cambios son más pequeños que los encontrados en los otros días analizados (ver gráficos en Apéndice 1) tal como se observa en Tabla N° 4.4. En dicha tabla y en la Figura N° 4.14 se muestran los valores medios y desvíos estándares de las imágenes de ϕ , obtenidas con los triángulos correspondientes a cada día y a cada resolución analizada.

En general, se observa que el valor medio de ϕ para cada uno de los días, aumenta a medida que se disminuye la resolución espacial de T_{31} (Tabla N° 4.4).

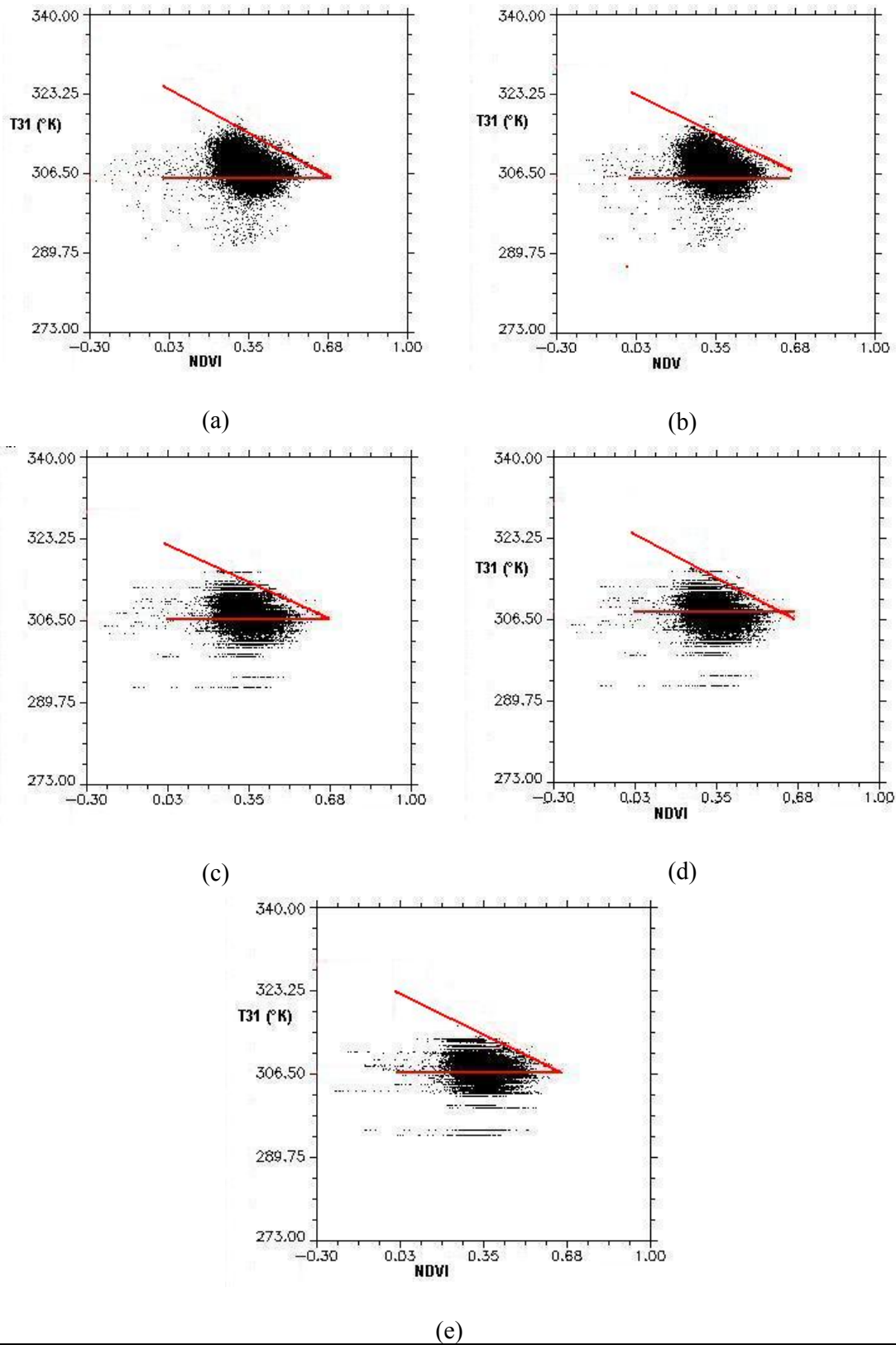
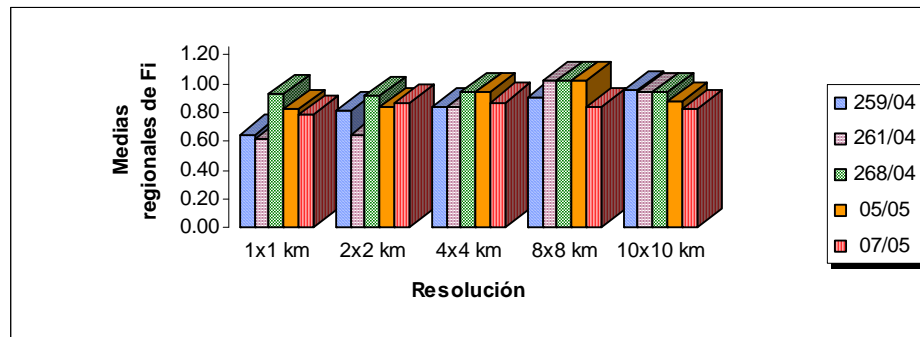


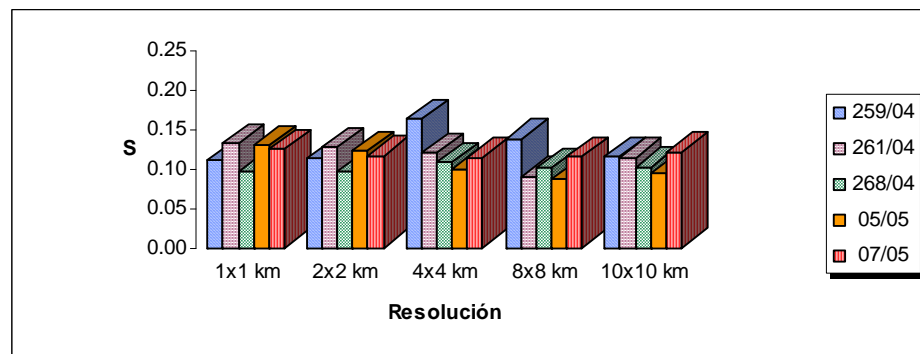
Figura N° 4.13: Diagramas triangulares NDVI- T_{31} con T_{\min} variable – Día 268/2004 para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km

Tabla N° 4.4: Comparación de las medias y desvíos estándares (S) de los valores de ϕ a diferentes resoluciones para T_{\min} variable.

Día	1x1 km		2x2 km		4x4 km		8x8 km		10x10 km	
	Media	S	Media	S	Media	S	Media	S	Media	S
259/04	0.65	0.111	0.81	0.113	0.84	0.163	0.91	0.138	0.95	0.115
261/04	0.62	0.132	0.65	0.127	0.84	0.120	1.02	0.091	0.94	0.114
268/04	0.93	0.096	0.92	0.097	0.94	0.108	1.02	0.101	0.94	0.103
05/05	0.83	0.130	0.84	0.123	0.94	0.100	1.02	0.087	0.88	0.094
07/05	0.79	0.125	0.86	0.117	0.87	0.114	0.84	0.116	0.83	0.121



(a)



(b)

Figura N° 4.14: Representación gráfica de las medias y desvíos estándares (S) de los valores regionales de ϕ a diferentes resoluciones para T_{\min} variable: (a) medias regionales y (b) desvíos estándares.

Nuevamente, el desvío estándar es inferior al 20 % del valor medio regional de ϕ , compatible con los errores publicados del método (*Jiang e Islam, 2001; Venturini et al., 2004; Batra et al., 2006*). Se observa que las diferencias en el valor medio estimado de ϕ oscilan entre 0.01 y 0.40 (2 a 60 % del valor medio), observándose las mayores diferencias (con respecto a la imagen original a resolución 1x1 km), a partir de resoluciones mayores a

4x4 km. Esto se debe a que el borde inferior del triángulo corresponde a temperaturas mayores con la agregación de los píxeles.

La Figura N° 4.15 permite observar los histogramas de ϕ a diferentes resoluciones espaciales y la Figura N° 4.16 las imágenes de ϕ correspondientes.

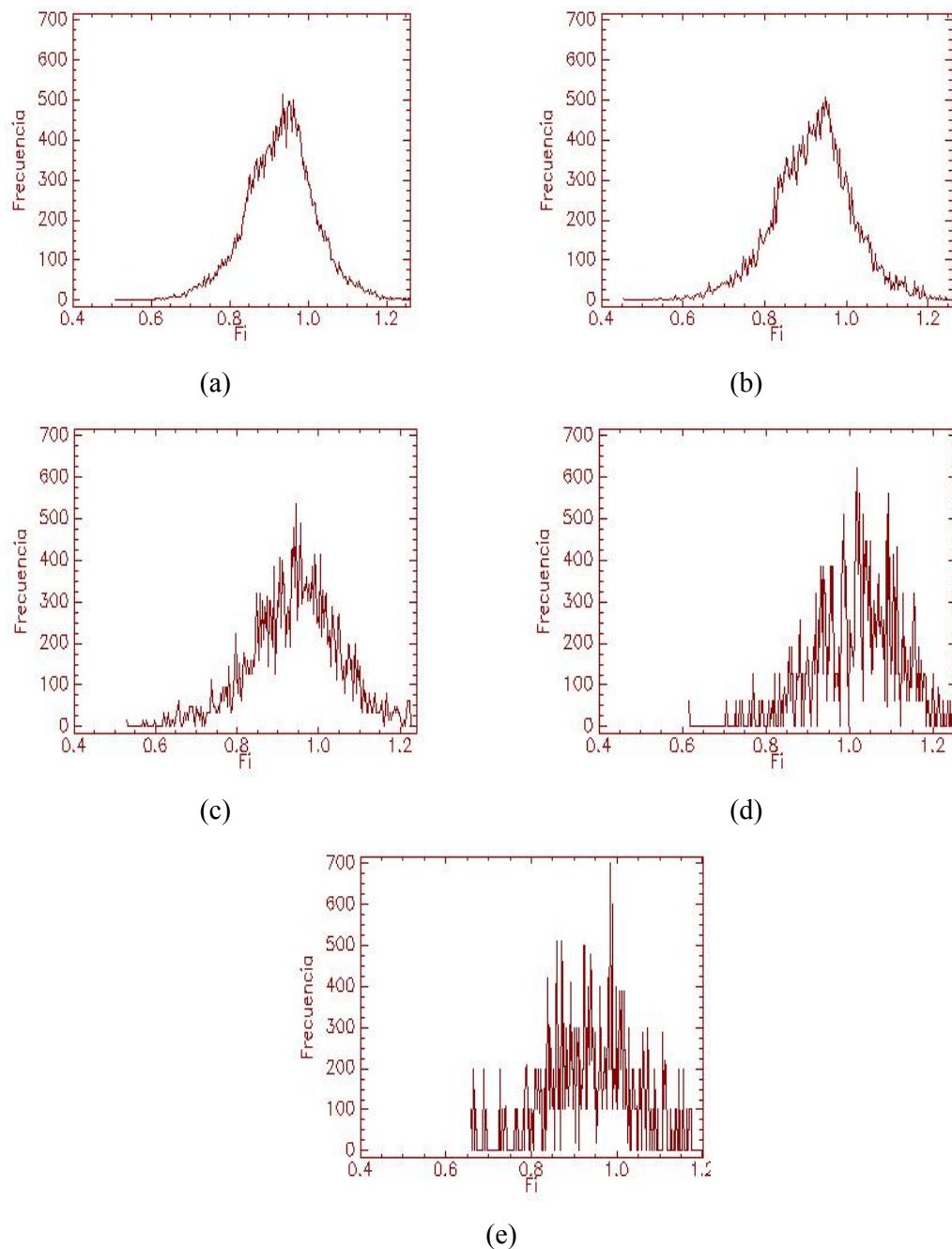


Figura N° 4.15: Histogramas de ϕ con T_{\min} variable – Día 268/2004 para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km

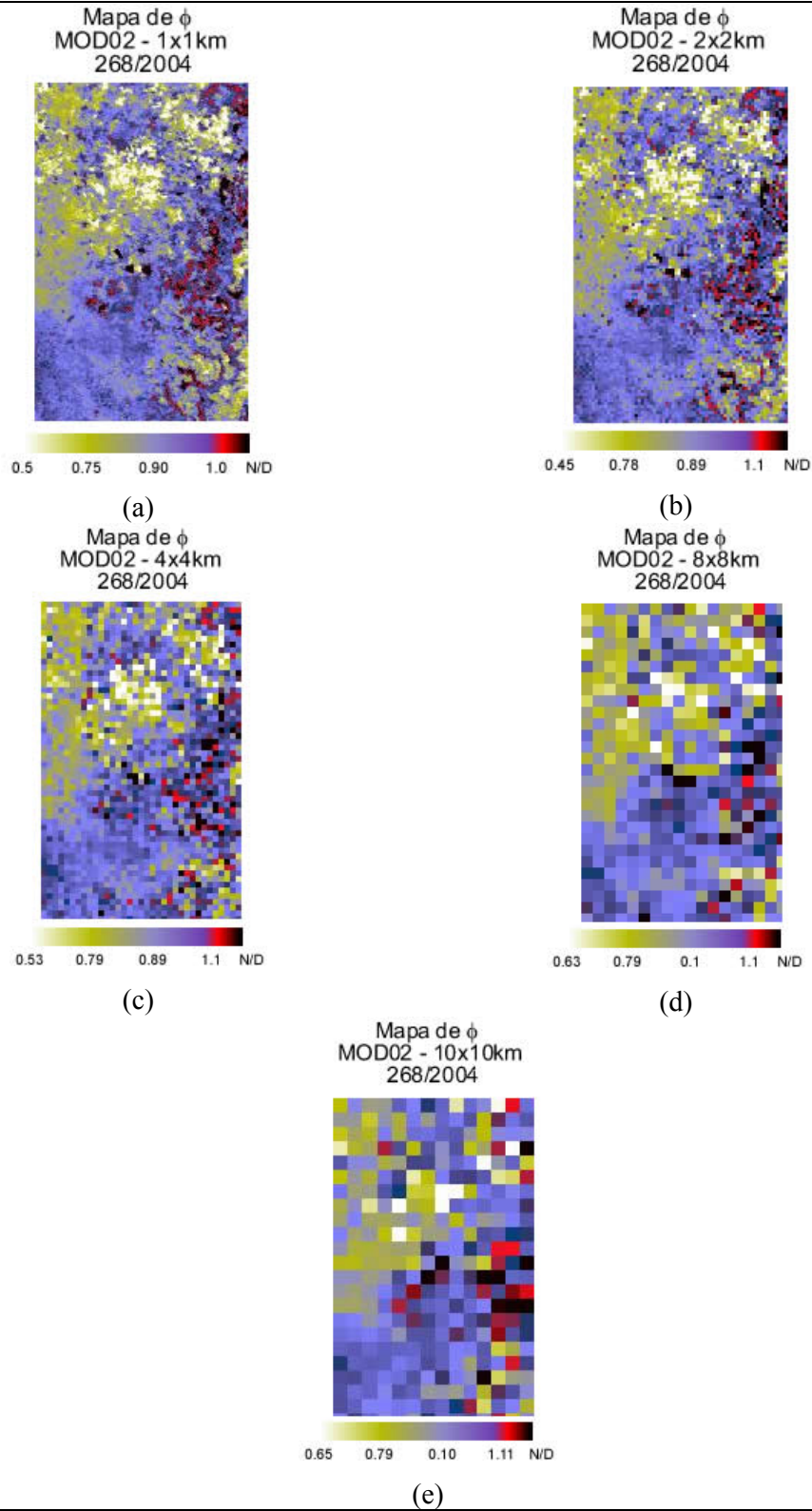


Figura N° 4.16: Imágenes de ϕ con T_{\min} variable, obtenidas con el producto MOD02 – Día 268/2004 para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km.

El análisis de los histogramas verifica los resultados de la Tabla N° 4.4. Al ir disminuyendo la resolución, las máximas frecuencias se registran para valores de ϕ mayores. Para el caso expuesto en la Figura 4.15, se puede observar que las mayores frecuencias se dan para $\phi=0,95$ en la imagen de resolución 1x1 km, hasta alcanzar un valor de $\phi= 1$ en la imagen de resolución 10x10 km. Las mínimas frecuencias se observan para valores de ϕ menores a 0,7 y mayores a 1,1 en el caso de resolución original. Paralelamente al corrimiento del máximo, la mínima y máxima frecuencia sufren un desplazamiento. Para resolución 4x4 km se evidencian frecuencias un poco mas altas para valores de ϕ menores a 0,7. Para el caso de resolución 10x10 km no se registran valores de frecuencias para ϕ menores a 0,7. Resultados similares se observaron en los otros días analizados (ver Apéndice 1).

Estos resultados indicarían que el método desarrollado por Jiang e Islam arrojaría resultados cuestionables en términos de ϕ si T_{\min} es calculado con imágenes cuyo tamaño de píxel es superior a los 4x4 km, aunque el análisis de las imágenes agregadas de T_{31} no parece ser significativamente afectadas por la resolución espacial.

4.3 Análisis con T_s

El producto MOD11 ofrece la temperatura de superficie (T_s) a resolución 1x1 km. La agregación de los píxeles de T_s se realizó por simple promedio aritmético obteniéndose imágenes a resoluciones de 2x2 km, 4x4 km, 8x8 km y 10x10 km. A modo de ejemplo, la Figura N° 4.17 muestra las imágenes de T_s para diferentes resoluciones espaciales correspondiente al día 268 del año 2004. En el Apéndice 1 se pueden ver las imágenes de T_s correspondientes a los demás días analizados.

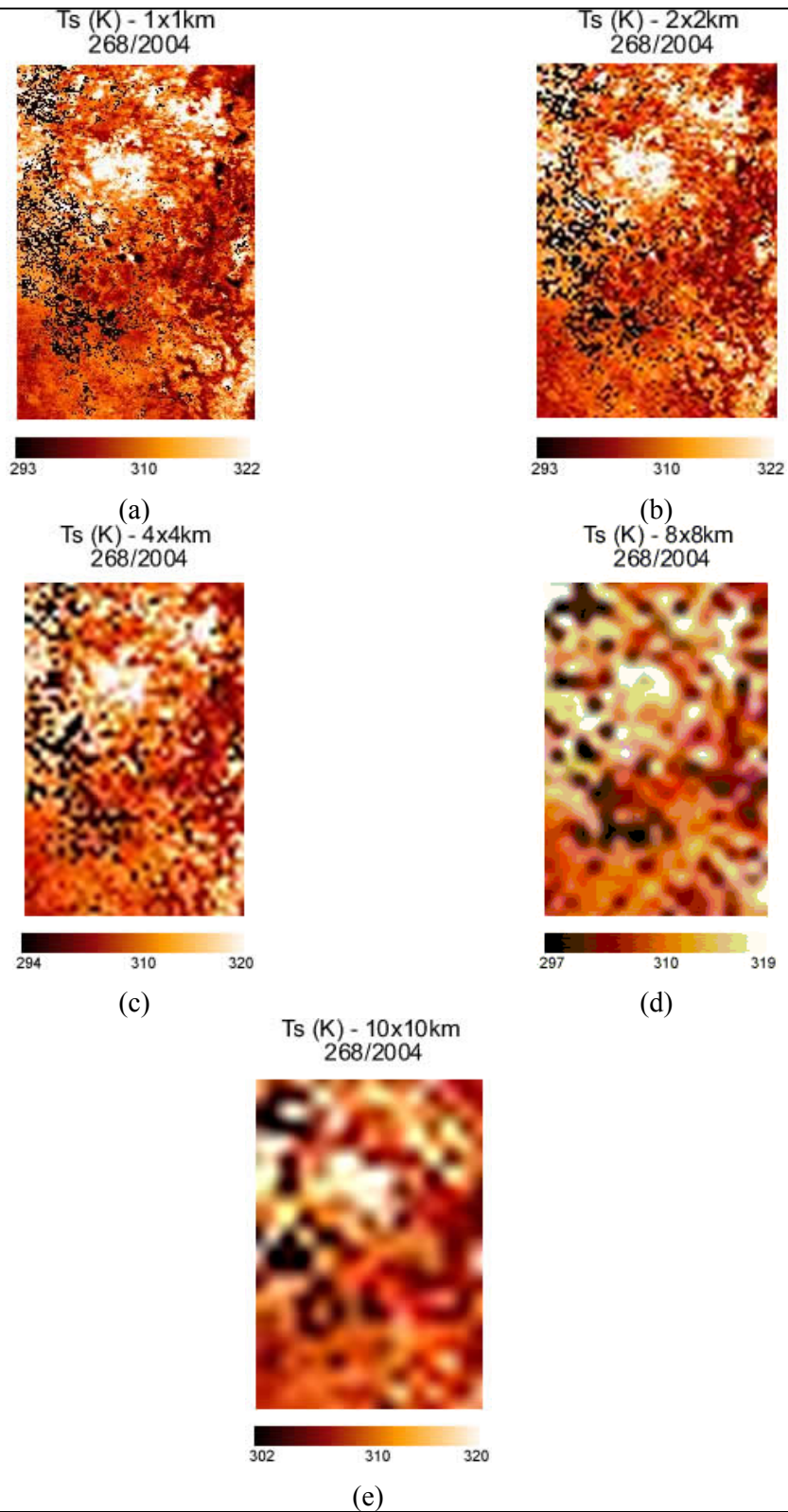


Figura N° 4.17: Imágenes de T_s – Día 268/2004 para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km.

El análisis visual de la Figura N° 4.17 nuevamente indicaría que no existe pérdida sustancial de la información térmica de la región al ir aumentando el tamaño del pixel de T_s . Para verificar esta presunción, se calcularon los valores mínimos, medios y máximos de las imágenes agregadas, a fin de corroborar que la distribución espacial original de T_s se conserva (Tabla N° 4.5). Las mayores variaciones se observaron para los valores máximos y mínimos tal como lo esperado, dado que los promedios son lineales (Figura N° 4.18)

Tabla N° 4.5: Comparación de los valores mínimos, medios y máximos de T_s (K) a diferentes resoluciones espaciales

Día	1x1 km			2x2 km			4x4 km		
	Mín	Med	Máx	Mín	Med	Máx	Mín	Med	Máx
259	287.44	301.15	309.92	287.44	301.17	308.72	288.10	301.17	308.28
266	288.50	303.56	311.30	288.56	303.60	311.30	288.78	303.64	310.26
268	292.74	309.95	321.86	292.73	309.97	321.86	293.84	309.99	320.30
Día	8x8 km			10x10 km					
	Mín	Med	Máx	Mín	Med	Máx			
259	288.48	301.19	306.74	288.26	301.18	306.42			
266	289.60	303.66	310.26	288.66	303.65	309.76			
268	295.62	310.08	318.70	302.28	309.96	321.86			

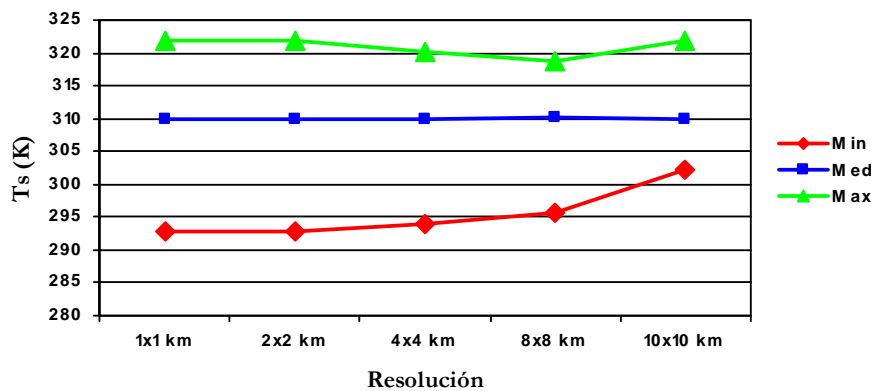


Figura N° 4.18: Valores mínimos, medios y máximos de T_s para el día 268/2004

La Figura N° 4.19 permite observar los histogramas de frecuencia de T_s para diferentes resoluciones espaciales obtenidos para el día 268/04, donde se observa que para todas las resoluciones espaciales analizadas, la T_s registra las mayores frecuencias para valores del orden de los 310 K. Las mínimas frecuencias se registran para valores de T_s menores a los 305 K aproximadamente y mayores a los 315 K, aunque para resolución

10x10 km se observa que para valores de $T_s = 316$ °K ya no se registran frecuencias. En general, para todos los días analizados, se observa para todas las resoluciones estudiadas, las máximas y mínimas frecuencias se registran para los mismos valores de T_s aproximadamente (Apéndice 1).

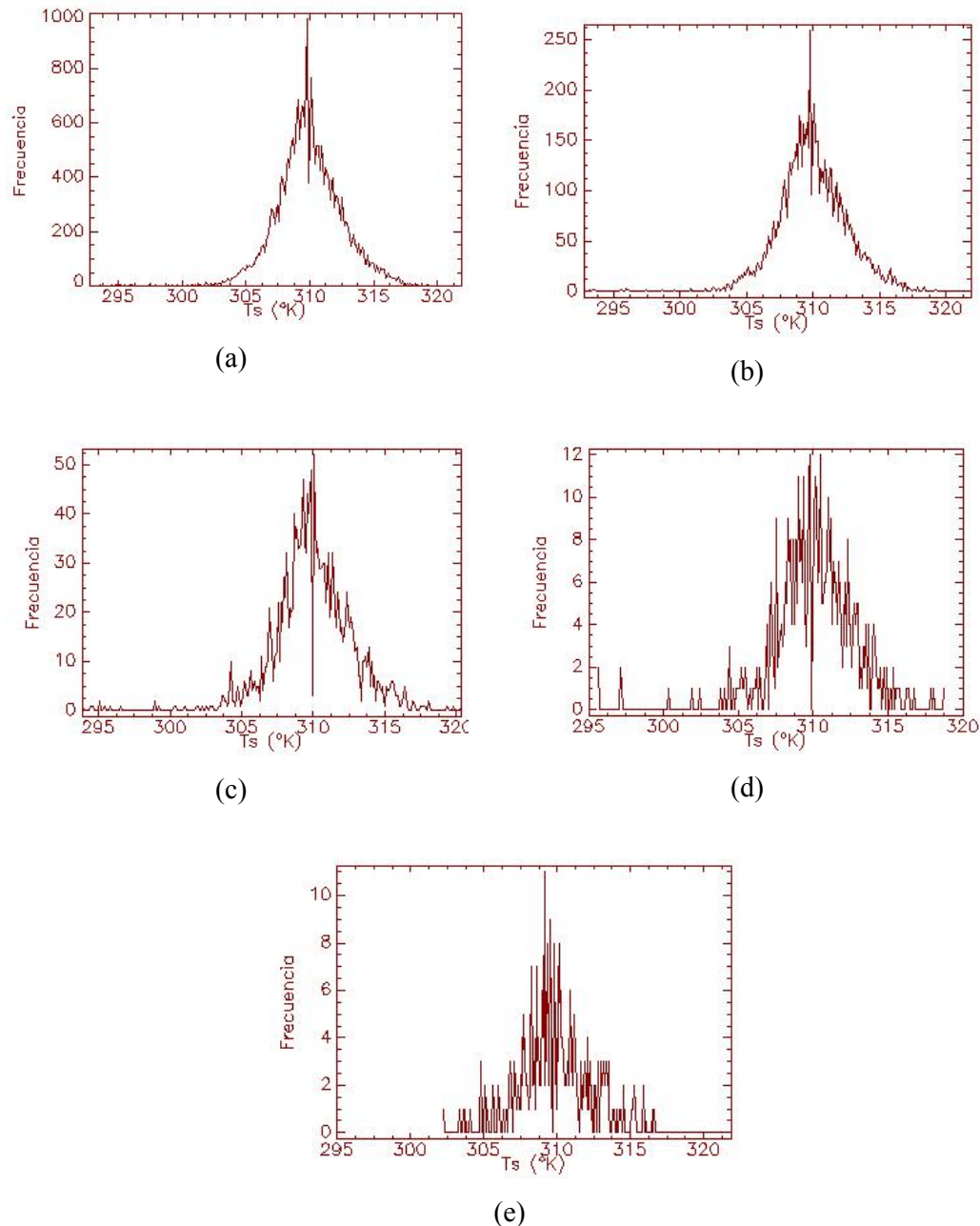


Figura N° 4.19: Histogramas de frecuencia de T_s – Día 268/2004 para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km.

Los resultados presentados en la Tabla N° 4.5 y la Figura N° 4.19 estarían indicando que, la característica espacial de T_s original no cambia significativamente en las imágenes agregadas

A fin de construir los espacios NDVI- T_s , todas las imágenes de T_s se trabajaron a resolución 1x1 km, por las razones explicadas en el apartado 2.2.3. La imagen de NDVI utilizada en la construcción de los espacios triangulares fue la obtenida a partir de las bandas 1 y 2 del producto MOD02 como se explicó oportunamente.

Las características del borde superior de los diferentes espacios triangulares están resumidas en la Tabla N° 4.6.

Tabla N° 4.6: Características de los espacios triangulares para diferentes resoluciones espaciales.			
Día 259 Año 2004			
Resolución	NDVImax	Pendiente	Tmax (K)
1 Km	0.68	-0.0518	310.83
2 Km	0.68	-0.0667	309.91
4 Km	0.68	-0.0603	311.26
8 Km	0.68	-0.0751	309.62
10 Km	0.68	-0.0608	311.06
Día 266 Año 2004			
Resolución	NDVImax	Pendiente	Tmax (K)
1 Km	0.66	-0.0699	312.16
2 Km	0.66	-0.0506	315.00
4 Km	0.66	-0.0573	313.88
8 Km	0.66	-0.0701	312.37
10 Km	0.66	-0.0633	313.05
Día 268 Año 2004			
Resolución	NDVImax	Pendiente	Tmax (K)
1 Km	0.66	-0.0383	324.58
2 Km	0.66	-0.0329	327.50
4 Km	0.66	-0.0364	325.29
8 Km	0.66	-0.0489	322.37
10 Km	0.66	-0.0470	321.85

Se observan diferencias en las pendientes de los límites superiores de los triángulos NDVI- T_s . Dichas diferencias ocasionan variaciones en las temperaturas máximas (para NDVI=0) entre los 2 K y los 4 K, coincidente con lo analizado para T_{31} .

4.3.1 Análisis del parámetro ϕ con T_{\min} constante

Se trazaron los espacios NDVI- T_s para las diferentes resoluciones. Los obtenidos para el día 268/2004 se muestra en la Figura N° 4.20 (Ver Apéndice 1 para los demás días analizados)

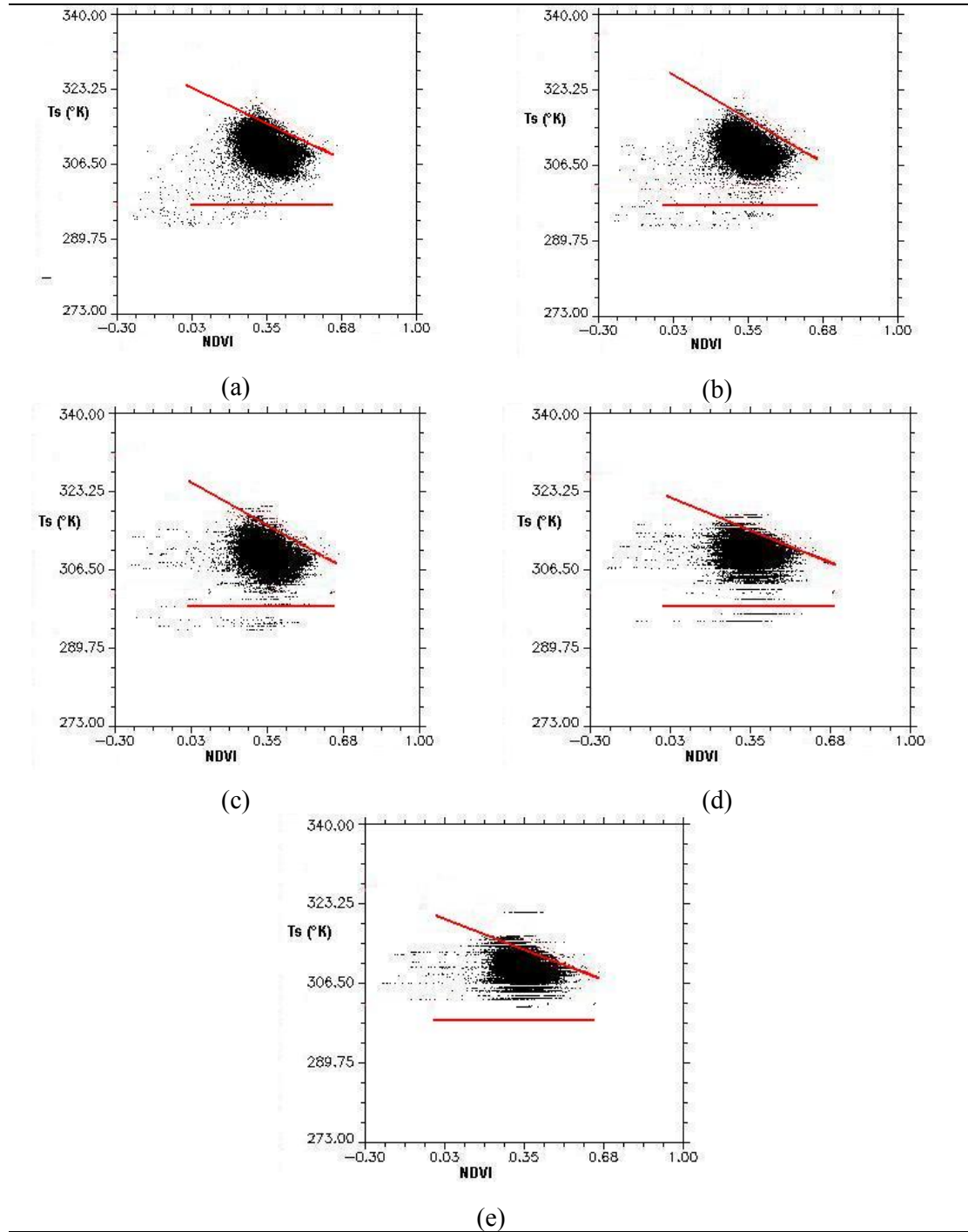
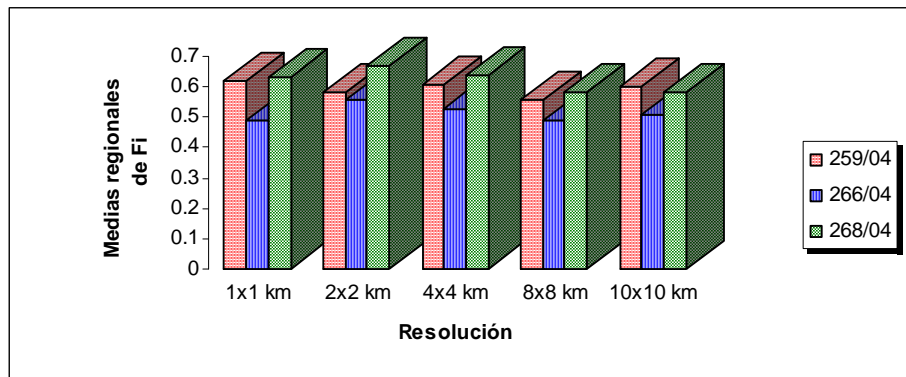


Figura N° 4.20: Diagramas triangulares NDVI- T_s obtenidos con T_{\min} constante – Día 268/2004 para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km.

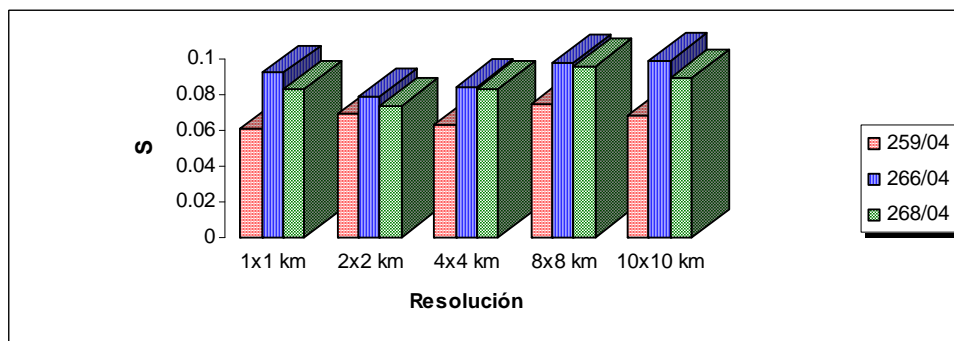
Las imágenes de ϕ se generaron a partir de las $T_{\text{máx}}$ (ver Tabla N° 4.6) y T_{min} constante calculado con el mismo criterio explicado en el apartado 4.2.1. Los valores medios y desvíos estándares de las imágenes de ϕ se resumen en la Tabla N° 4.7 y la Figura N° 4.21.

Tabla N° 4.7: Comparación de las medias y desvíos estándares (S) de los valores de ϕ para diferentes resoluciones para T_{min} constante

Día	1x1 km		2x2 km		4x4 km		8x8 km		10x10 km	
	Media	S	Media	S	Media	S	Media	S	Media	S
259/04	0.62	0.061	0.58	0.069	0.61	0.063	0.56	0.075	0.60	0.068
266/04	0.49	0.092	0.56	0.079	0.53	0.084	0.49	0.098	0.51	0.099
268/04	0.63	0.083	0.67	0.074	0.64	0.083	0.58	0.096	0.58	0.089



(a)



(b)

Figura N° 4.21: Representación gráfica de las medias y desvíos estándares (S) de los valores regionales de ϕ para diferentes resoluciones para T_{min} variable. (a) medias regionales y (b) desvíos estándares

Al igual que lo observado en el análisis con T_{31} , el desvío estándar es inferior al 20 % del valor medio de ϕ y no se identifica un patrón de variación de ϕ a medida que se cambia la resolución espacial de T_s .

Las diferencias encontradas en el valor medio regional de ϕ son inferiores a 0.09 (14 % del valor medio), compatible con lo observado para T_{31} .

En la Figura N° 4.22 se muestran los histogramas y en la Figura N° 4.23 las imágenes de ϕ obtenidas para los diferentes tamaños de píxeles. En la Figura N° 4.22 se observa que para todas las resoluciones estudiadas, las frecuencias máximas se registran para valores de ϕ del orden de los 0,65 y las mínimas frecuencias se observan para valores de ϕ menores a 0,4 y mayores a 0,8. Se puede observar que para resolución 10x10 km se evidencian picos de mayores frecuencias para valores de ϕ del orden de los 0,4 y 0,8, aunque no serían relevantes en el análisis regional. De la misma forma, para los demás días analizados, las máximas y mínimas frecuencias se registran para el mismo orden de valores de ϕ independientemente del tamaño del píxel (consultar Apéndice 1).

Los resultados indicarían que el método desarrollado por Jiang e Islam arrojaría resultados aceptables en términos de ϕ para el área en estudio, con imágenes de T_s agregadas, cuyos píxeles que varíen de 1x1 km a 10x10 km siempre que T_{\min} se calcule con la imagen de mejor resolución espacial.

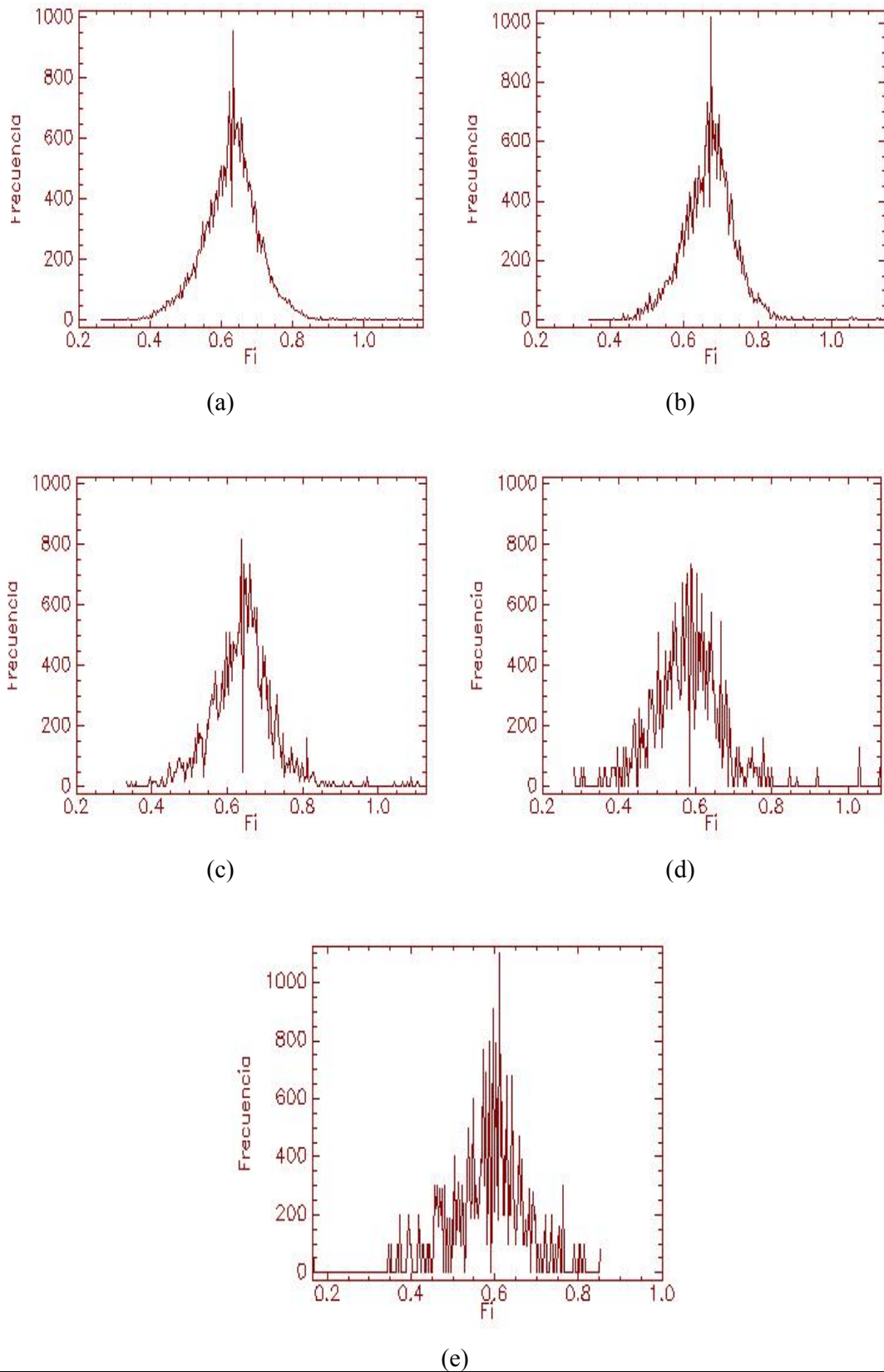


Figura N° 4.22: Histogramas de frecuencia de ϕ para T_{\min} constante – Día 268/2004 para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km.

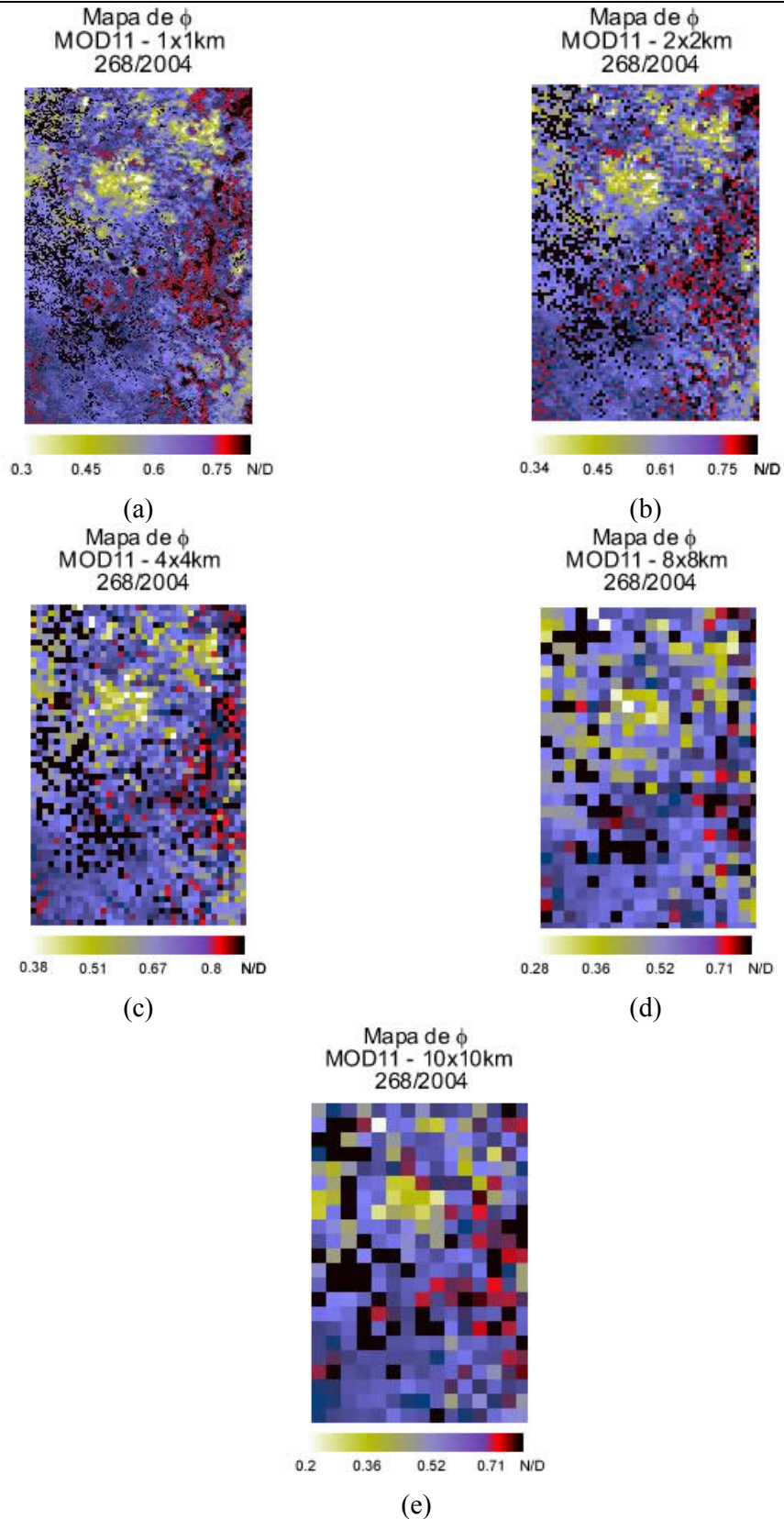


Figura N° 4.23: Imágenes de ϕ para T_{\min} constante – Día 268/2004 para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km.

4.3.2 Análisis del parámetro ϕ con T_{\min} variable

Nuevamente se trazaron los espacios NDVI- T_s para las diferentes resoluciones, pero en este caso T_{\min} se calculó para cada imagen agregada. En la Figura N° 4.24 se pueden observar los triángulos obtenidos para el día 268/04 y en el Apéndice 1 los espacios NDVI- T_s para los demás días analizados.

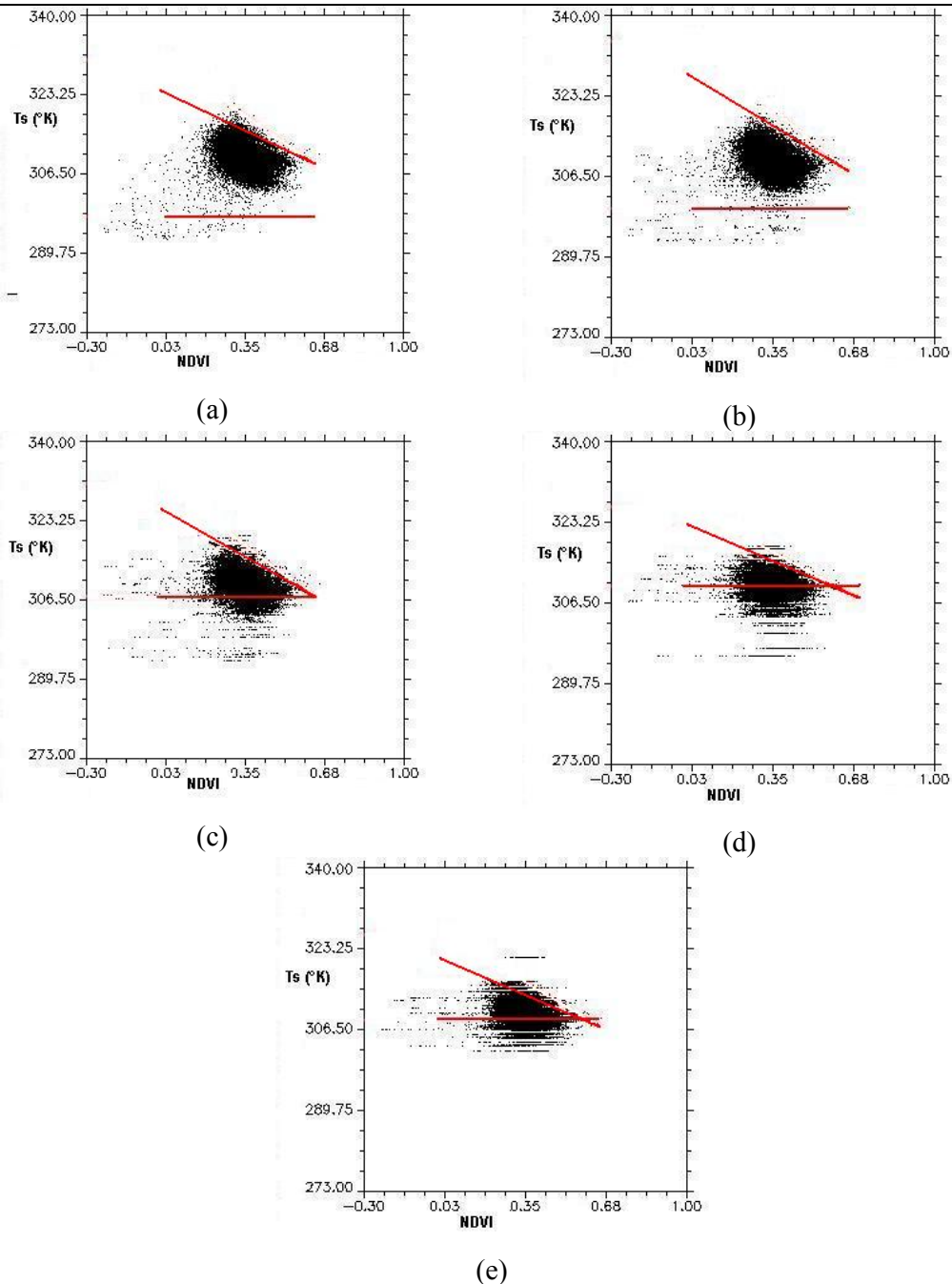


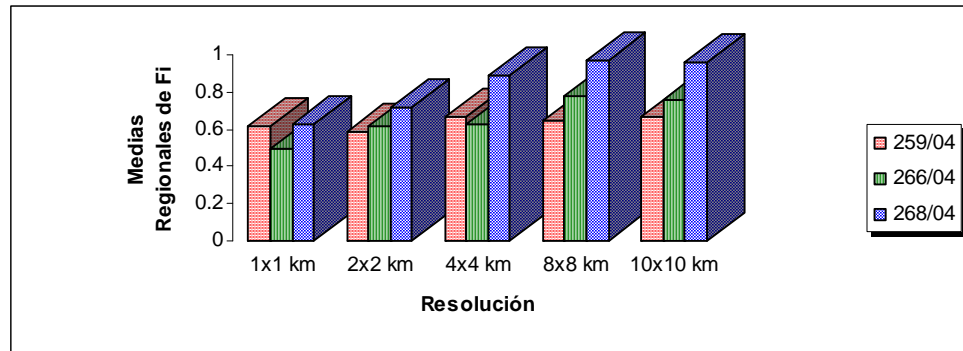
Figura N° 4.24: Diagramas triangulares NDVI- T_s para T_{\min} variable - Día 268/2004 para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km.

En la Figura N° 4.24 se observa que los triángulos se “aplastan” a medida que la resolución espacial disminuye. Esto se observó consistentemente en los otros días analizados (ver Apéndice 1). Las imágenes de ϕ se generaron a partir de estos triángulos.

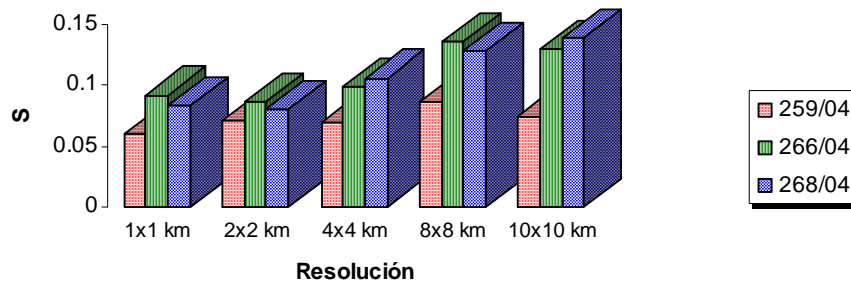
En la Tabla N° 4.8 y la Figura N° 4.25 se muestran los valores medios y desvíos estándares de ϕ .

Tabla N° 4.8: Comparación de las medias y desvíos estándares (S) de los valores de ϕ para diferentes resoluciones para T_{\min} variable

Día	1x1 km		2x2 km		4x4 km		8x8 km		10x10 km	
	Media	S	Media	S	Media	S	Media	S	Media	S
259/04	0.62	0.061	0.59	0.071	0.67	0.069	0.65	0.087	0.67	0.075
266/04	0.49	0.092	0.62	0.087	0.63	0.099	0.78	0.136	0.76	0.130
268/04	0.63	0.083	0.72	0.081	0.89	0.106	0.97	0.129	0.96	0.139



(a)



(b)

Figura N° 4.25: Representación gráfica de las medias y desvíos estándares (S) de los valores regionales de ϕ para diferentes resoluciones y T_{\min} variable: (a) medias regionales y (b) desvíos estándares

En general, el valor medio de ϕ para cada uno de los días, aumenta a medida que se aumenta el tamaño del píxel de T_s , debido a que se va perdiendo la definición de los valores extremos de T_s . Se observa que las diferencias en el valor medio estimado de ϕ oscilan entre 0,03 y 0,34 (5 a 54 % del valor medio), evidenciándose las mayores a partir de tamaños de píxeles superiores a los 4x4 km. La Figura N° 4.26 muestra los histogramas de ϕ a diferentes resoluciones espaciales para el día 268/2004 (consultar Apéndice 1 para los demás días analizados).

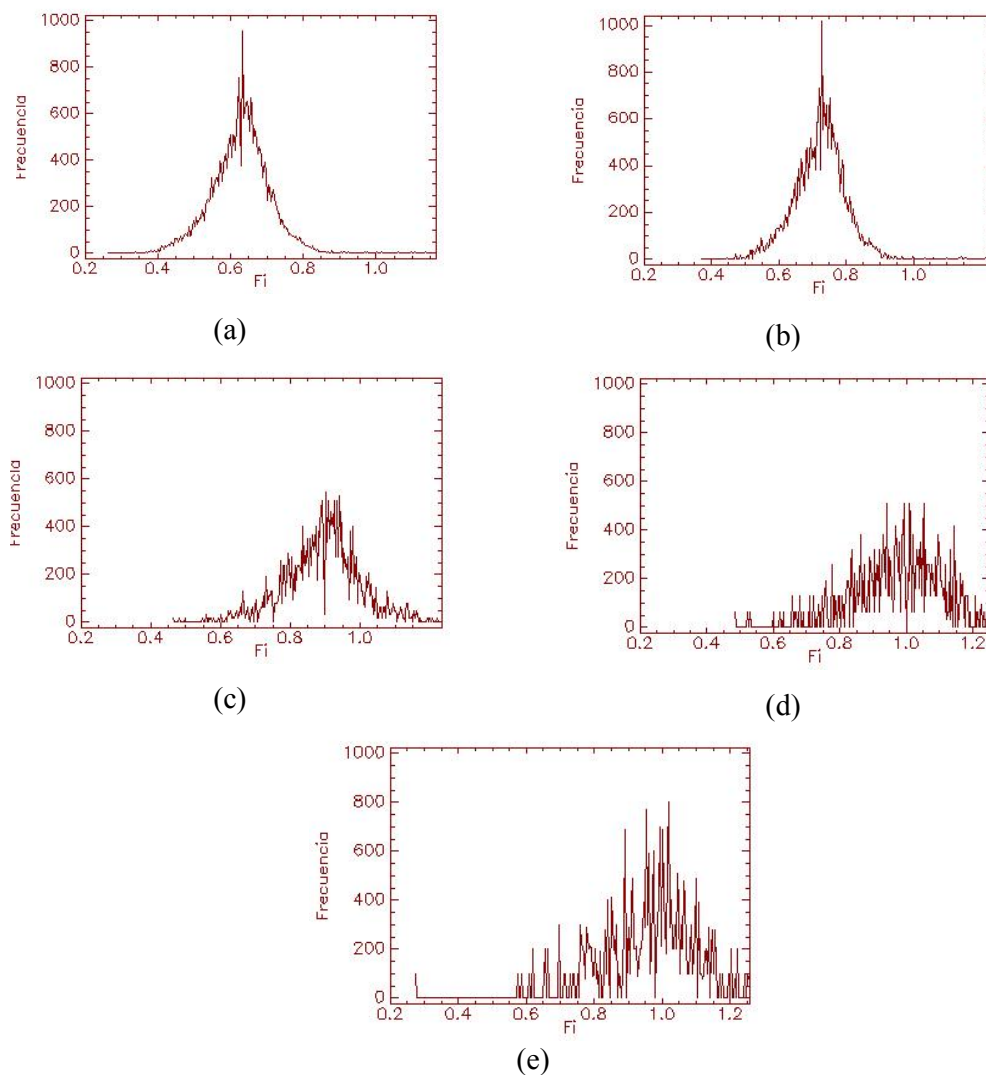


Figura N° 4.26: Histogramas de frecuencia de ϕ para T_{\min} variable – Día 268/2004 para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km

En la Figura N° 4.26 se observa que las máximas frecuencias se registran para valores de ϕ de 0,65 (resolución 1x1 km) hasta $\phi = 1.0$ (resolución 10x10 km) ; es decir se evidencia un aumento del parámetro ϕ a medida que se disminuye la resolución espacial. Esta conclusión es consistente para todos los días analizados (ver Apéndice 1). La Figura N° 4.27 permite observar las imágenes de ϕ obtenidas para los diferentes tamaños de píxeles.

Los resultados obtenidos indicarían que el método desarrollado por Jiang e Islam arrojaría resultados de ϕ aceptables con imágenes cuya resoluciones espaciales varíen entre 1x1 km y 4x4 km. Para resoluciones espaciales superiores a los 4x4 km los resultados del método diferirían de los obtenidos con las imágenes a resolución original, por lo que se debe tener precaución al analizar los resultados en estos casos.

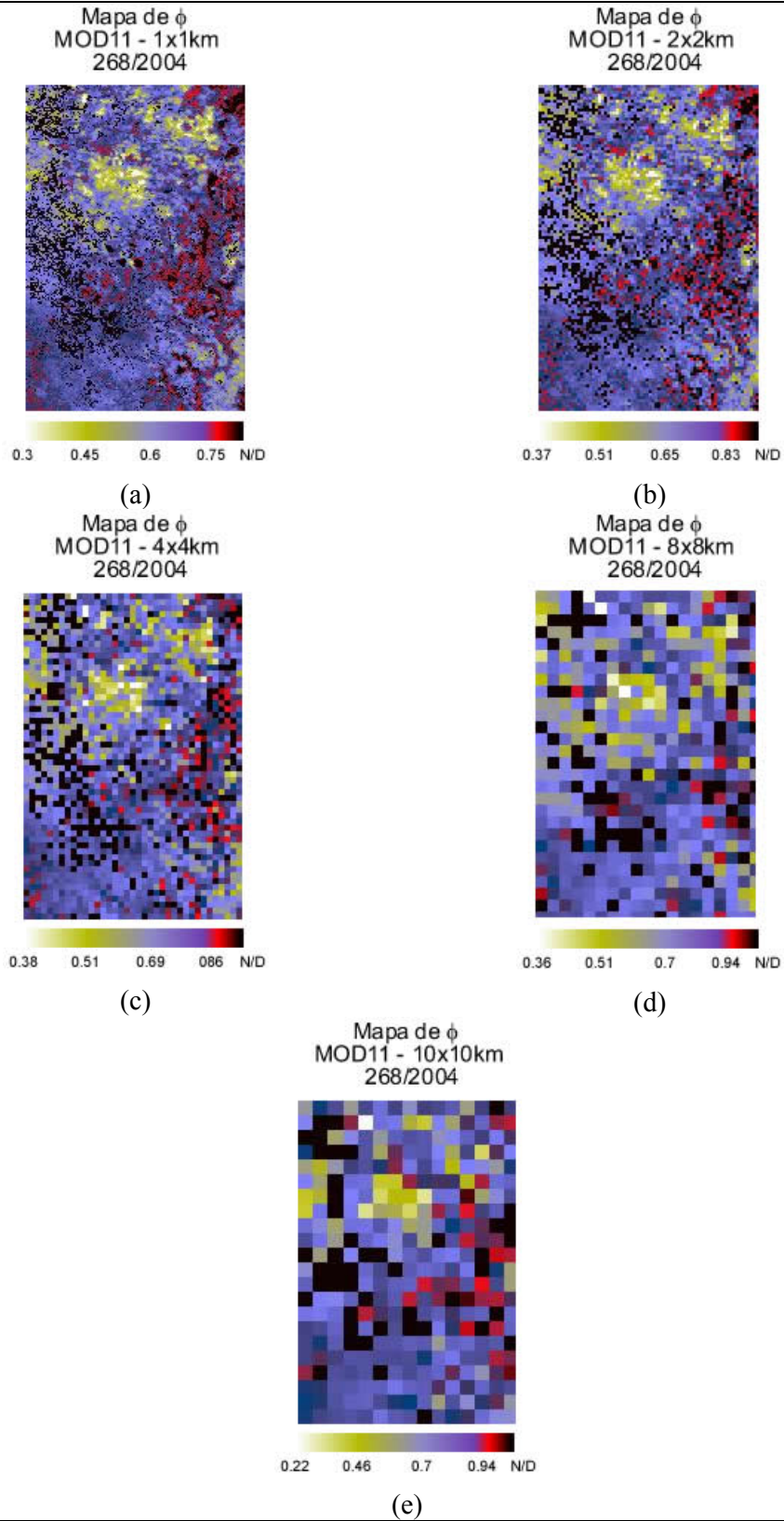


Figura N° 4.27: Imágenes de ϕ para T_{\min} variable – Día 268/2004 para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km

Finalmente, la Tabla N° 4.9 y Tabla N° 4.10 presentan un resumen de los valores del parámetro ϕ obtenidos para T_{31} y T_s usando T_{\min} constante y T_{\min} variable

Tabla N° 4.9: Comparación de las medias regionales del parámetro ϕ obtenido para T_{31} y T_s usando T_{\min} constante.

Día	1x1 km		2x2 km		4x4 km		8x8 km		10x10 km	
	T_{31}	T_s	T_{31}	T_s	T_{31}	T_s	T_{31}	T_s	T_{31}	T_s
259/04	0.65	0.62	0.70	0.58	0.61	0.61	0.66	0.56	0.69	0.60
261/04	0.62		0.63		0.65		0.68		0.59	
266/04		0.49		0.56		0.53		0.49		0.51
268/04	0.93	0.63	0.92	0.67	0.92	0.64	0.92	0.58	0.92	0.58
05/05	0.83		0.84		0.84		0.87		0.87	
07/05	0.79		0.81		0.81		0.82		0.78	

Tabla N° 4.10: Comparación de las medias regionales del parámetro ϕ obtenido para T_{31} y T_s usando T_{\min} variable.

Día	1x1 km		2x2 km		4x4 km		8x8 km		10x10 km	
	T_{31}	T_s	T_{31}	T_s	T_{31}	T_s	T_{31}	T_s	T_{31}	T_s
259/04	0.65	0.62	0.81	0.59	0.84	0.67	0.91	0.65	0.95	0.67
261/04	0.62		0.65		0.84		1.02		0.94	
266/04		0.49		0.62		0.63		0.78		0.76
268/04	0.93	0.63	0.92	0.72	0.94	0.89	1.02	0.97	0.94	0.96
05/05	0.83		0.84		0.94		1.02		0.88	
07/05	0.79		0.86		0.87		0.84		0.83	

En general, se observa que el método desarrollado por Jiang e Islam sería sensible al parámetro T_{\min} variable a partir de resoluciones mayores a los 4x4 km, siendo la metodología más robusta si se utiliza T_{\min} constante.

Es de notar que la máximas diferencias entre los valores de ϕ obtenidos con T_{31} y T_s es del orden de 0.3 (aproximadamente 48% del valor medio). Esta diferencia se observa en el día 268/2004 que presenta diagramas triangulares sustancialmente diferentes.

Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones

El monitoreo de actividades agrícolas, el manejo del recurso hídrico y forestal requieren la estimación de la ET a diferentes resoluciones espaciales y temporales. Hoy en día, la teleobservación ofrece una cobertura de datos en el tiempo y en el espacio fundamental para el monitoreo de variables ambientales y ecosistemas en general, difíciles de obtener por otros métodos. En las últimas dos décadas se han desarrollado varios modelos que utilizan datos teleobservados para estimar el balance de energía y la ET; ejemplos son los desarrollados por Jackson et al. (1977), Noilhan y Planton (1989), Norman et al. (1995), Jiang e Islam (2001), Nishida et al. (2003), Rivas y Caselles (2004), Venturini et al. (2008).

En particular la metodología propuesta por Jiang e Islam (2001) permite la estimación directa de FE espacialmente distribuida, basándose en una interpretación contextual de una relación entre dos variables teleobservadas: la T_s y el NDVI. La temperatura es la más dinámica de las variables que conforman el triángulo resultante. Es por esto que también es la más limitante. El problema que se presenta con las imágenes de T_s de los sensores ópticos es que son muy afectados por las condiciones climáticas. Una posible solución para este problema son los MP que registran información diariamente y operan con longitudes de ondas más largas, que no son afectadas por las condiciones climáticas ni por la fuente de iluminación. En la actualidad se cuenta con metodologías para estimar T_s con este tipo de sensores (*Basi et al., 1998; Fly et al., 2003*).

En este trabajo de tesis se analizó la influencia del tamaño del píxel en la determinación de la T_s , para luego investigar las variaciones del espacio contextual NDVI- T_s a resoluciones espaciales características de los sensores infrarrojos y MP, adoptando como área de estudio la cuenca inferior del Río Salado, Santa Fe, Argentina.

El análisis se realizó sobre seis imágenes, tres de ellas correspondientes al mes de septiembre de 2004 y tres correspondientes a enero de 2005. Se compararon

estadísticamente las imágenes de temperatura de superficie obtenidas mediante un método monocanal aplicado a la banda 31 del sensor MODIS y el producto MOD11 que se obtiene con un método split-windows, encontrándose que la diferencia entre el valor medio regional calculado de T_{31} y T_s es del orden de los 2 K, compatible con lo publicado por otros autores (*Venturini et al., 2004*). En el contraste píxel a píxel de los valores de T_{31} y T_s se observaron diferencias inferiores a los 7 K, lo que estaría indicando que las correcciones atmosféricas sobre T_{31} pueden no ser significativas en lo que hace a la metodología analizada, según lo publicado por otros autores (*Venturini et al., 2004; Batra et al., 2006*).

Se compararon visual y estadísticamente las imágenes de T_{31} y de T_s para diferentes resoluciones espaciales, observándose que no existe pérdida sustancial de la información térmica de la región al ir disminuyendo la resolución espacial. La característica espacial de T_{31} y T_s original no cambia notablemente por lo que una imagen de temperatura a 1x1 km, 2x2 km, 4x4 km, 8x8 km o 10x10 km, podría representar la temperatura de superficie de la zona bajo estudio.

Las características del diagrama triangular, más específicamente el borde superior (representado por T_{\max} de Jiang e Islam) y el borde inferior (representado por T_{\min}) fueron analizadas para T_{31} y T_s . Las temperaturas máximas del método de Jiang e Islam, correspondientes a la intersección del borde superior del triángulo con el eje de temperaturas, presentan diferencias de entre 2 y 6 K. En general, estos resultados indicarían que imágenes de T_{31} y T_s con píxeles más grandes de 1x1 km no influirían en el borde superior del triángulo, cuyas diferencias son compatibles con los errores comunes en el cálculo de T_{31} y T_s .

Se obtuvieron los valores del parámetro ϕ con dos procedimientos diferentes. El primero considerando T_{\min} constante, calculado a partir de la imagen original con resolución 1x1 km. El segundo, en el que se repitió el cálculo para T_{\min} estimado a partir de cada una de las imágenes agregadas. Se destaca que en algunos casos la distribución de los

píxeles estaría contenida en un triángulo con un borde inferior lineal no horizontal, sin embargo el mismo se tomó horizontal tal como lo proponen los autores del método. En estos casos se observaron las mayores deformaciones de los triángulos obtenidos, y por consiguiente las mayores diferencias en las imágenes ϕ para las distintas resoluciones analizadas.

En el análisis realizado para ϕ con el método monocanal (T_{31}) y T_{\min} constante las diferencias encontradas en el valor medio regional de ϕ oscilan entre 0.01 y 0.06 (1 a 10 % del valor medio), evidenciándose las mayores diferencias a partir de tamaños de píxeles superiores a los 4x4 km. Estos resultados mostrarían que el método desarrollado por Jiang e Islam estaría arrojando resultados aceptables en términos de ϕ para el área en estudio, con imágenes cuyas resoluciones espaciales son compatibles con las obtenidas con MP. Al calcular ϕ con T_{\min} variable, se observa que el valor medio regional aumenta a medida que disminuye la resolución espacial de T_{31} . Las diferencias encontradas en los valores medios de ϕ oscilan entre 0.01 y 0.40 (1 a 60 % respecto a la imagen a resolución 1x1 km), notándose las mayores diferencias a partir de la resolución de 4x4 km. Estos resultados revelarían que el método desarrollado por Jiang e Islam arrojaría resultados cuestionables en términos de ϕ para el área en estudio con imágenes a resoluciones espaciales superiores a los 4x4 km, aunque el análisis de las imágenes agregadas de T_{31} no parecen ser significativamente afectadas por la resolución espacial.

El estudio de ϕ se repitió con el producto MOD11 de MODIS. Así se construyeron los triángulos con T_s y se calculó ϕ con T_{\min} constante. Las diferencias en el valor medio de ϕ son inferiores a 0.09 (14 % del valor medio), compatible con lo observado por otros autores (*Batra et al., 2006; Venturini et al., 2004*). Los resultados indicarían que el método analizado daría resultados aceptables en términos de ϕ , para el área en estudio, con todas las imágenes de T_s analizadas. Al estimar ϕ con T_{\min} variable, las diferencias encontradas

en el valor medio de ϕ oscilan entre 0.03 y 0.34 (5 a 54 % del valor medio), evidenciándose las mayores a partir de tamaños de píxeles superiores a los 4x4 km. Esto sugiere que el método calcularía valores similares de ϕ con imágenes cuya resoluciones espaciales varíen entre 1x1 km y 4x4 km. Para resoluciones espaciales superiores los resultados del método podrían diferir sensiblemente de los obtenidos con las imágenes a resolución original.

En general, el análisis presentado en esta tesis sugiere que el modelo desarrollado por Jiang e Islam es aplicable con imágenes de MP siempre que se adopte el borde inferior del triángulo como constante e igual a la temperatura media del agua para una resolución de 1x1 km. Si no es posible calcular T_{\min} con imágenes cuya resolución es 1x1 km por no estar disponible o por que la contaminación con nubes lo impide, los MP solucionarían el problema parcialmente. Para resoluciones mayores a los 4x4 km, los resultados sólo podrían considerarse como aproximaciones y deben ser cuidadosamente analizados.

Se compararon los valores del parámetro ϕ obtenidos con T_{31} y T_s encontrándose diferencias máximas en el valor medio regional de ϕ de 0.30.

Cabe aclarar que esta tesis se limitó al análisis del parámetro ϕ propuesto por Jiang e Islam y no se obtuvieron valores de ET. Sin embargo se dispone por primera vez de un análisis de las características regionales de la T_s y de la aplicabilidad de una metodología moderna y sencilla que permitirá estimar variables fundamentales del balance hídrico en la Cuenca del Río Salado-Santa Fe. Queda como trabajo para el futuro el cálculo de ET y la validación de dicha variable, tarea que no es posible realizar en el presente por la falta de información de campo necesaria. Se espera en un futuro contar con el equipamiento necesario para realizar mediciones *in situ* del balance de energía.

Bibliografía

Ashcroft, P. and Wenzel, F. J., 2000. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) – AMSR Level 2A Algorithm. EOS Project. Goddard Space Flight Center National Aeronautics and Space Administration. Greenbelt, Maryland.

Basit, A., Grody, N.C., Peterson, T. C. y Williams C. N., 1998. Using the special sensor Microwave/Imager to monitor land surface temperature, wetness and snow cover. *Journal of Applied Meteorology*, 37, 888-911.

Batra, N., Islam, S., Venturini, V., Bisht, G. y Jiang, L., 2006. Estimation and Comparison of Evapotranspiration from Multiple Satellites for Clear Sky Days. *Remote Sensing of Environment*, 103, 1-15.

Becker, F. y Li, Z. L., 1990. Towards a local split window method over land surfaces, *International Journal of Remote Sensing*, 11(3), 369-393.

Berk, A., Bernstein, L.S., Anderson, G.P., Acharya, P.K., Robertson, D.C., Chetwynd, J.H. y Adler-Golden, S. M., 1998. MODTRAN cloud and multiple scattering upgrades with application to AVIRIS, *Remote Sensing of Environment*, 65 (3): 367-375

Bisht, G., Venturini, V., Islam, S. y Jiang, L., 2005. Estimation of the Net Radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Terra Data for clear sky days. *Remote Sensing of Environment*, 97, 52-67.

Brutsaert, W., 2005. *Hydrology. An Introduction*. Cambridge University Press, New York, USA, 605 pages. ISBN 0521824796.

Campbell, J. B., 2002. *Introduction to Remote Sensing*. The Guilford Press, 3rd edition. New York, USA, 621 pages. ISBN 1572306408.

Courault, D., Seguin, B. y Olioso, A., 2005. Review to estimate Evapotranspiration from remote sensing data: Some examples from the simplified relationship to the use of mesoscale atmospheric models. *Irrigation and Drainage Systems*, 19, 223-249.

Crosson, W., Laymon, C. A., Inguva, R. y Schamschula, M. P., 2002. Assimilating remote sensing data in a surface flux–soil moisture model. *Hydrological Processes*, 16, 1645-1662.

Dash, P., Gottsche, F. M., Olesen, F. S. y Fischer, H., 2002. Land Surface Temperature and emissivity estimation from passive sensor data: theory and practice-current trends. *International Journal of Remote Sensing* 23(13), 2563-2594.

FICH-INA-INTA, 2007. Influencia de los cambios físicos y climáticos en el régimen de escurrimiento del Río Salado-tramo inferior, Informe final elevado al Ministerio de Asuntos Hídricos, Gobierno de la Prov. Sfe.

Fly, M., Royer, A., Goïta, K. y Pringet, C., 2003. A simple retrieval method for land surface temperature and fraction of water surface determination from satellite microwave brightness temperatures in sub-arctic areas. *Remote Sensing of Environment*, 83, 195-213.

French, A.N., Jacob, F., Anderson, M.C., Kustas, W.P., Timmermans, W., Gieskee, A., Su, Z., Su, H., McCabe, M.F., Li, F., Prueger, J. y Brunsell, M.F., 2005. Surface energy fluxes with the Advanced Spaceborne Thermal. Emission and Reflection radiometer (ASTER) at the Iowa 2002 SMACEX site (USA) *Remote Sensing of Environment* 99 55 – 65

Gage, K. S. y Green, J. L., 1982. A Technique for determining the temperature profile from VHF Radar observations. *Journal of Applied Meteorology*, 21, 1146-1149.

Gillies, R.R., Carlson, T.N., Cui, J., Kustas, W.P. y Humes, K.S., 1997. A verification of the 'triangle' method for obtaining surface fluxes from remote measurements of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface radiant temperature. *International Journal of Remote Sensing*, 18(15), 3145-3166.

Institute for Computational Herat System Science, 1999. University of California, Santa Barbara.

Islam, S., Jiang, L. y Eltahir, E., 2002. Satellite based evapotranspiration estimates. Final project report, South Florida Water Management District, September 2002, pp. 74.

ITT Industries-Solution for data visualization and images analysis. ENVI version 4.2. August 2005. Boulder, Colorado-USA.

Jackson, R.D., Reginato, R.J., y Idso, S.B., 1977. Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements. *Water Resources Research*, 13, 651-656.

Jiang, L. e Islam, S., 1999. A methodology for estimation of surface evapotranspiration over large areas using remote sensing observations. *Geophysical Research Letters*, 26(17), 2773-2776.

Jiang, L. e Islam, S., 2001. Estimation of surface evaporation map over southern GreatPlains using remote sensing data. *Water Resources Research*, 37(2), 329-340.

Jiang, L., Islam, S. y Carlson, T. N., 2004. Uncertainties in latent heat flux measurement and estimation: Implications for using a simplified approach with remote sensing data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 30(5), 769-787.

Jiang, L., Islam, S., Bisht G., Venturini, V., Carlson, T., Guo, W. y Tarpley, D., 2005. Potential of Satellite-Based Models for Land Surface Evapotranspiration Estimation. Presentación aceptada para ser presentado en American Geophysical Union-2005 Joint Assembly. New Orleans, USA. 23-27 de Mayo de 2005.

Kneizys, F.X., E.P. Shettle, W.O. Gallery, J.H. Chetwynd, L.W., Abreu, J.E.A. Selby, S.A. Clough y R.W. Fenn, 1983. Atmospheric transmittance/radiance: computer code LOWTRAN 6, Air Force Geophysics Laboratroy, Report AFGL-TR-83-0187, Hanscom AFB, MA.

Kustas, W. P., Norman, J.M., Anderson, M.C. y French, A.N., 2003. Estimating subpixel surface temperatures and energy fluxes from the vegetation index-radiometric temperature relationship. *Remote Sensing of Environment* 85 (2003) 429-440.

- Monteith, J.L. y Unsworth, M., 1990. Principles of Environmental Physics. Butterworth-Heinemann, 2nd edition. Burlington-MA, 304 pages. ISBN: 071312931X .
- Nishida, K., Nemani, R. R., Running, S. W. y Glassy, J.M., 2003. An operational remote sensing algorithm of land evaporation. *Journal of Geophysical Research*, 108(D9), 4270.
- Noilhan, J. y Planton, S., 1989. GCM gridscale evaporation from mesoscale modelling. *Journal of Climate*, 8, 206-223
- Norman, J. M., Kustas, W. P. y Humes, K.S., 1995. Sources approach for Estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural Forest and Meteorology*, 77, 263-293.
- Priestley, C. H. B. y Taylor, R. J., 1972. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. *Monthly Weather Review*. 100, 81-92.
- Rees, W. G., 2001. Physical Principales of Remote Sensing. Cambridge University Press, 2nd edition. Cambridge, UK, 343 pages. ISBN 0521669480.
- Rivas, R. y Caselles, V. 2004. A simplified equation to estimate spatial reference evaporation from remote sensing-based surface temperature and local meteorological data. *Remote Sensing of Environment*, 83, 68-76.
- Rothman L.S., Jacquemart D., Barbe A., Benner D.C., Birk M., Brown L.R., Carleer M.R., Chackerian C., Chance K., Coudert L.H., Dana V., Devi V.M., Flaud J.M., Gamache R.R., Goldman A., Hartmann J.M., Jucks K.W., Maki A.G., Mandin J.Y., Massie S.T., Orphal J., Perrin A., Rinsland C.P., Smith M.A.H., Tennyson J., Tolchenov R.N., Toth R.A., Vander Auwera J., Varanasi P. Y Wagner G., 2005. The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database Source: *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 96 (2): 139-204.
- Schmugge T., 1978. Remote sensing of Soil Moisture. *Journal of Applied Meteorology*, 17, 1550-1557.
- Snyder y Wan, 1998. Classification-based emissivity for land surface temperature measurement from space. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 2753-2774.
- Stisen Simon, Inge Sandholt, Anette Norgaard, Rasmus Fensholt, Karsten Høgh Jensen, 2007. Combining the triangle method with thermal inertia to estimate regional evapotranspiration — Applied to MSG-SEVIRI data in the Senegal River basin. Department of Geography and Geology, University of Copenhagen, Oster Voldgade 10, DK-1350
- Venturini, V., Bisht, G., Islam, S. y Jiang L., 2004. Comparison of evaporative fractions estimated from AVHRR and MODIS sensors over South Florida. *Remote Sensing of Environment* 93 (2004) 77-86.
- Venturini et al., 2008. Estimation of evaporative Fraction and Evapotranspiration from MODIS products using a complementary based model. *Remote Sensing of Environment*, 112 (2008) 132-141.

Wan, Z., y Dozier, J., 1996. A Generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(4), 892-905.

Wan, Z., 1999. MODIS Land-Surface Temperature Algorithm Basis Document (LST ATBD): version 3.3. www.ices.ucsb.edu/modis/atbd-mod-11.pdf

Williams Claude N., Basist A., Peterson T. C. y Grody N., 2000. Calibration and Verification of Land Surface Temperature Anomalies Derived from the SSM/I. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(9), 2141-2156.

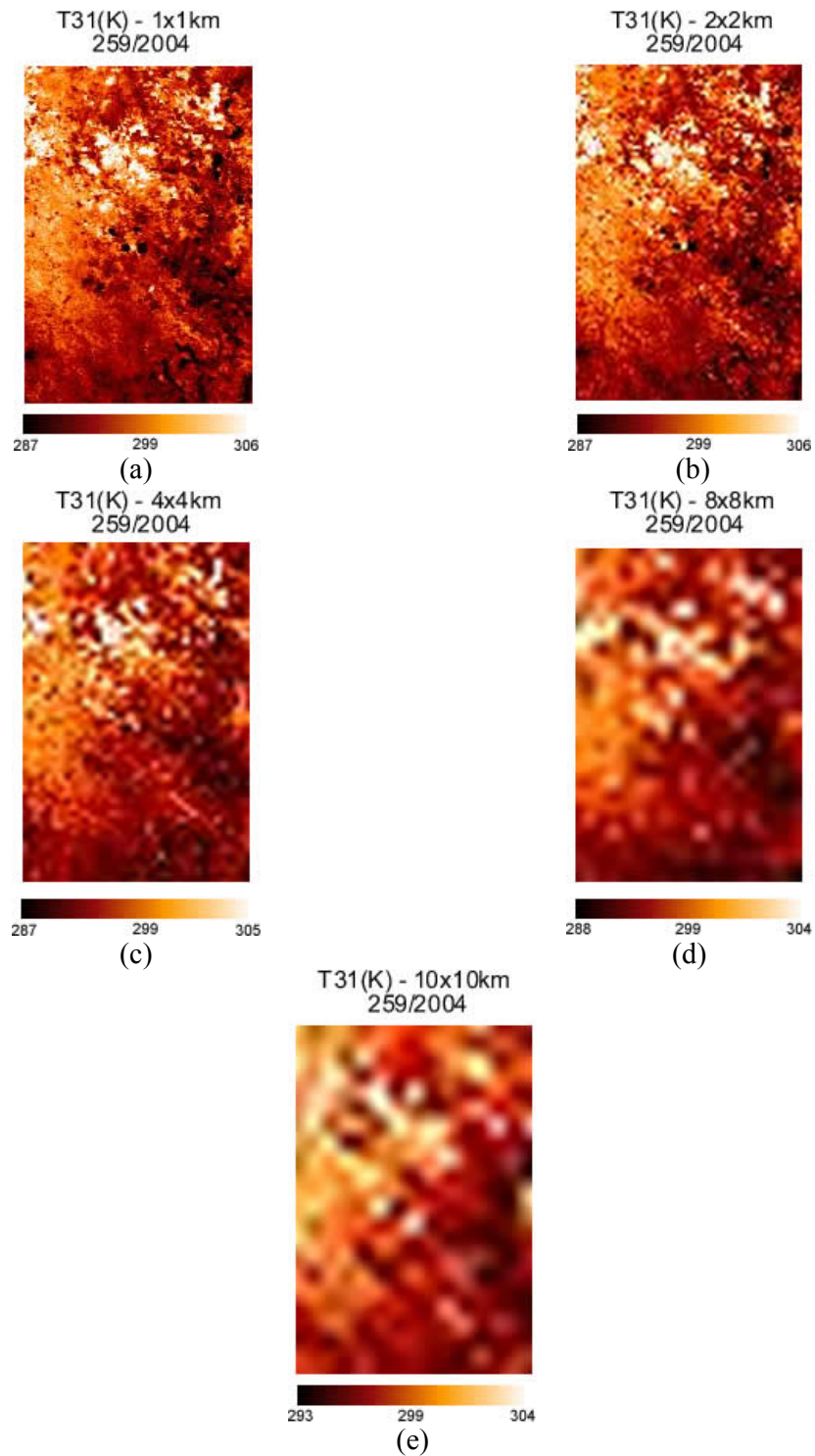
Apéndice 1

Se presentan aquí los resultados obtenidos para todos los días analizados a excepción del día 268/2004 que fue presentado en el Capítulo 4.

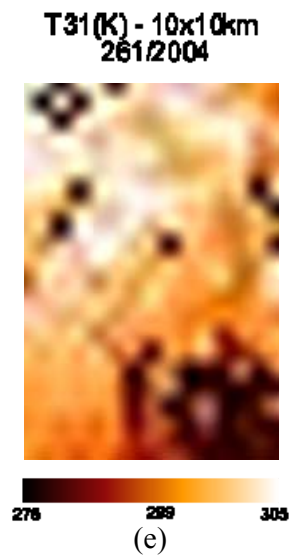
Continuación Figura N° 4.5: Imagen de NDVI (1x1 km) – (a) Día 259/2004, (b) Día 261/2004, (c) Día 266/2004, (d) Día 04/2005, (e) Día 05/2005, (f) Día 07/2005



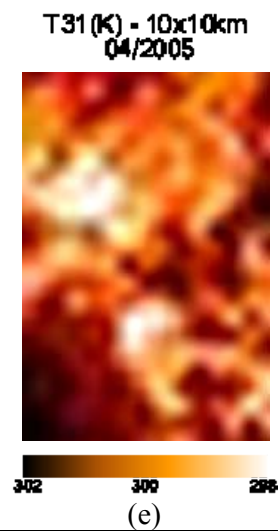
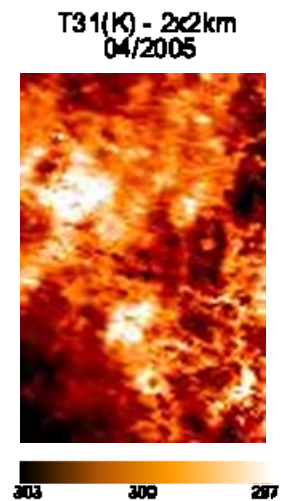
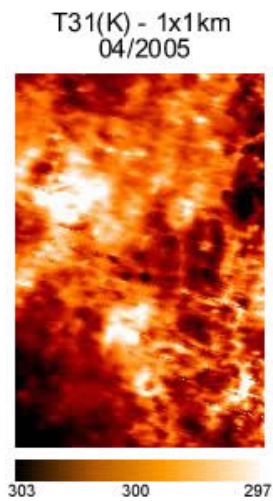
Continuación Figura N° 4.6: Imágenes de T_{31} obtenidas con el producto MOD02 para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km



Día 259/2004

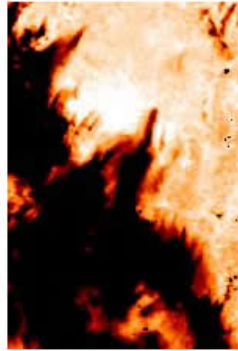


Dia 261/2004



Día 04/2005

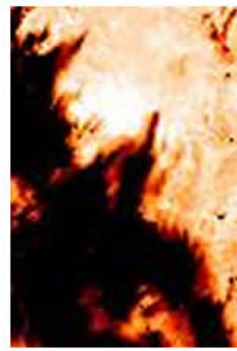
T31(K) - 1x1km
05/2005



270 300 315

(a)

T31(K) - 2x2km
05/2005



270 300 315

(b)

T31(K) - 4x4km
05/2005



270 300 315

(c)

T31(K) - 8x8km
05/2005



270 300 315

(d)

T31(K) - 10x10km
05/2005

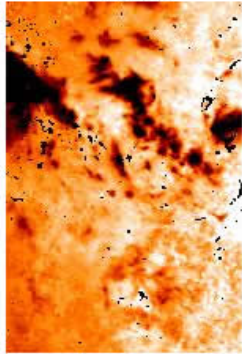


270 295 312

(e)

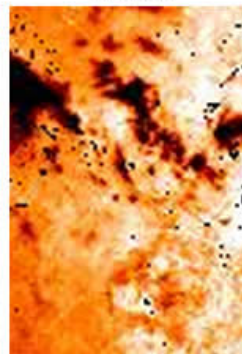
Día 05/2005

T31(K) - 1x1km
07/2005



270 301 315
(a)

T31(K) - 2x2km
07/2005



270 301 315
(b)

T31(K) - 4x4km
07/2005



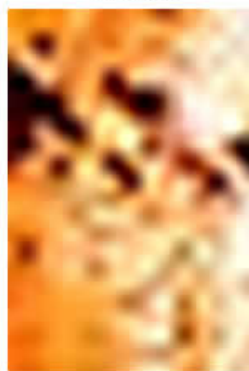
270 301 314
(c)

T31(K) - 8x8km
07/2005



270 301 313
(d)

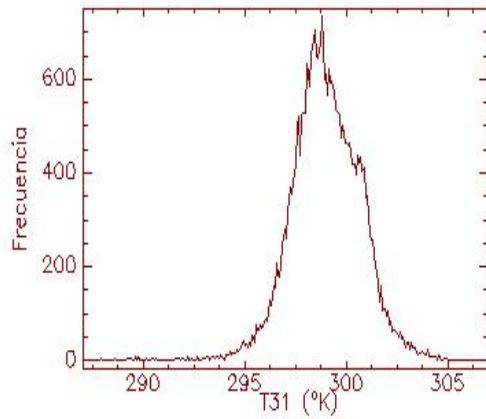
T31(K) - 10x10km
07/2005



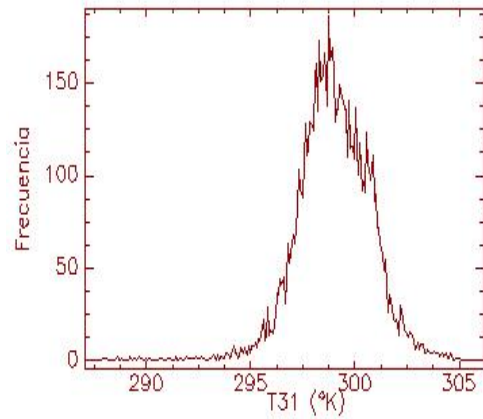
270 301 313
(e)

Día 07/2005

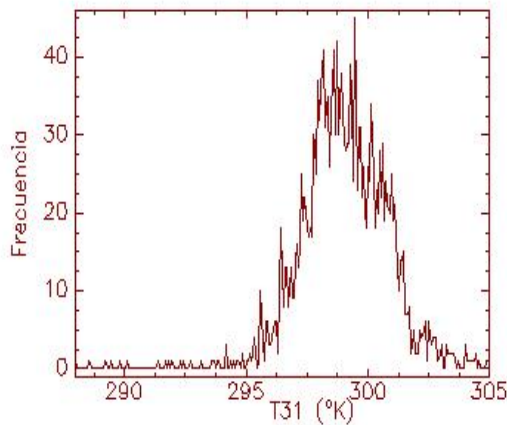
Continuación Figura N° 4.8: Histogramas de frecuencia de T_{31} para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 4x4 km (e) 10x10 km



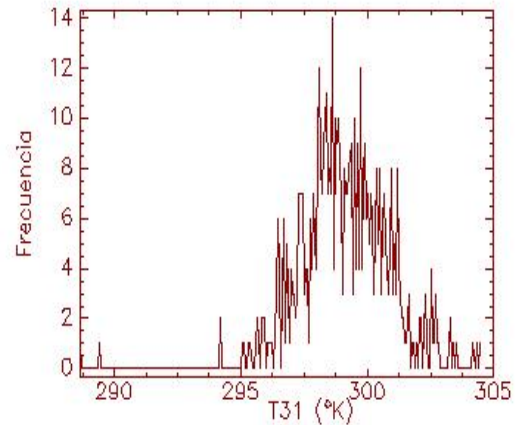
(a)



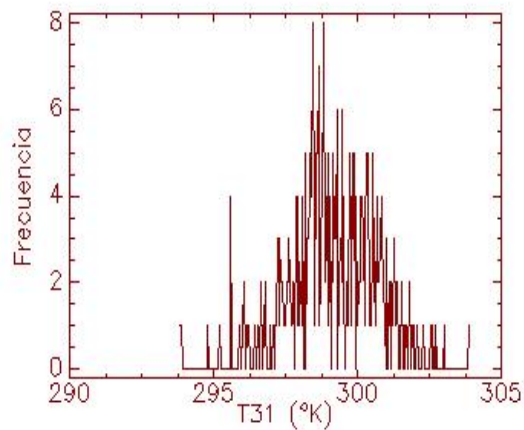
(b)



(c)

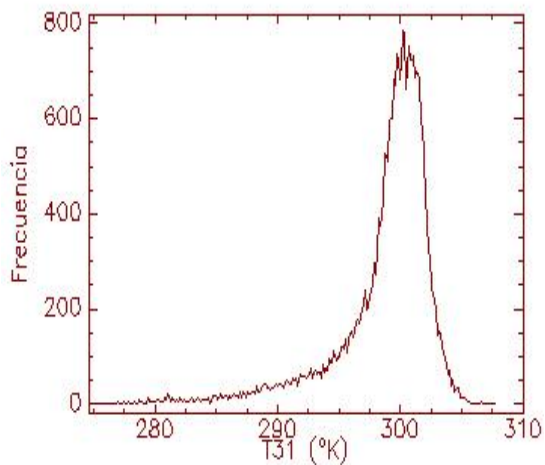


(d)

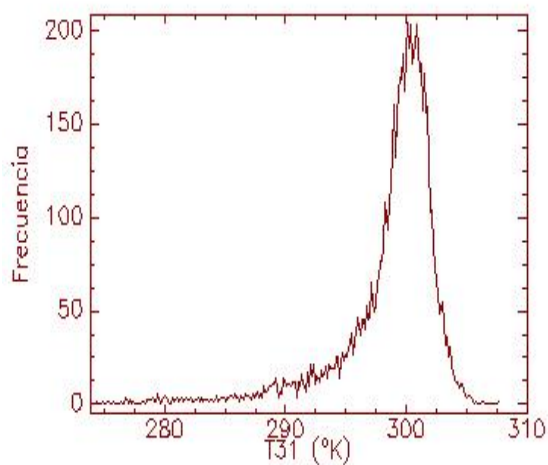


(e)

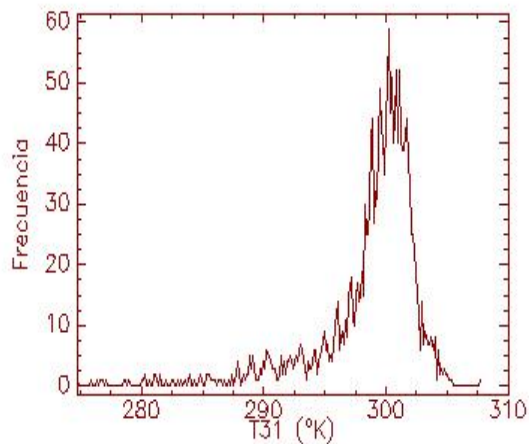
Día 259/2004



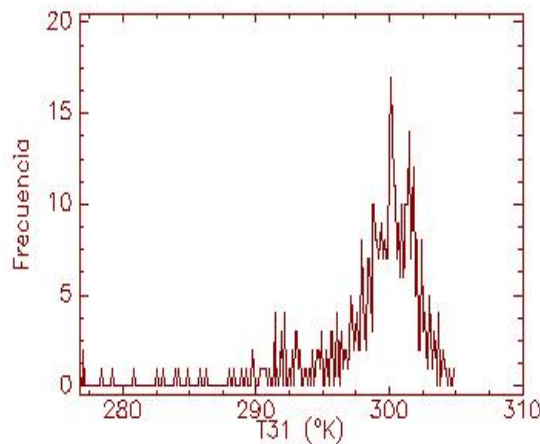
(a)



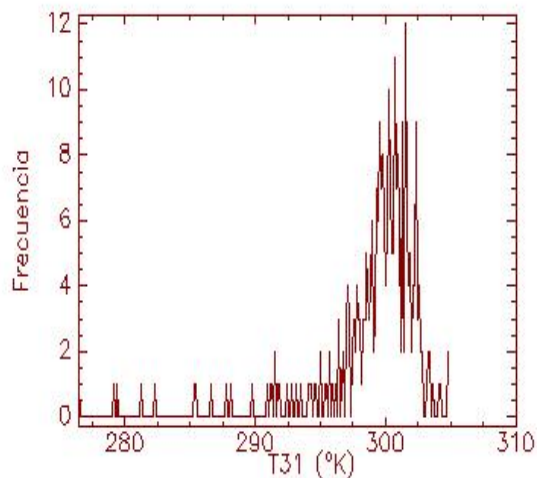
(b)



(c)

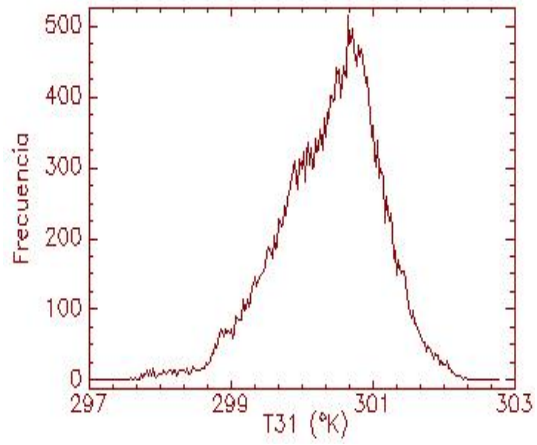


(d)

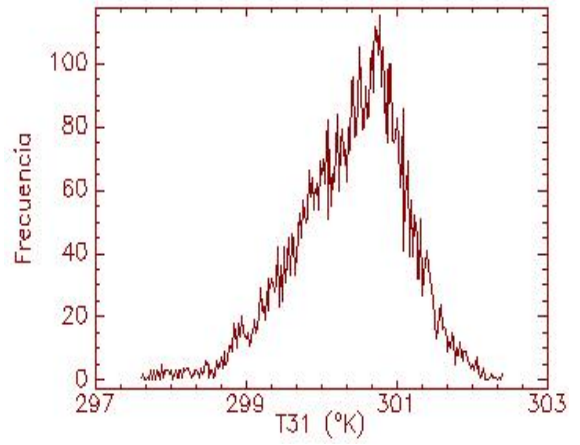


(e)

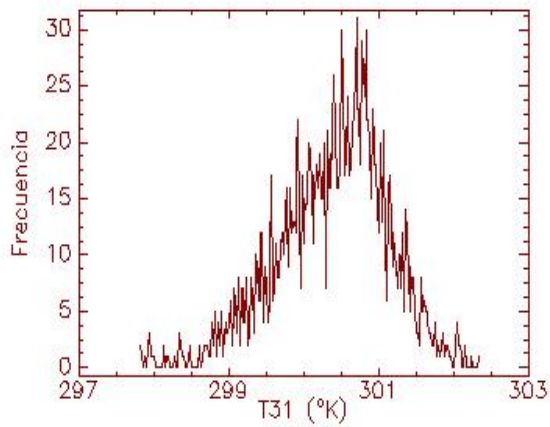
Día 261/2004



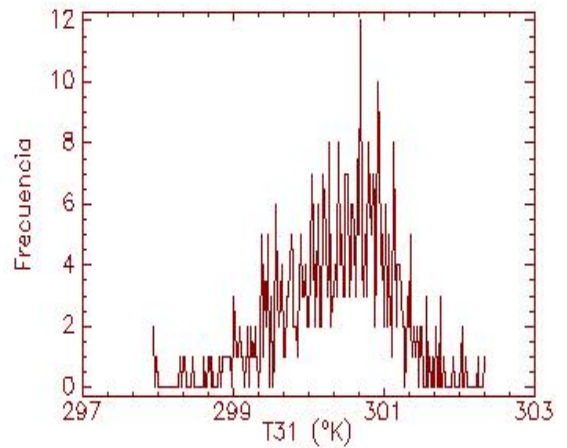
(a)



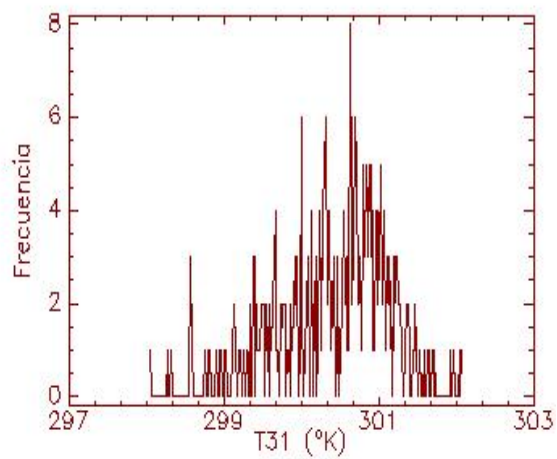
(b)



(c)

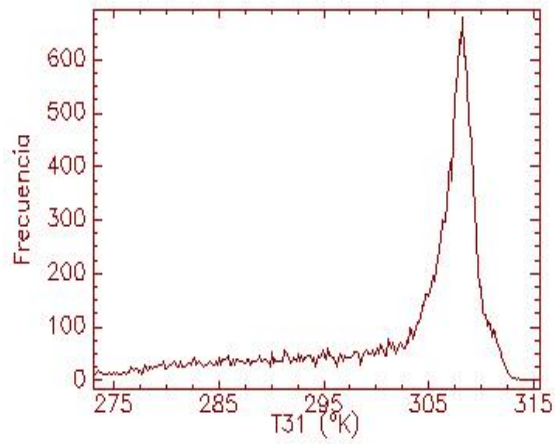


(d)

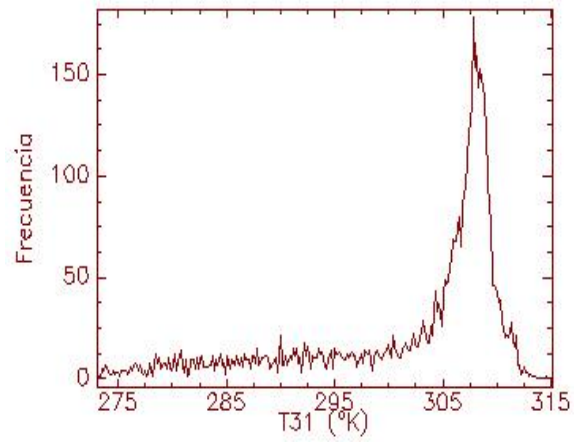


(e)

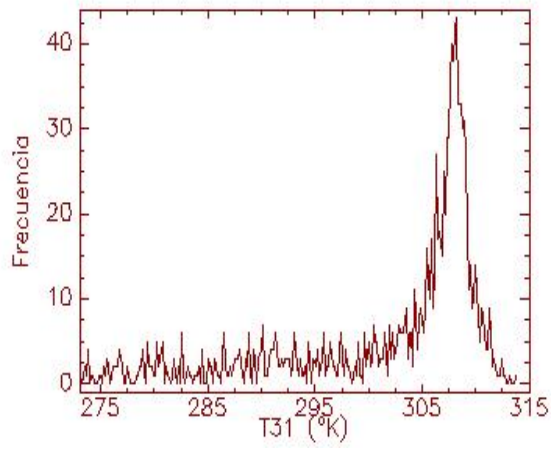
Día 04/2005



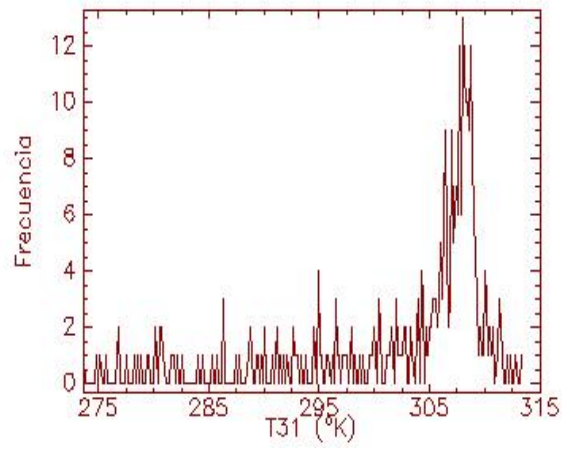
(a)



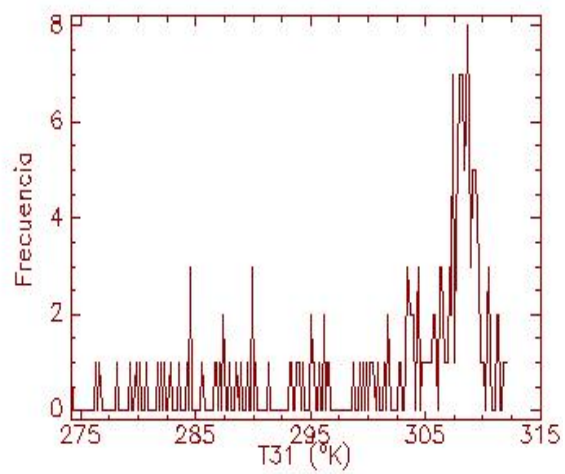
(b)



(c)

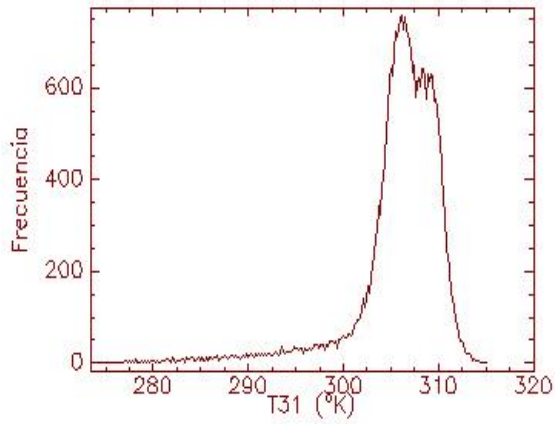


(d)

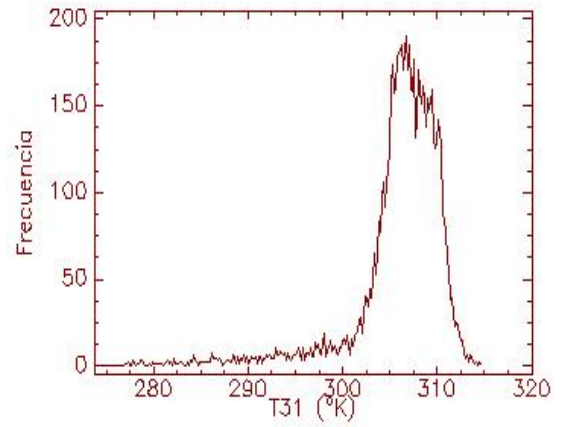


(e)

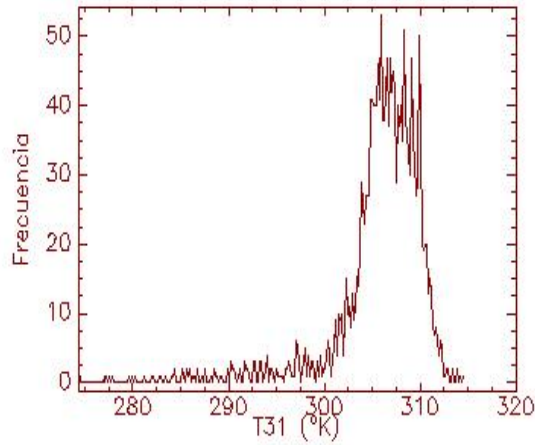
Día 05/2005



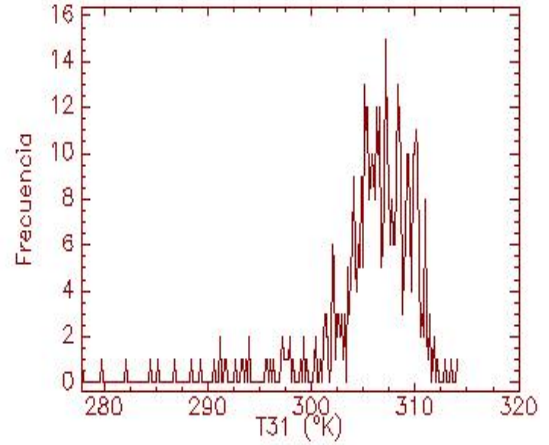
(a)



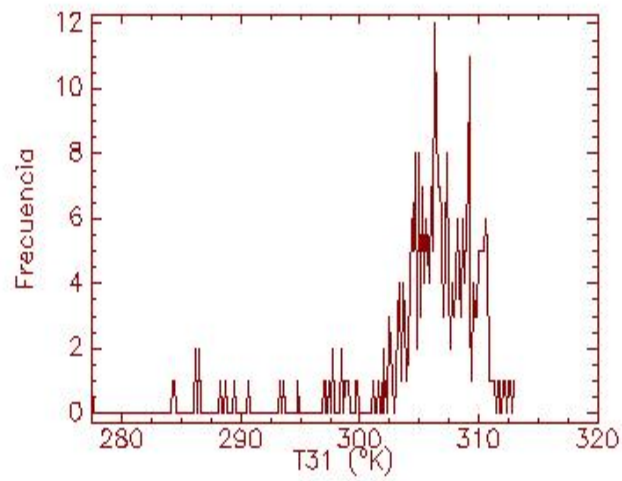
(b)



(c)



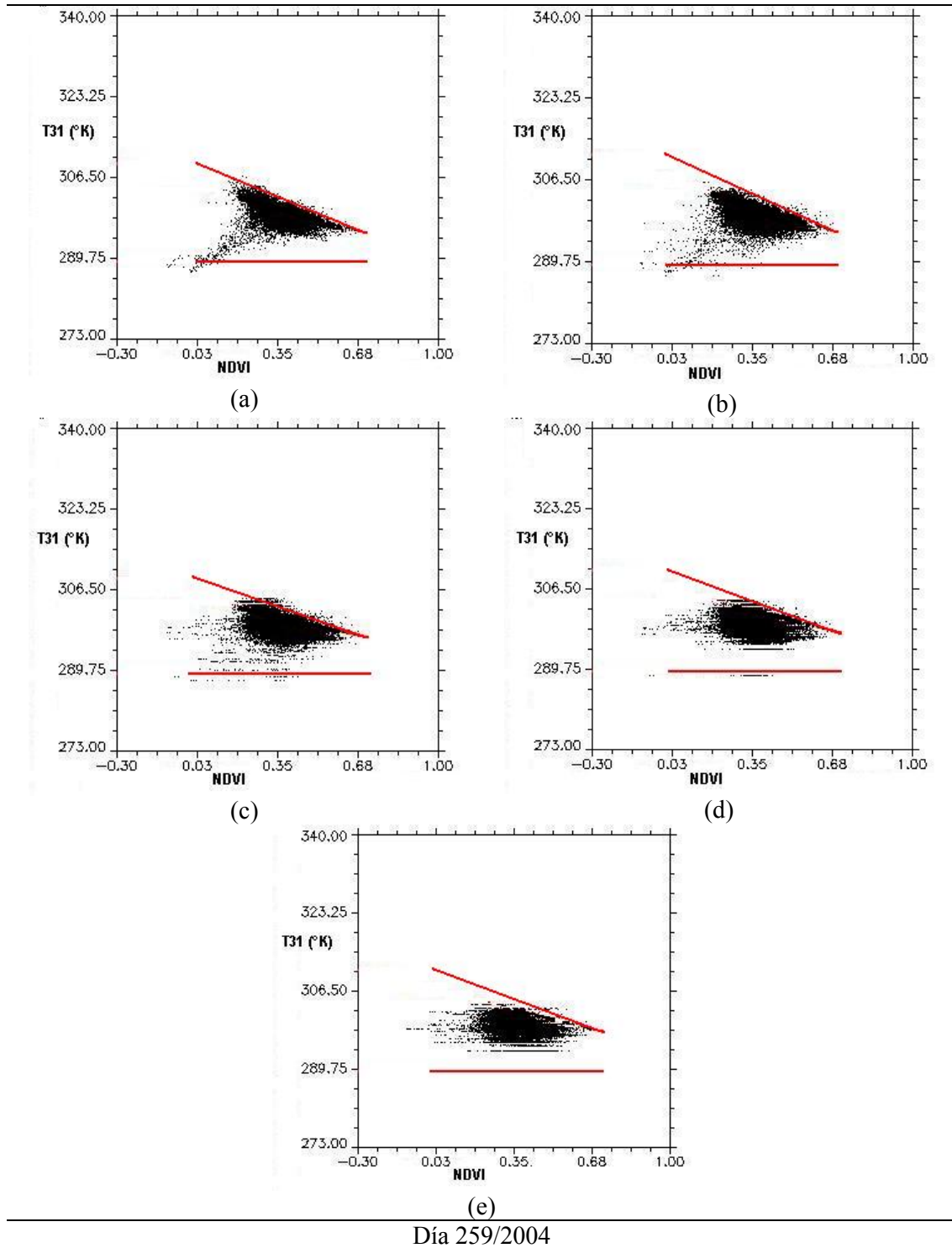
(d)

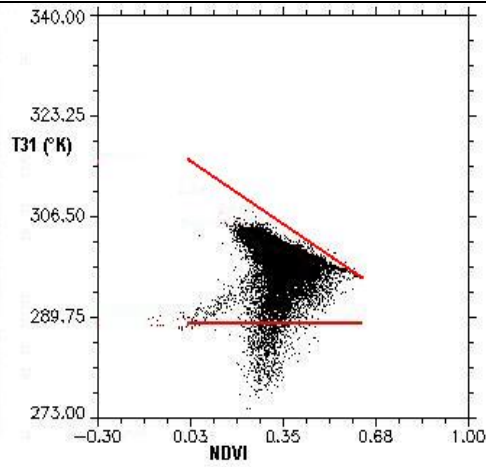


(e)

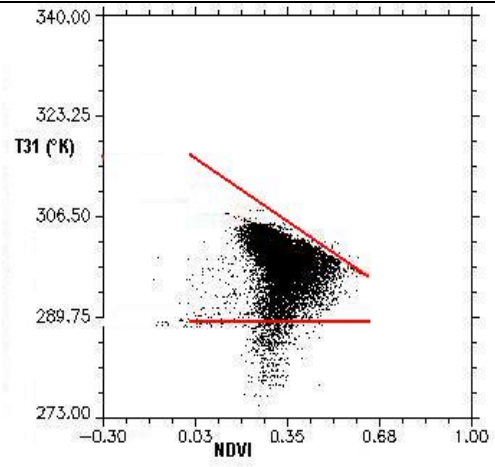
Día 07/2005

Continuación Figura N° 4.9: Diagramas triangulares NDVI-T₃₁ manteniendo T_{min} constante para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km

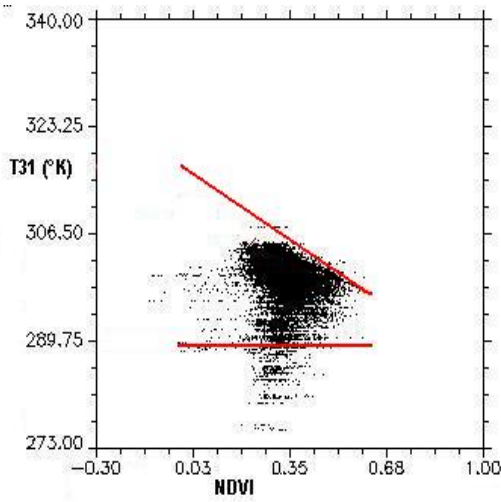




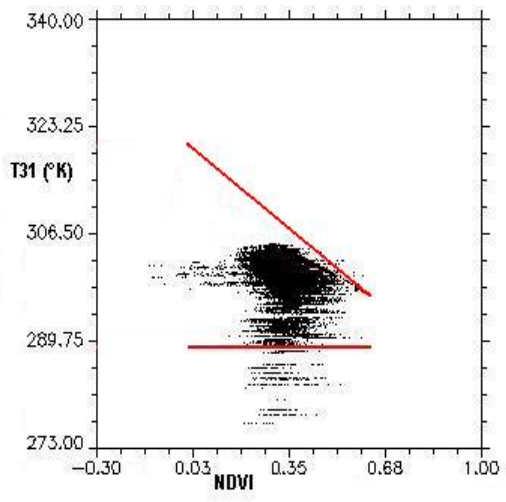
(a)



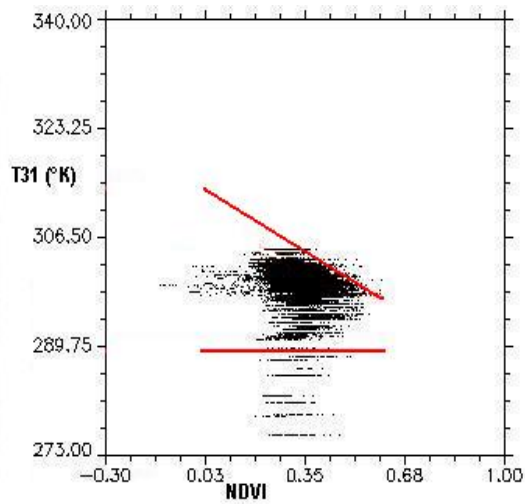
(b)



(c)

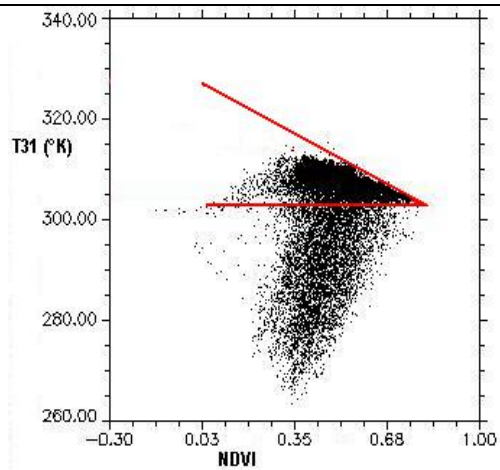


(d)

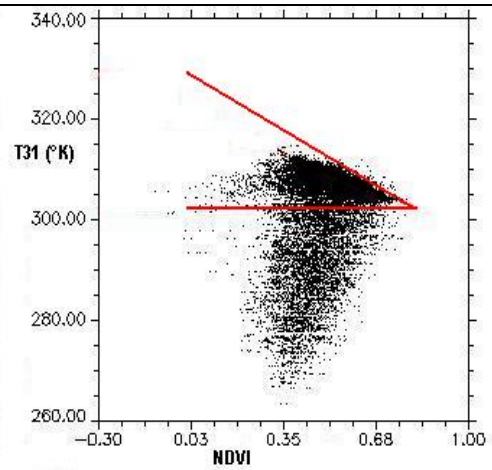


(e)

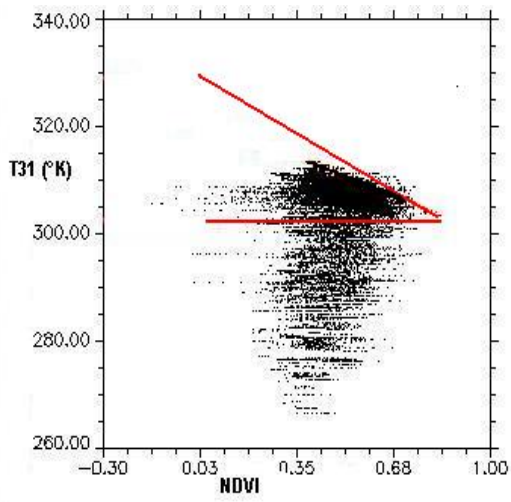
Día 261/2004



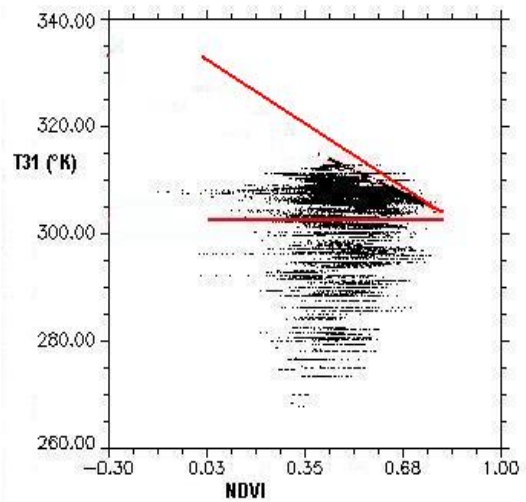
(a)



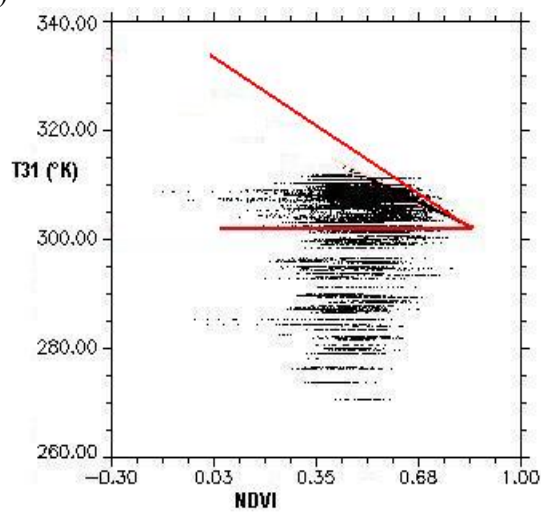
(b)



(c)

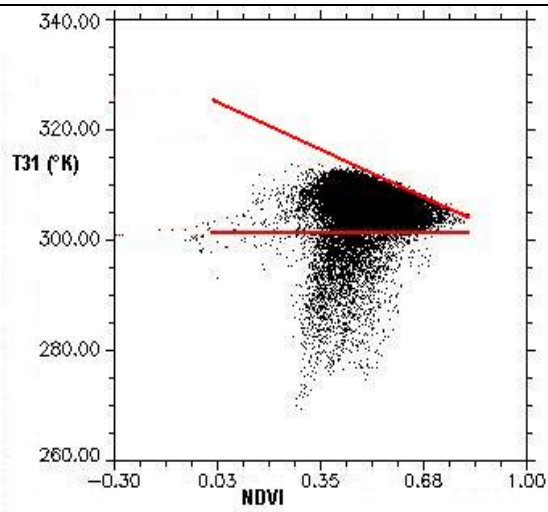


(d)

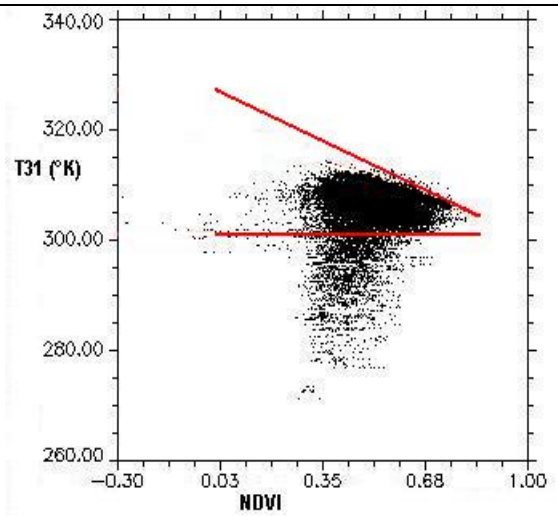


(e)

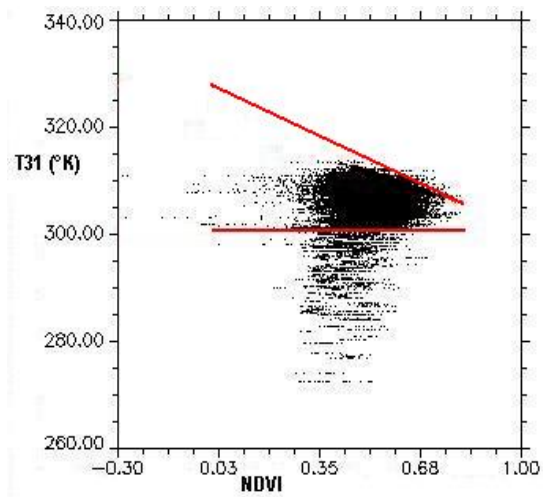
Día 05/2005



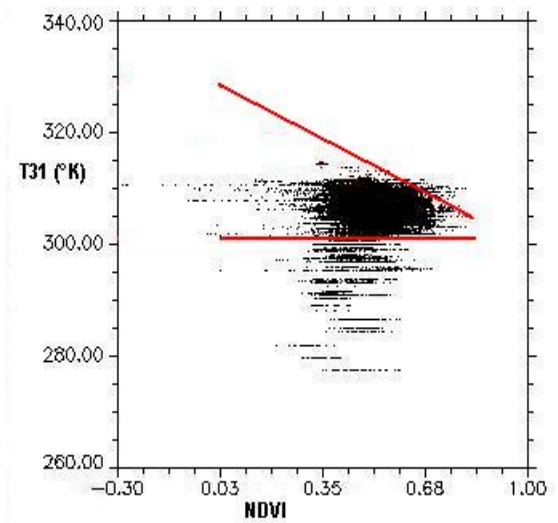
(a)



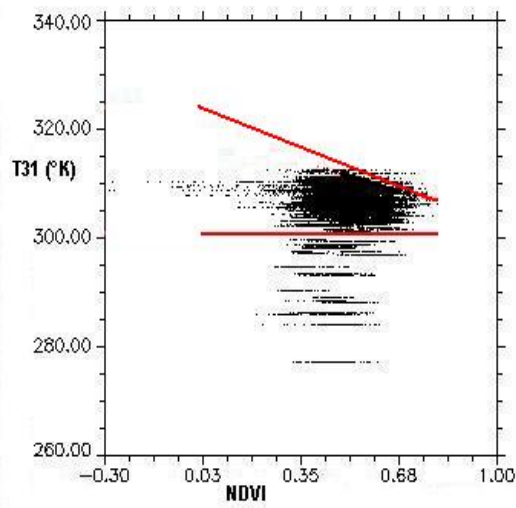
(b)



(c)



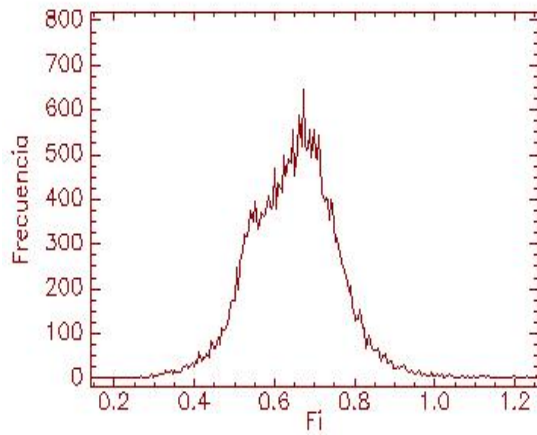
(d)



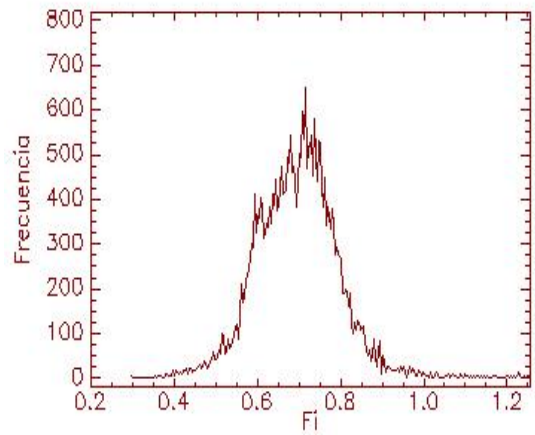
(e)

Día 07/2005

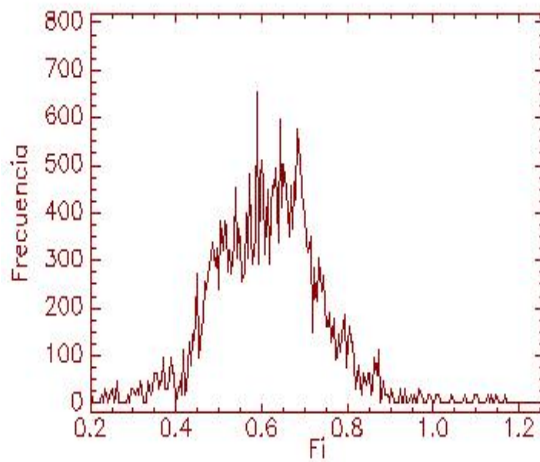
Continuación Figura N° 4.11: Histogramas de frecuencia de ϕ con T_{\min} constante para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km.



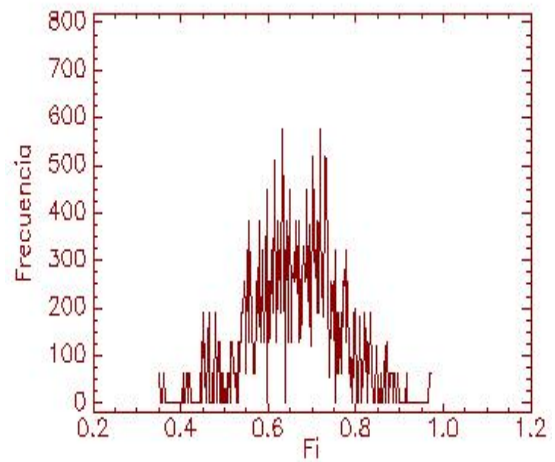
(a)



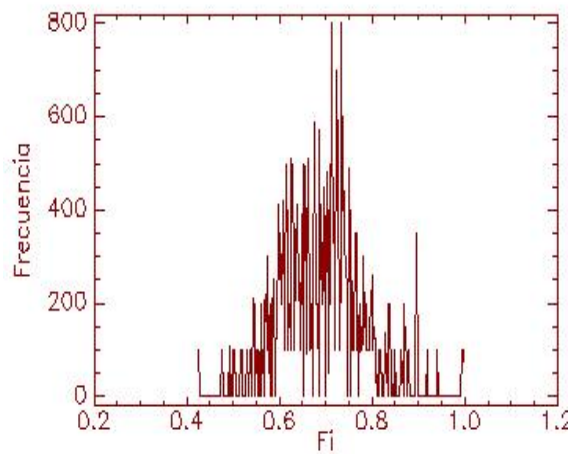
(b)



(c)

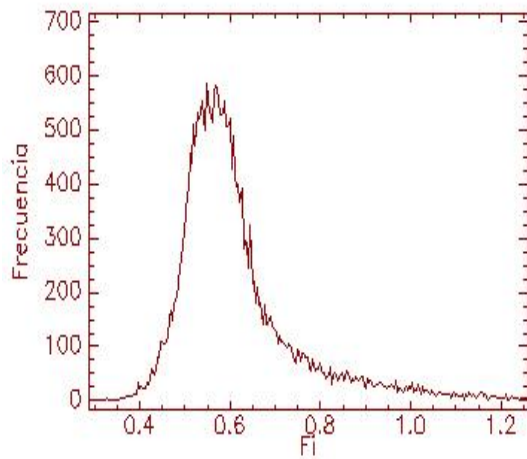


(d)

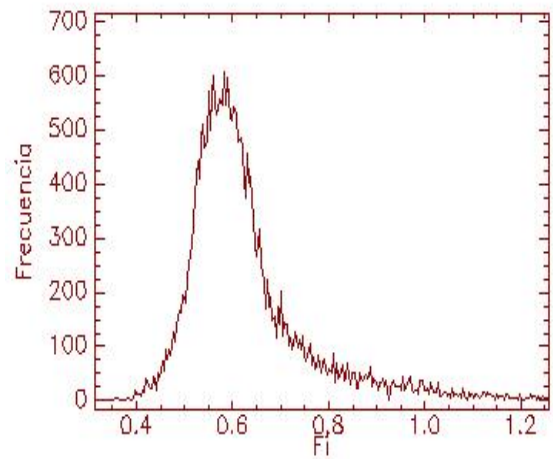


(e)

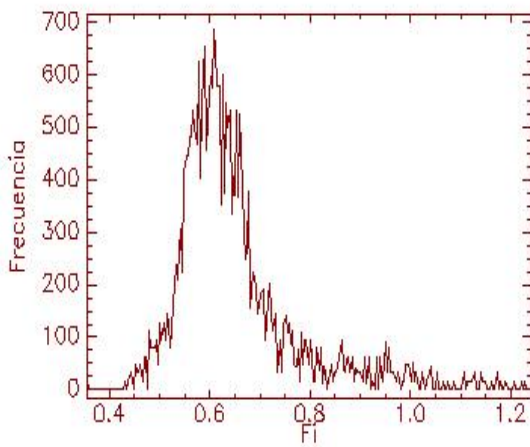
Día 259/2004



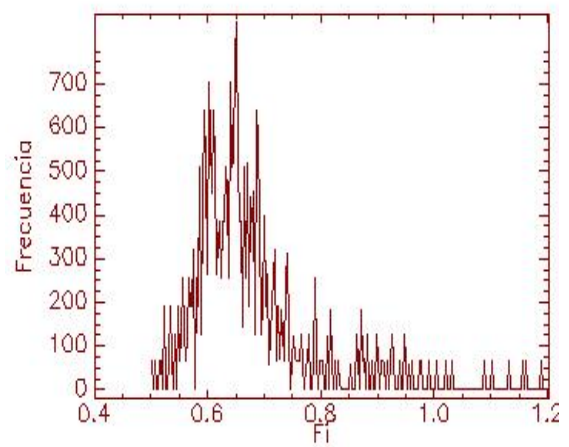
(a)



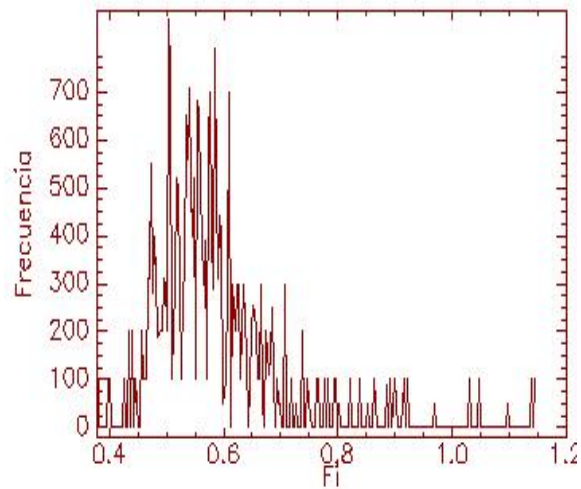
(b)



(c)

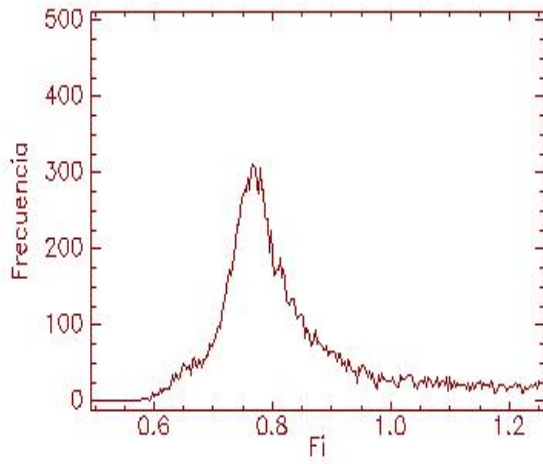


(d)

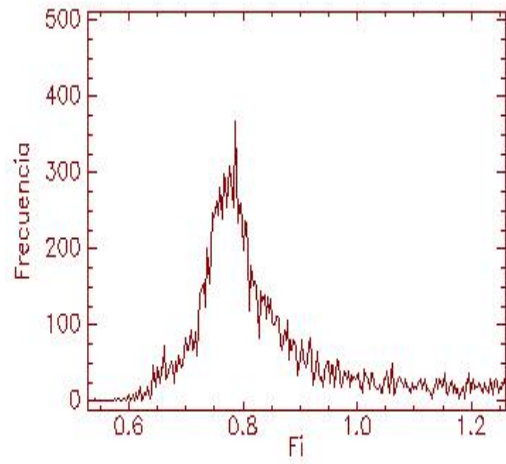


(e)

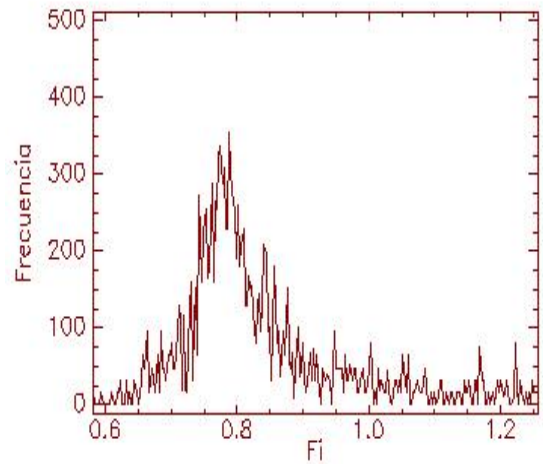
Día 261/2004



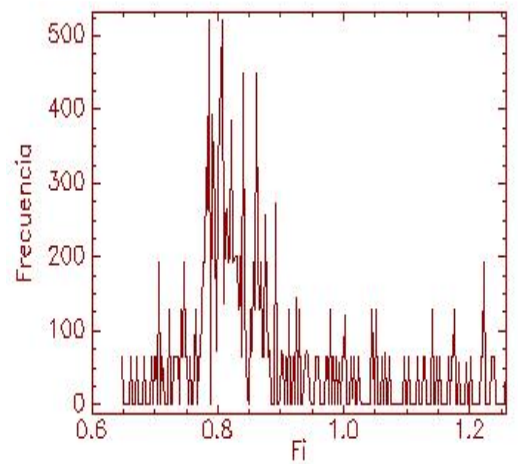
(a)



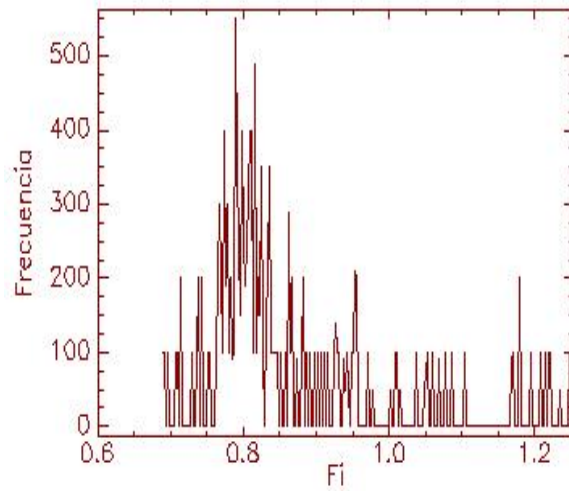
(b)



(c)

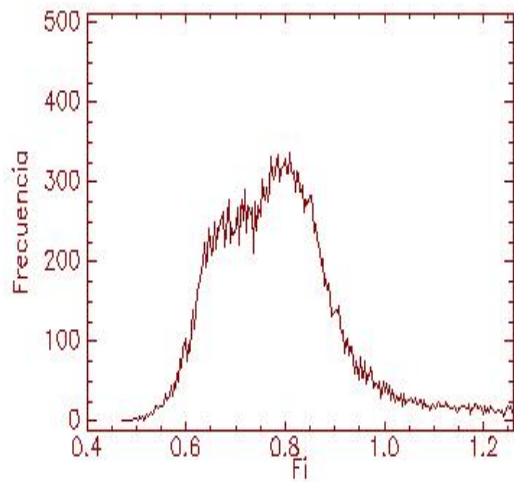


(d)

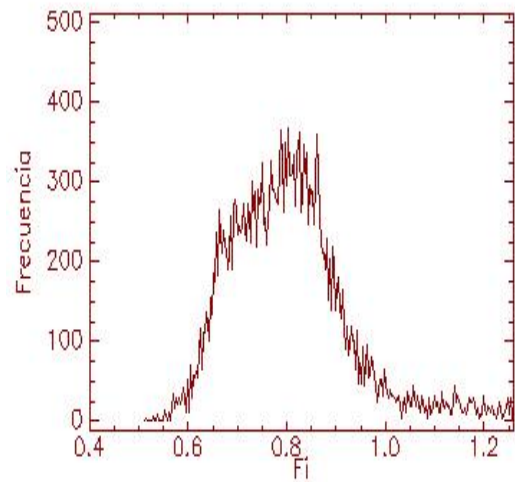


(e)

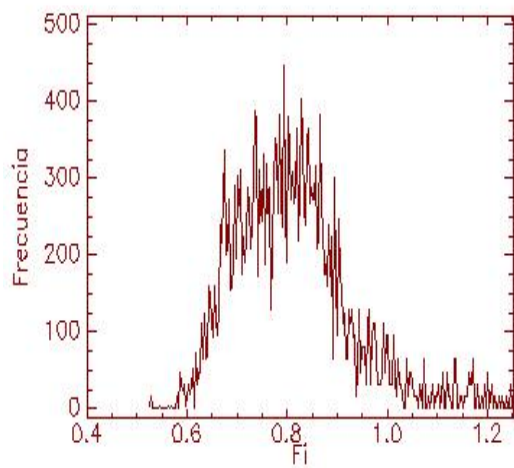
Día 05/2005



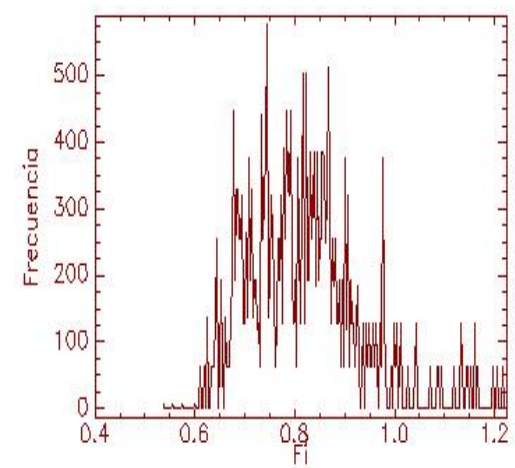
(a)



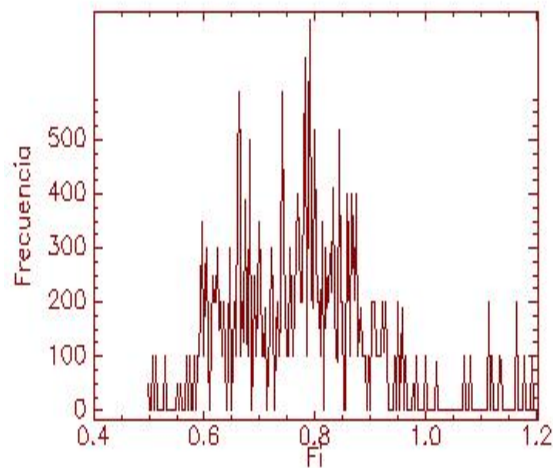
(b)



(c)



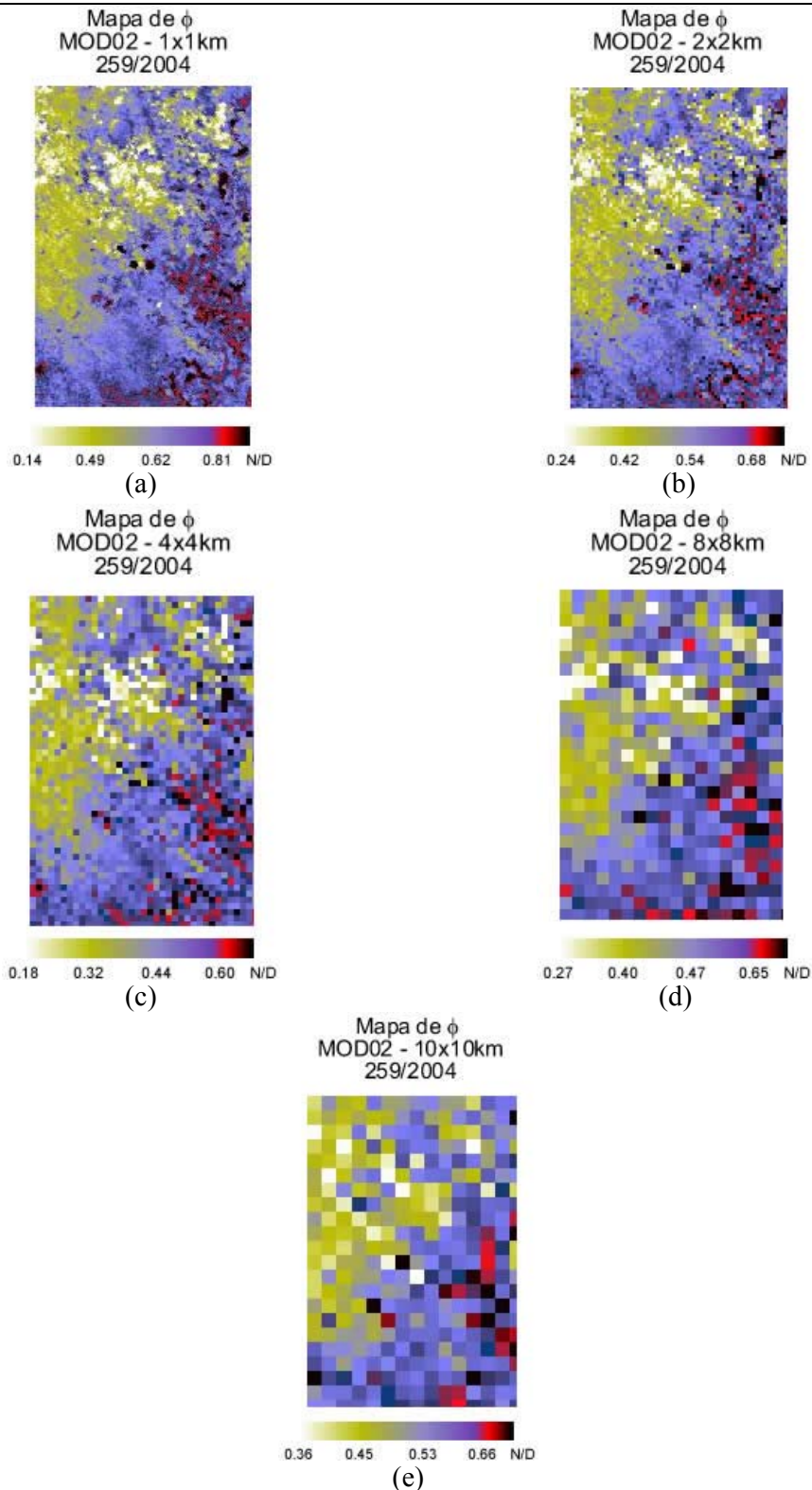
(d)



(e)

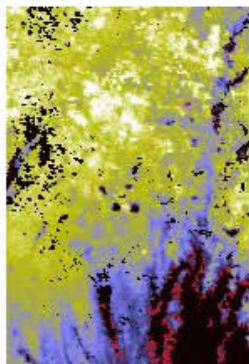
Día 07/2005

Continuación Figura N° 4.12: Imágenes de ϕ con T_{\min} constante para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km.



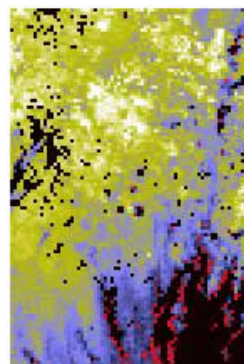
Día 259/2004

Mapa de ϕ
MOD02 - 1x1km
261/2004



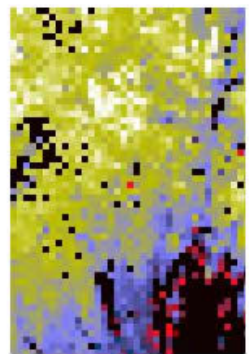
(a)

Mapa de ϕ
MOD02 - 2x2km
261/2004



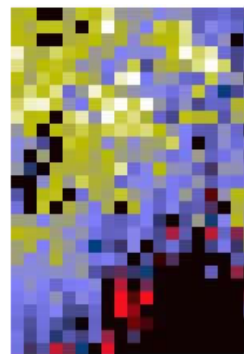
(b)

Mapa de ϕ
MOD02 - 4x4km
261/2004



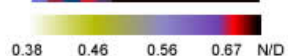
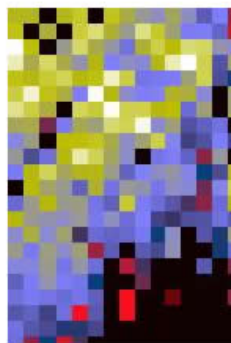
(c)

Mapa de ϕ
MOD02 - 8x8km
261/2004



(d)

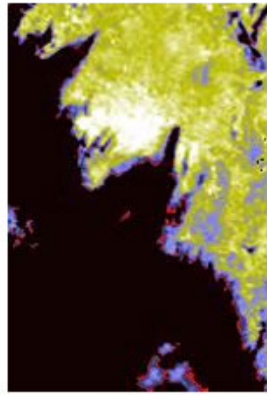
Mapa de ϕ
MOD02 - 10x10km
261/2004



(e)

Día 261/2004

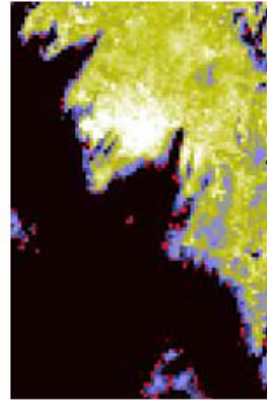
Mapa de ϕ - 1x1km
05/2005



0.6 0.8 0.9 1.2N/D

(a)

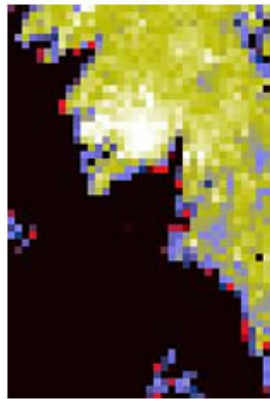
Mapa de ϕ - 2x2km
05/2005



0.6 0.8 0.9 1.2N/D

(b)

Mapa de ϕ - 4x4km
05/2005



0.6 0.8 0.9 1.2N/D

(c)

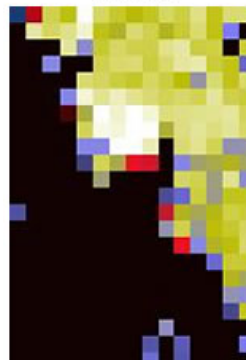
Mapa de ϕ - 8x8km
05/2005



0.6 0.8 0.9 1.2N/D

(d)

Mapa de ϕ - 10x10km
05/2005

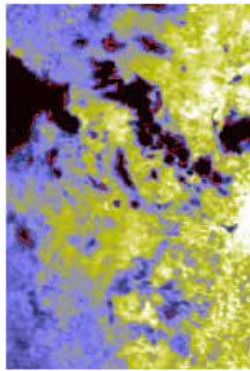


0.6 0.8 0.9 1.2N/D

(e)

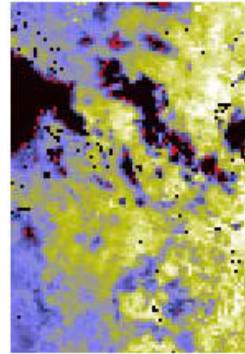
Día 05/2005

Mapa de ϕ - 1x1km
07/2005



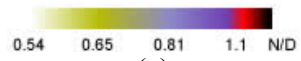
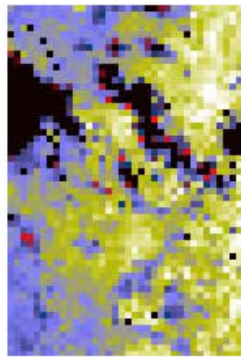
(a)

Mapa de ϕ - 2x2km
07/2005



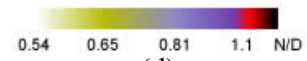
(b)

Mapa de ϕ - 4x4km
07/2005



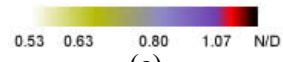
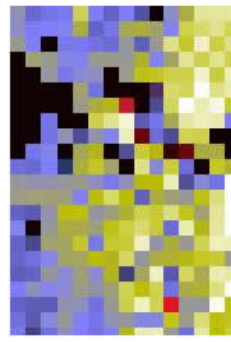
(c)

Mapa de ϕ - 8x8km
07/2005



(d)

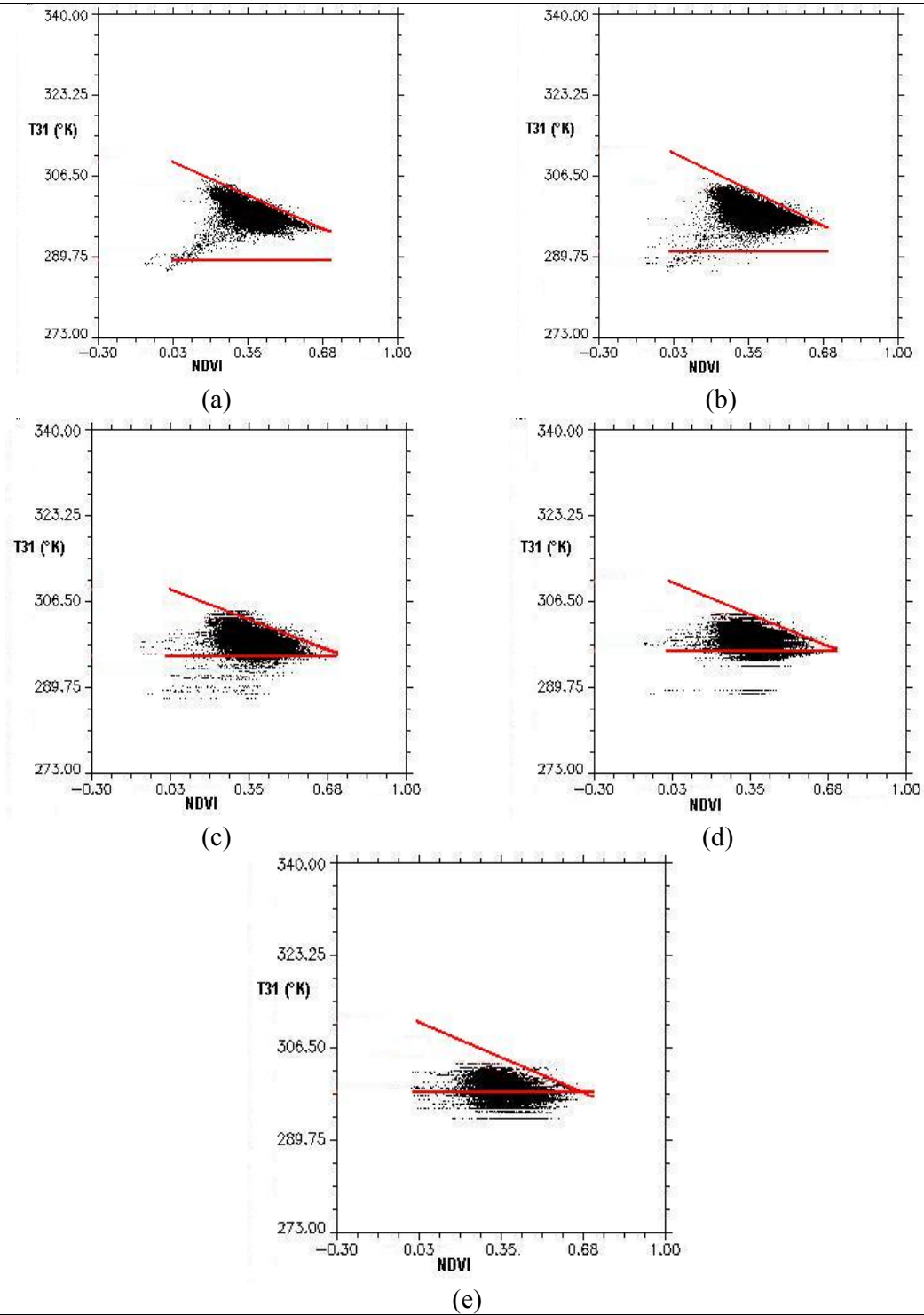
Mapa de ϕ - 10x10km
07/2005



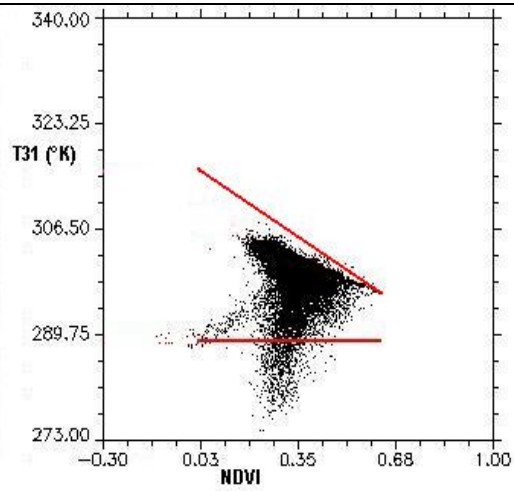
(e)

Día 07/2005

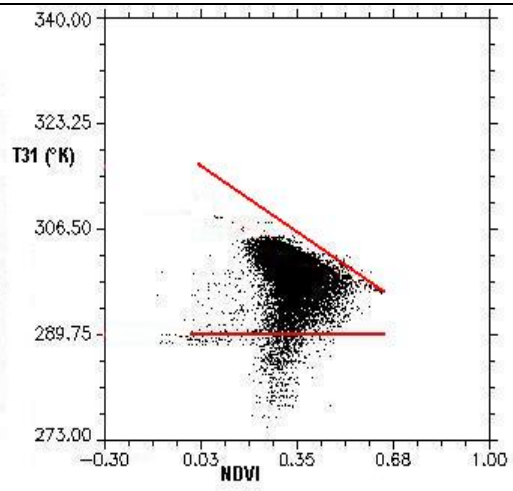
Continuación Figura N° 4.13: Diagramas triangulares NDVI-T₃₁ con T_{min} variable para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km



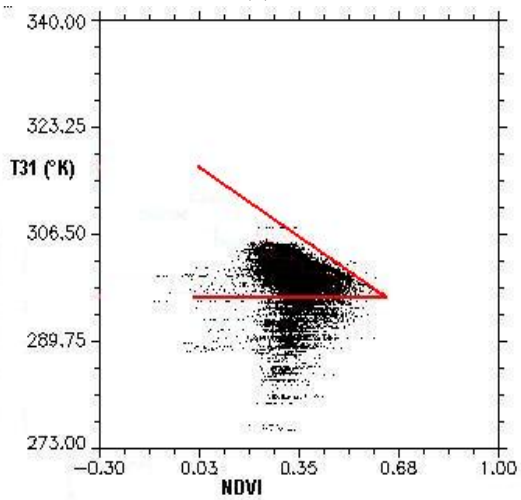
Día 259/2004



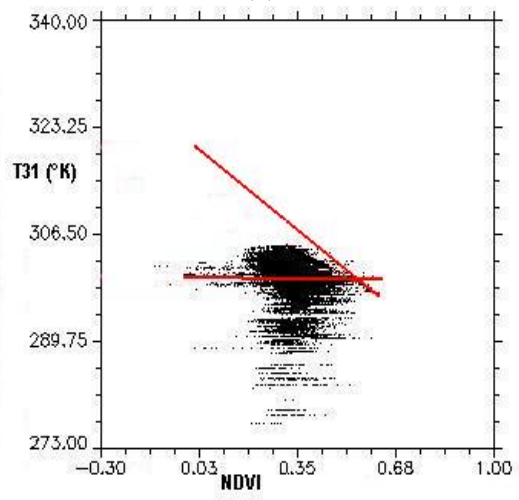
(a)



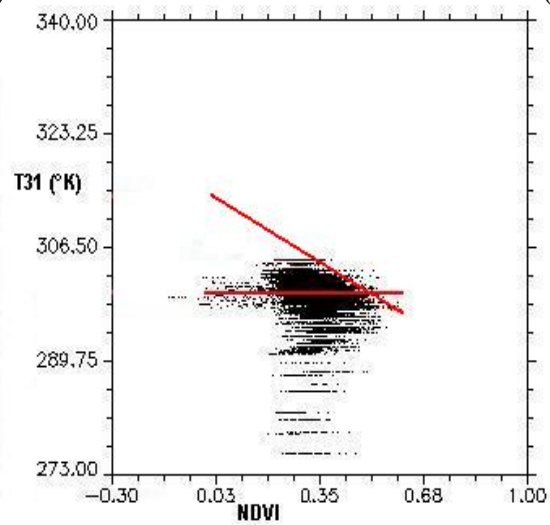
(b)



(c)

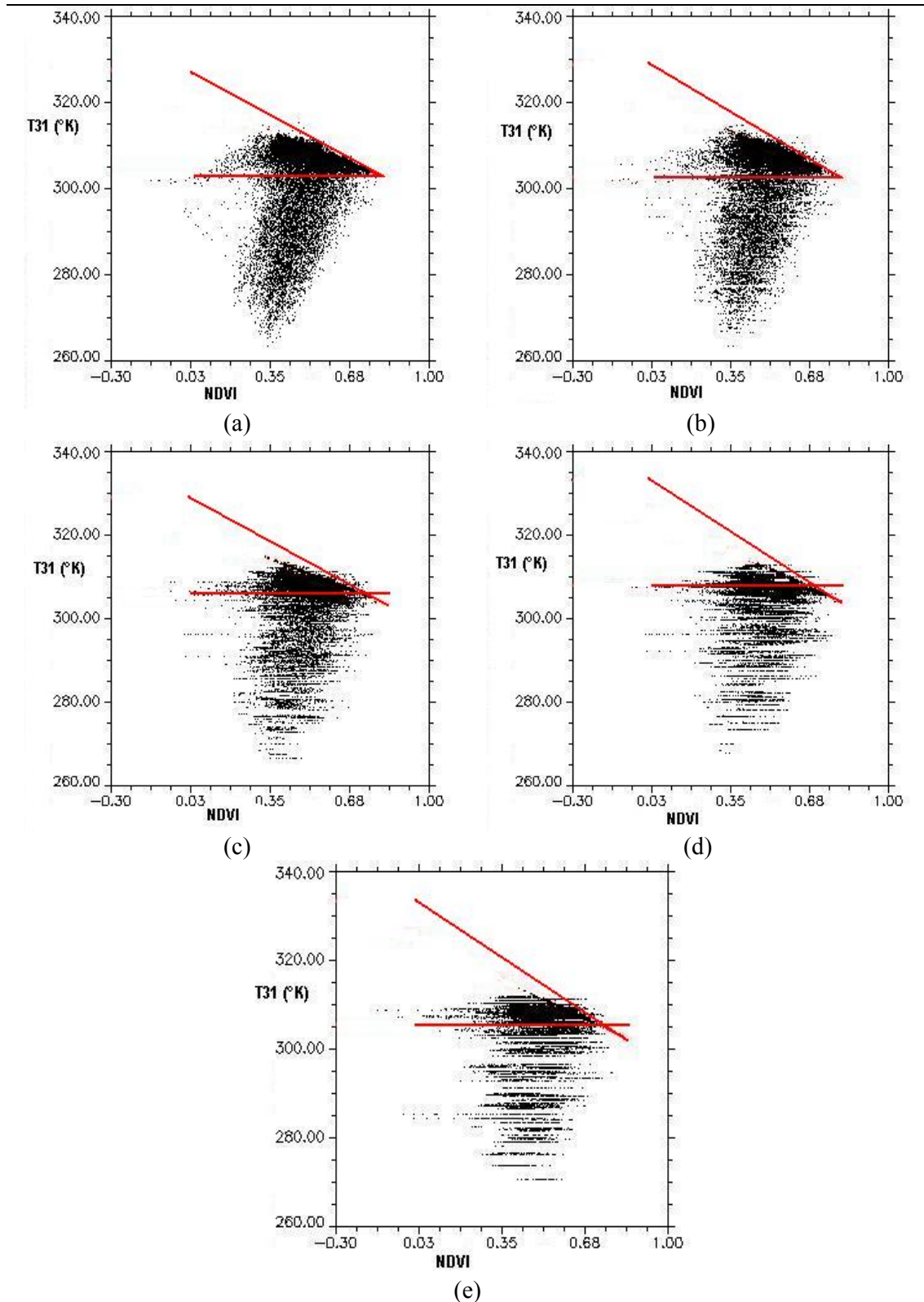


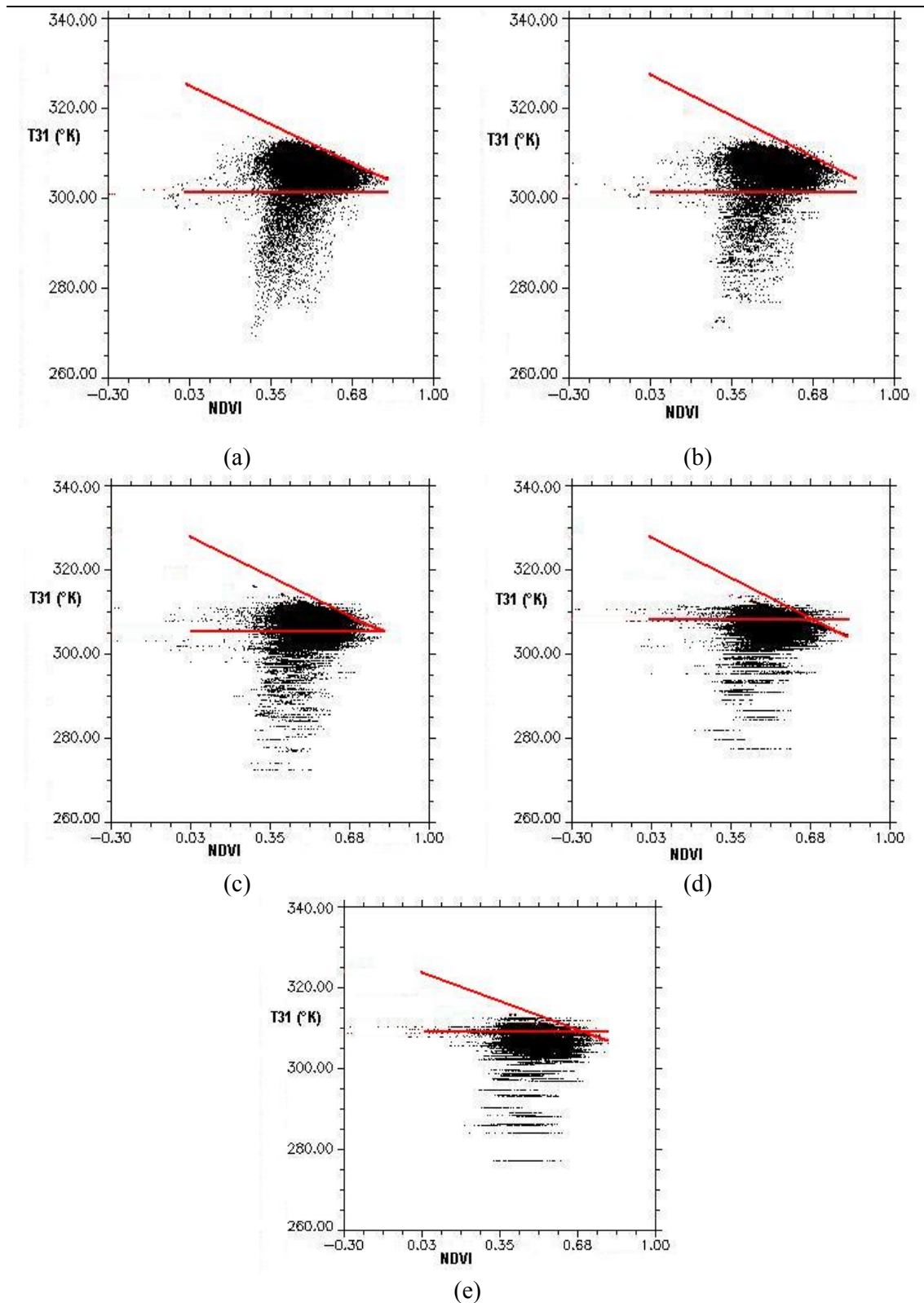
(d)



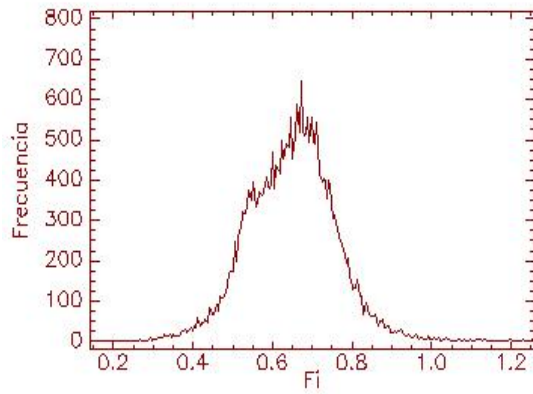
(e)

Día 261/2004

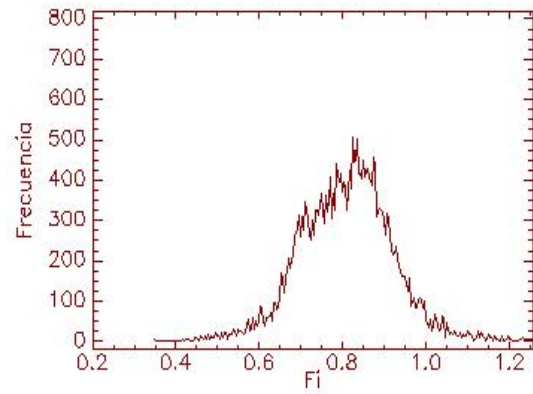




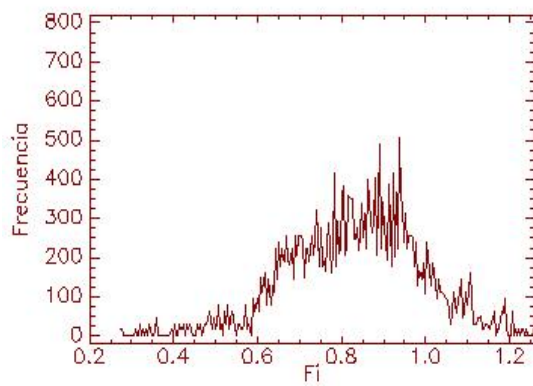
Continuación Figura N° 4.15: Histogramas de frecuencia de ϕ con T_{\min} variable para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km



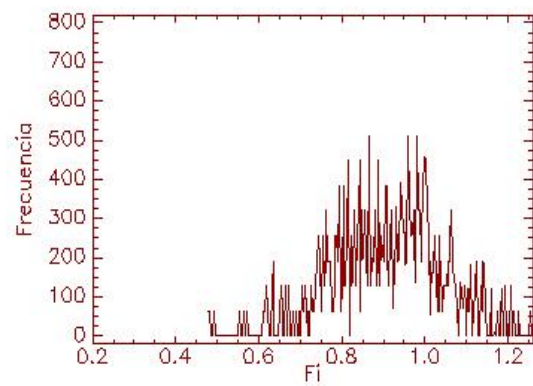
(a)



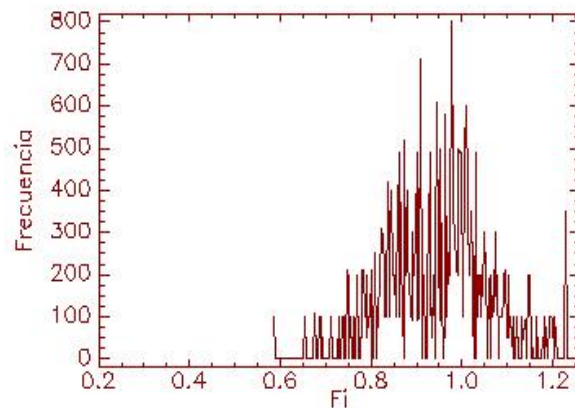
(b)



(c)

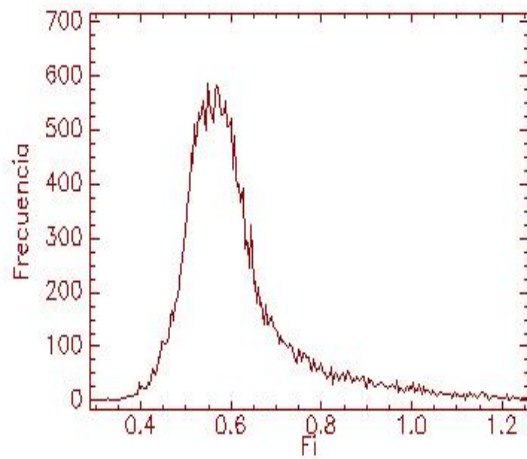


(d)

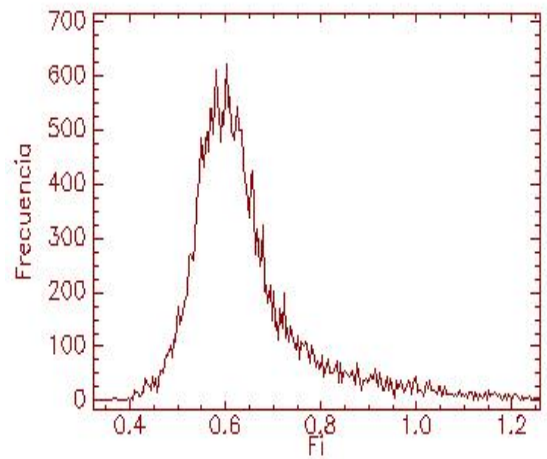


(e)

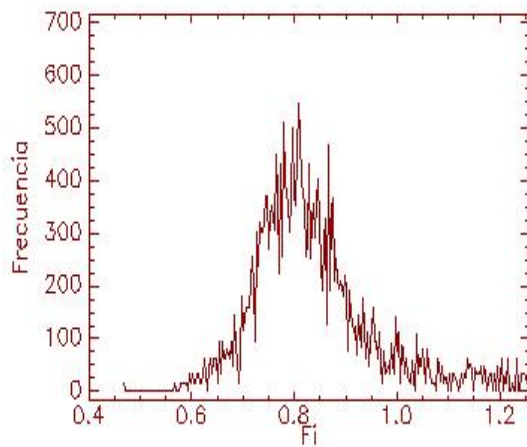
Día 259/2004



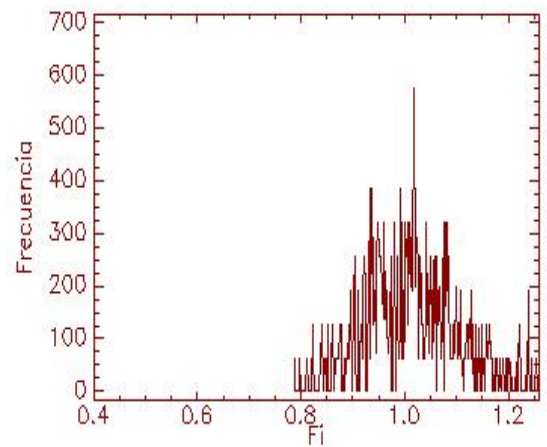
(a)



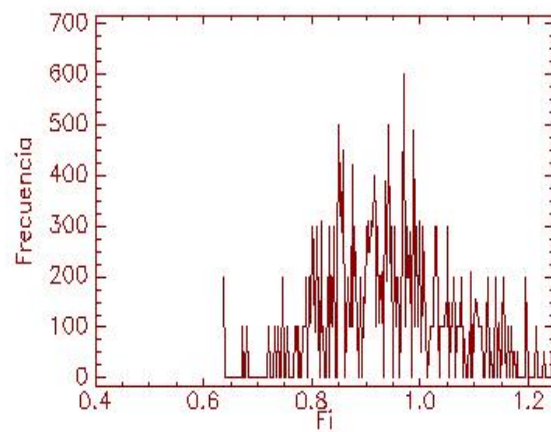
(b)



(c)

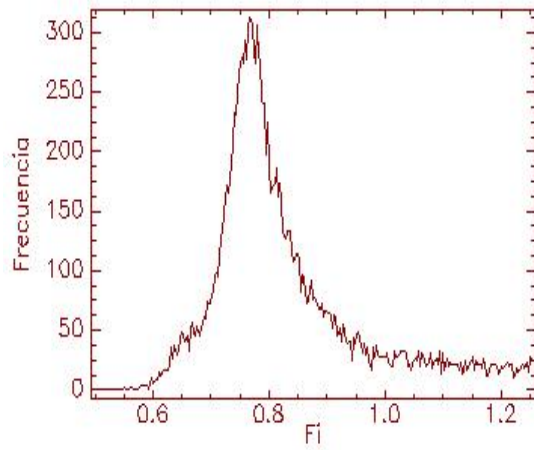


(d)

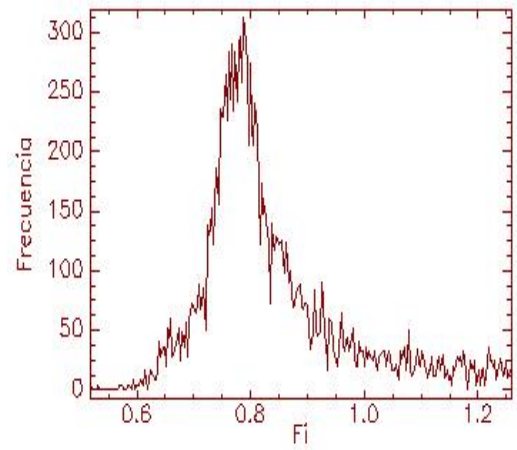


(e)

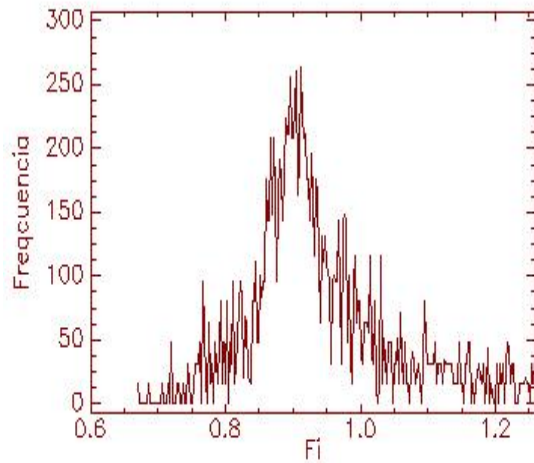
Día 261/2004



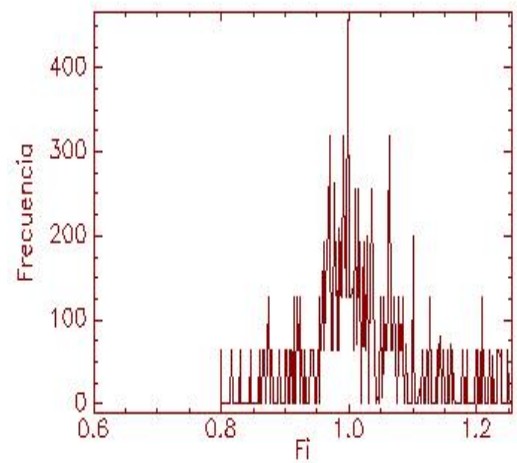
(a)



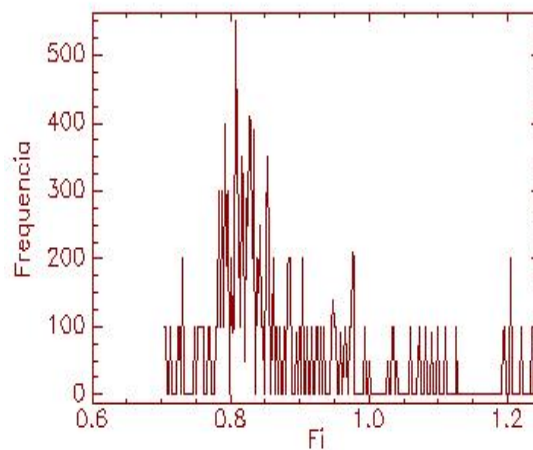
(b)



(c)

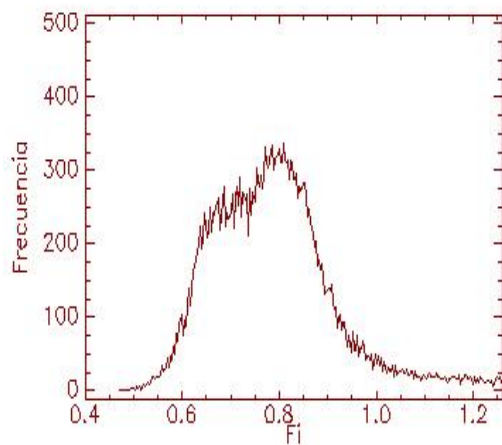


(d)

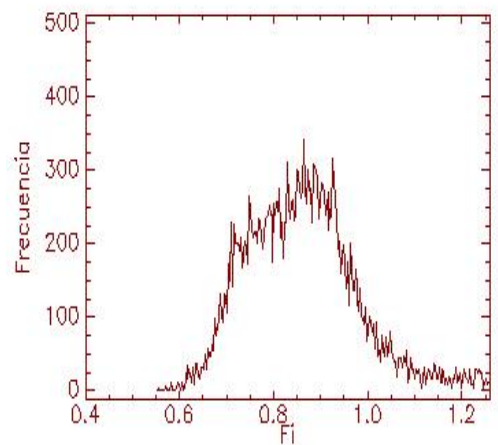


(e)

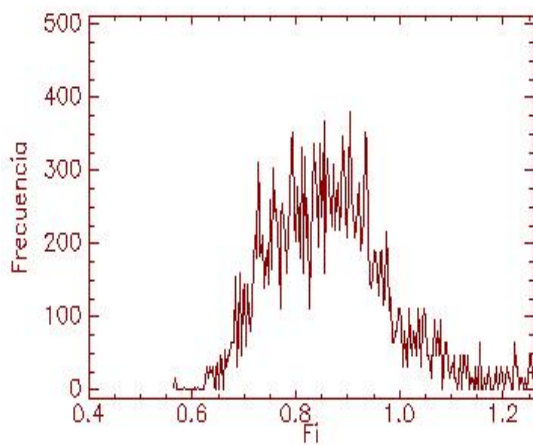
Día 05/2005



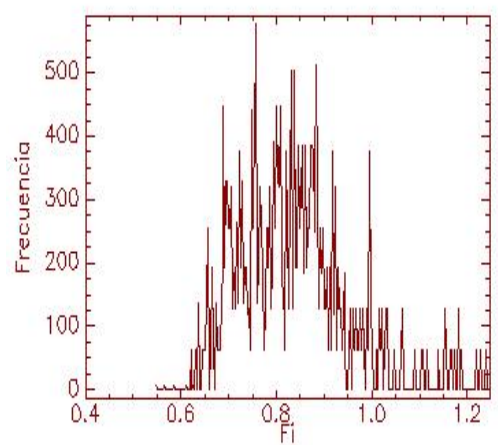
(a)



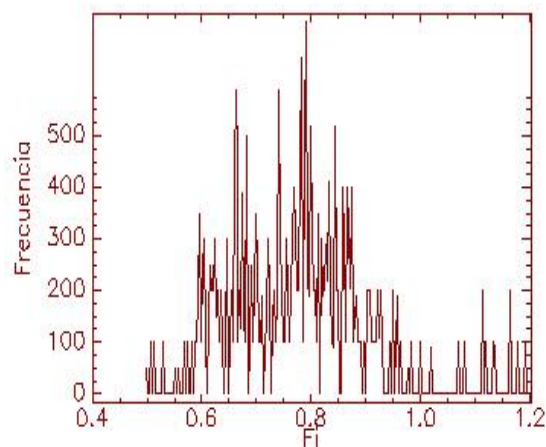
(b)



(c)



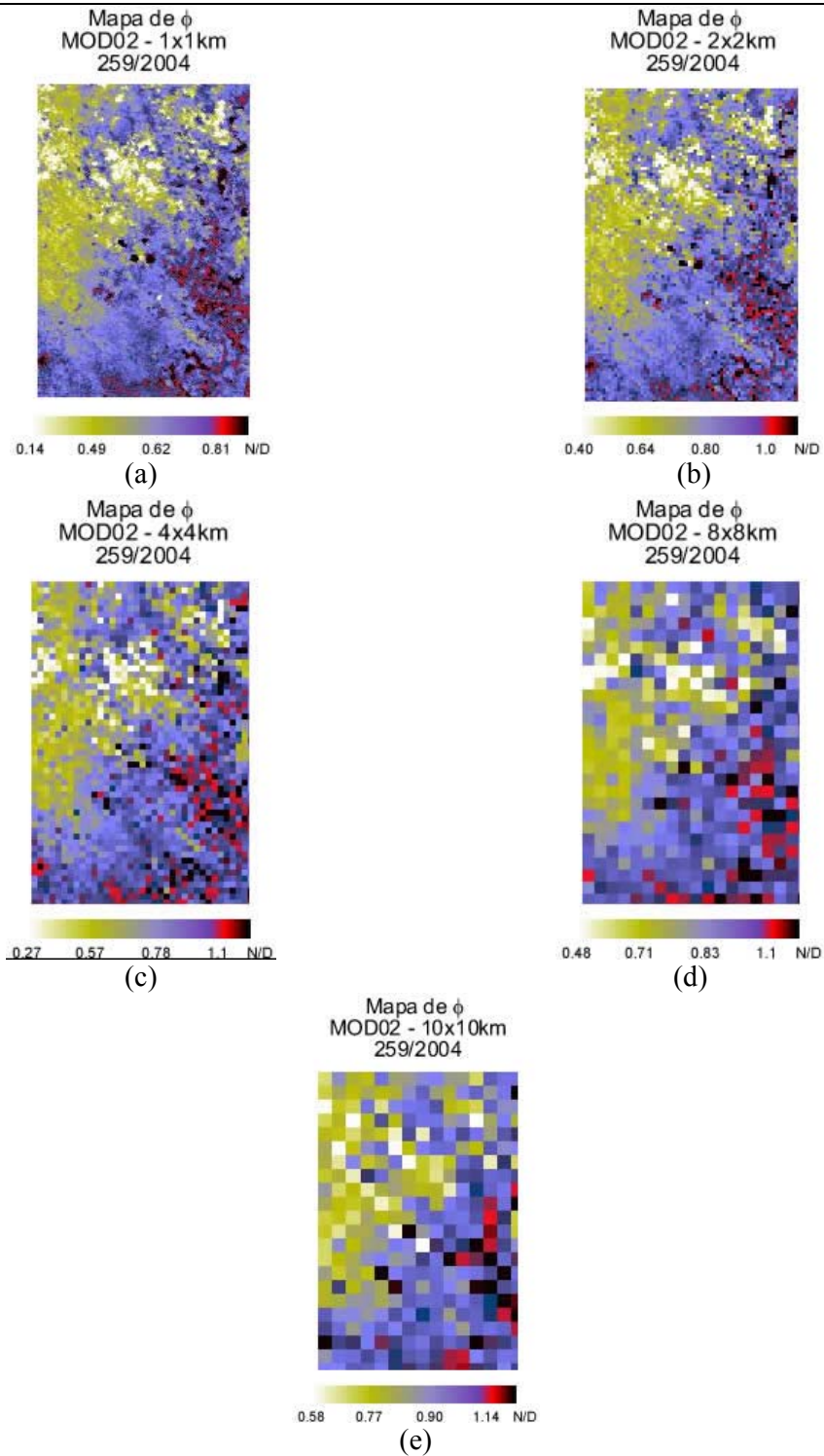
(d)



(e)

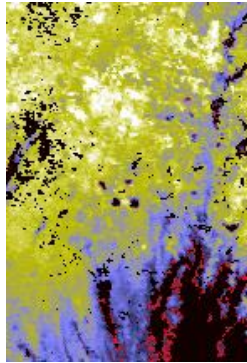
Día 07/2005

Continuación Figura N° 4.16: Imágenes de ϕ con T_{\min} variable para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km.



Día 259/2004

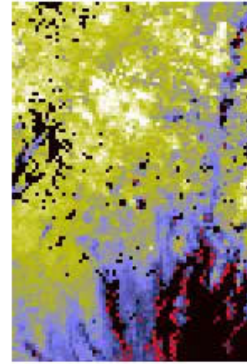
Mapa de ϕ
MOD02 - 1x1km
261/2004



0.37 0.48 0.62 0.87 N/D

(a)

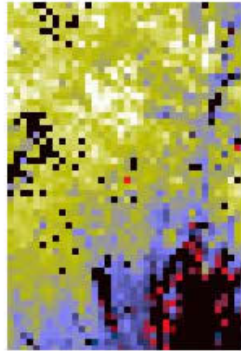
Mapa de ϕ
MOD02 - 2x2km
261/2004



0.37 0.49 0.65 0.87 N/D

(b)

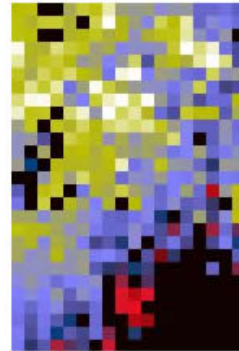
Mapa de ϕ
MOD02 - 4x4km
261/2004



0.57 0.67 0.87 1.1 N/D

(c)

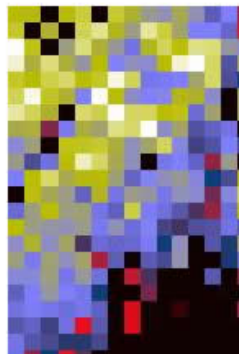
Mapa de ϕ
MOD02 - 8x8km
261/2004



0.78 0.86 0.99 1.14 N/D

(d)

Mapa de ϕ
MOD02 - 10x10km
261/2004

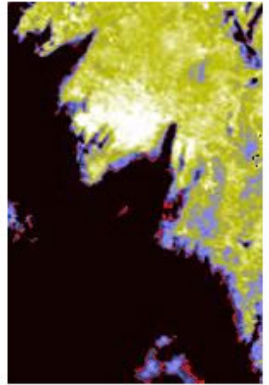


0.63 0.79 0.92 1.14 N/D

(e)

Día 261/2004

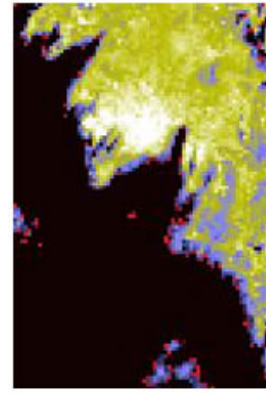
Mapa de Φ - 1x1km
05/2005



0.6 0.8 0.9 1.2 N/D

(a)

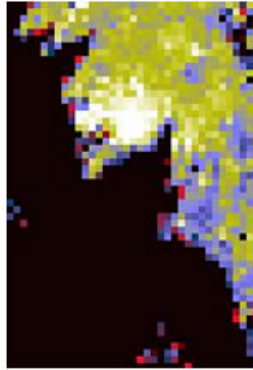
Mapa de Φ - 2x2km
05/2005



0.6 0.8 0.9 1.2 N/D

(b)

Mapa de Φ - 4x4km
05/2005



0.6 0.8 0.9 1.2 N/D

(c)

Mapa de Φ - 8x8km
05/2005



0.6 0.8 0.9 1.2 N/D

(d)

Mapa de Φ - 10x10km
05/2005

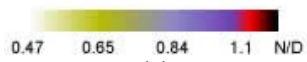
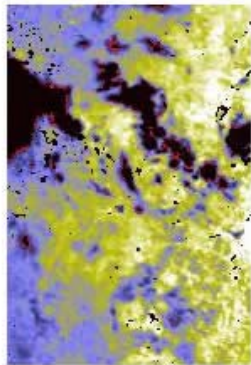


0.6 0.8 0.9 1.2 N/D

(e)

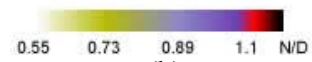
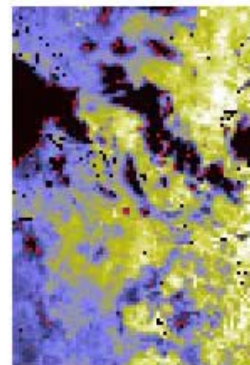
Dia 05/2005

Mapa de ϕ - 1x1km
07/2005



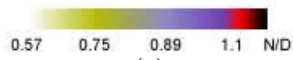
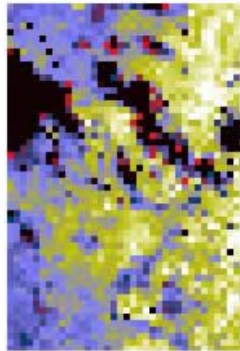
(a)

Mapa de ϕ - 2x2km
07/2005



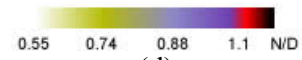
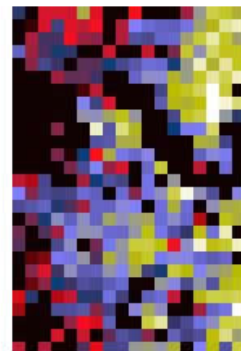
(b)

Mapa de ϕ - 4x4km
07/2005



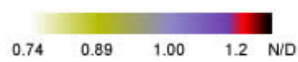
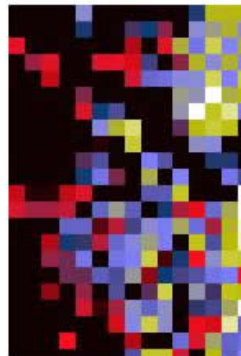
(c)

Mapa de ϕ - 8x8km
07/2005



(d)

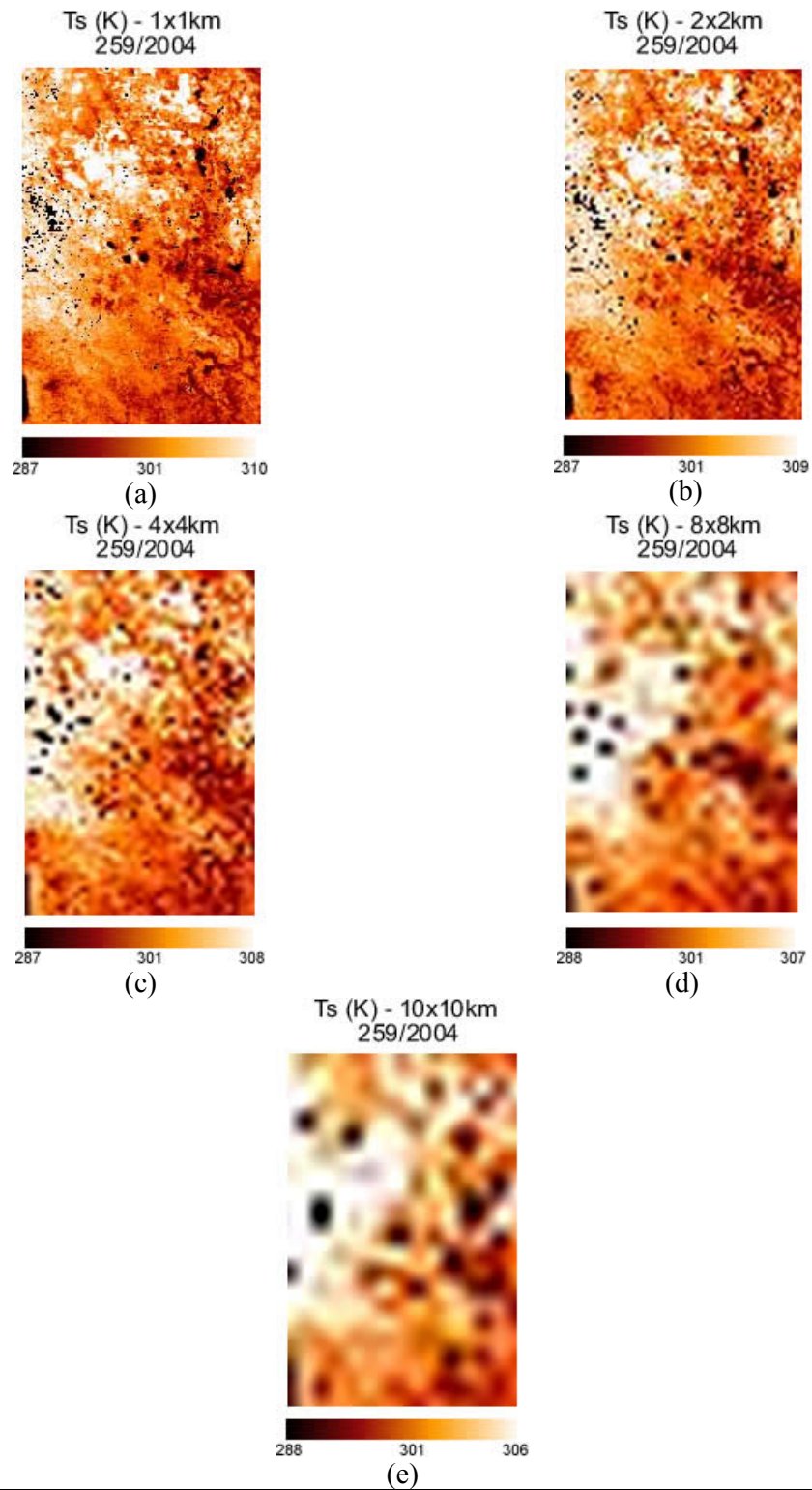
Mapa de ϕ - 10x10km
07/2005



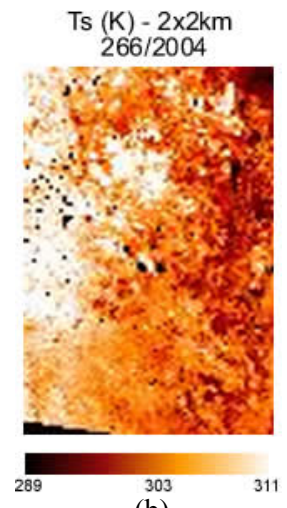
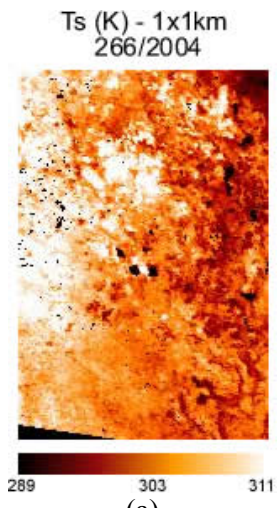
(e)

Día 07/2005

Continuación Figura N° 4.17: Imágenes de T_s – Producto MOD11, para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km

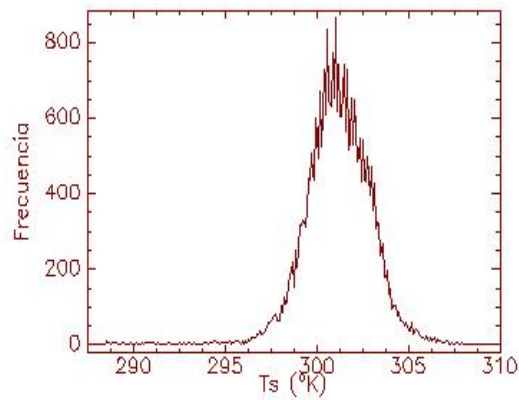


Día 259/2004

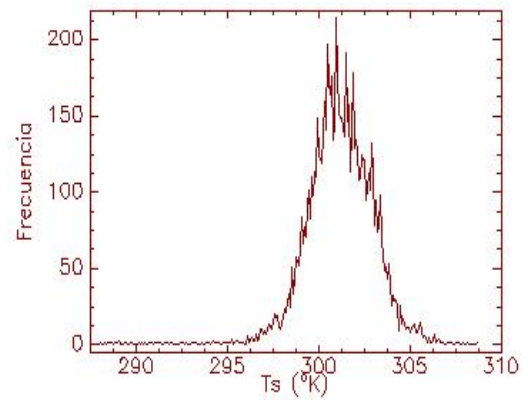


Día 266/2004

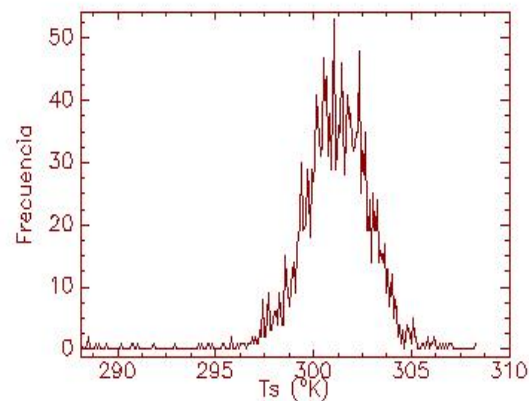
Continuación Figura N° 4.19: Histogramas de frecuencia de T_s para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km.



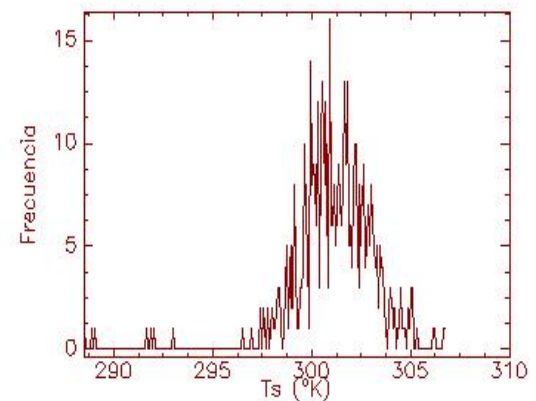
(a)



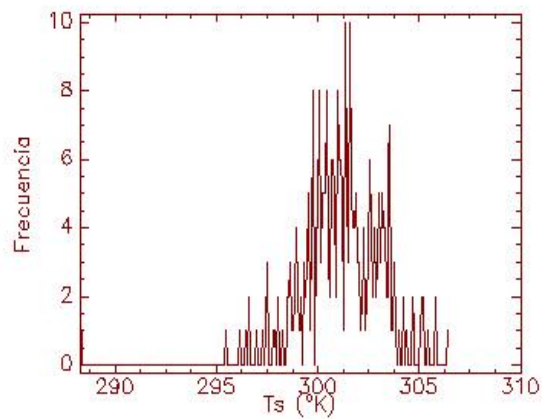
(b)



(c)

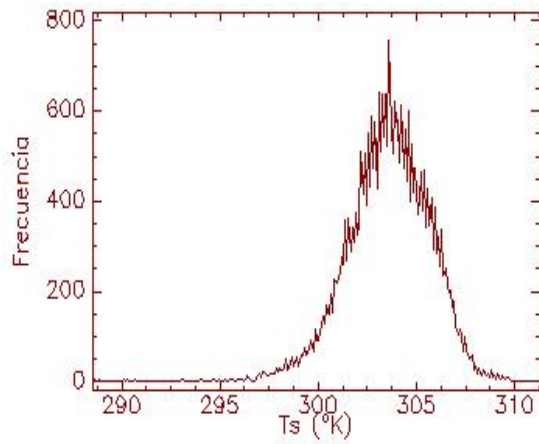


(d)

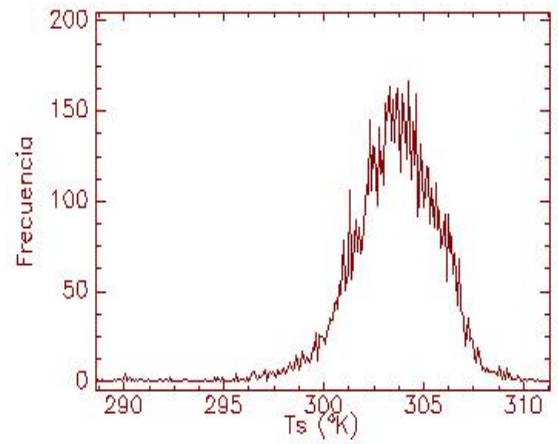


(e)

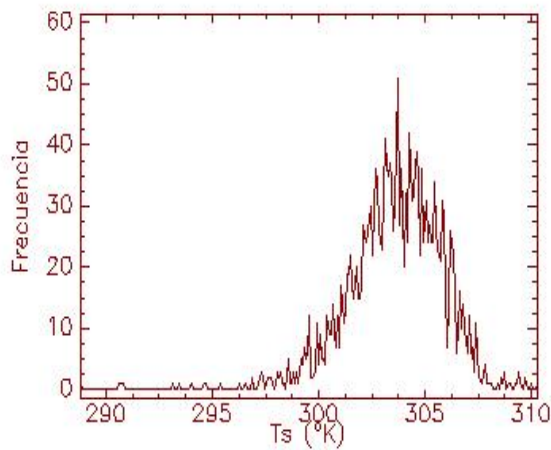
Día 259/2004



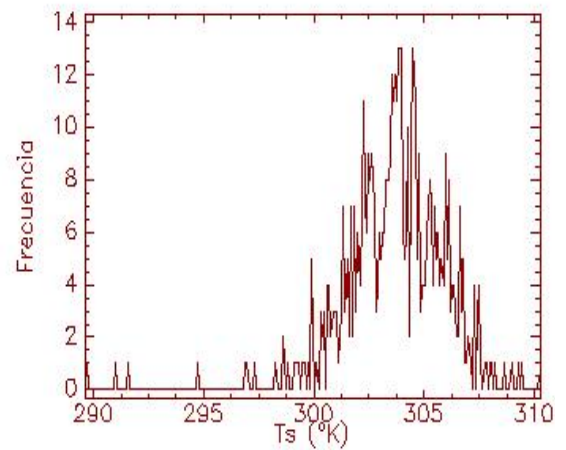
(a)



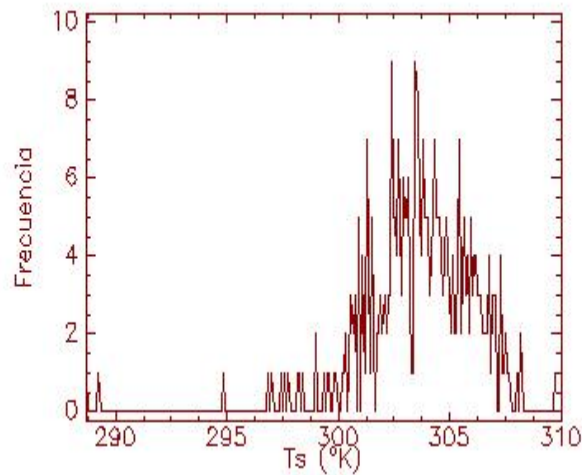
(b)



(c)



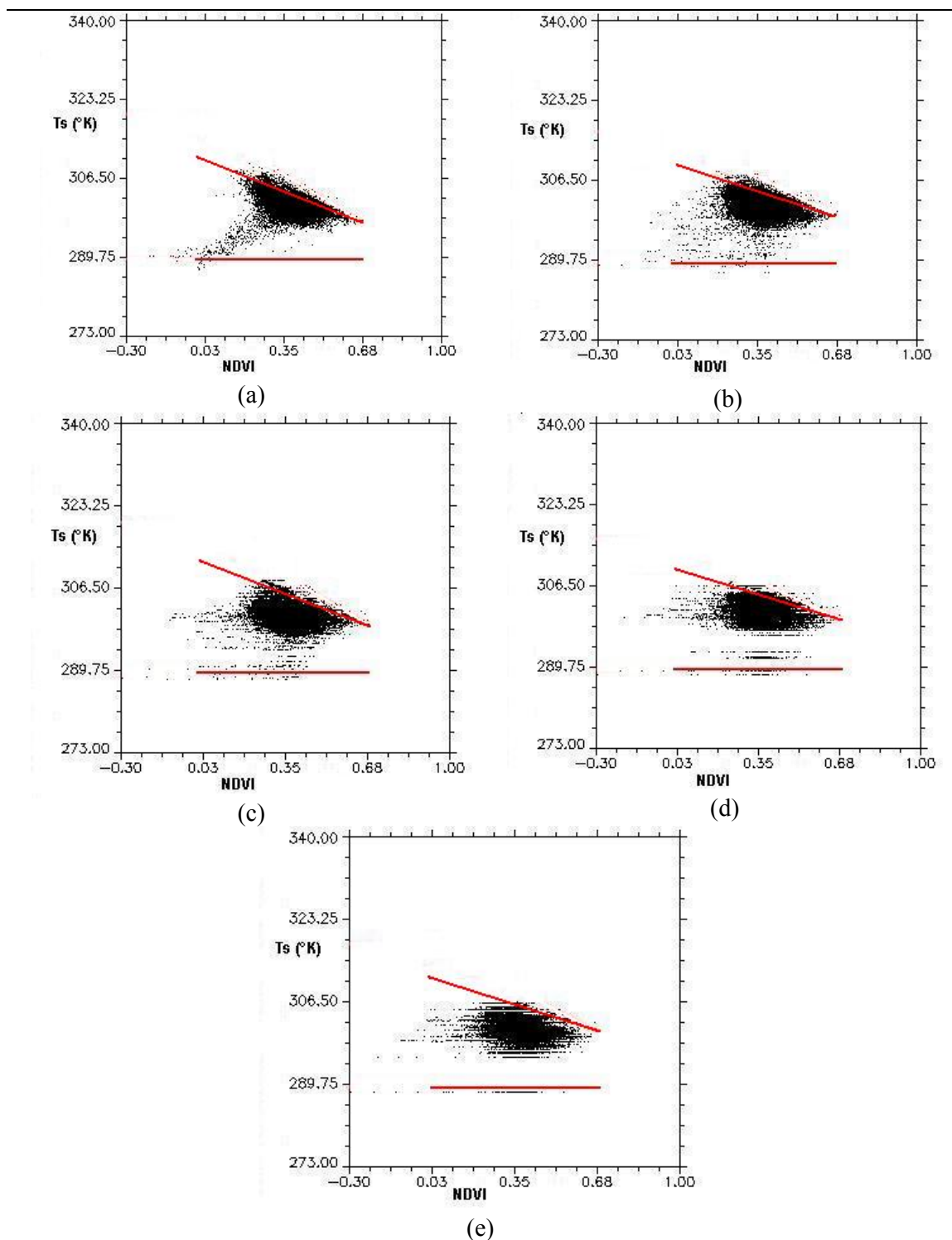
(d)



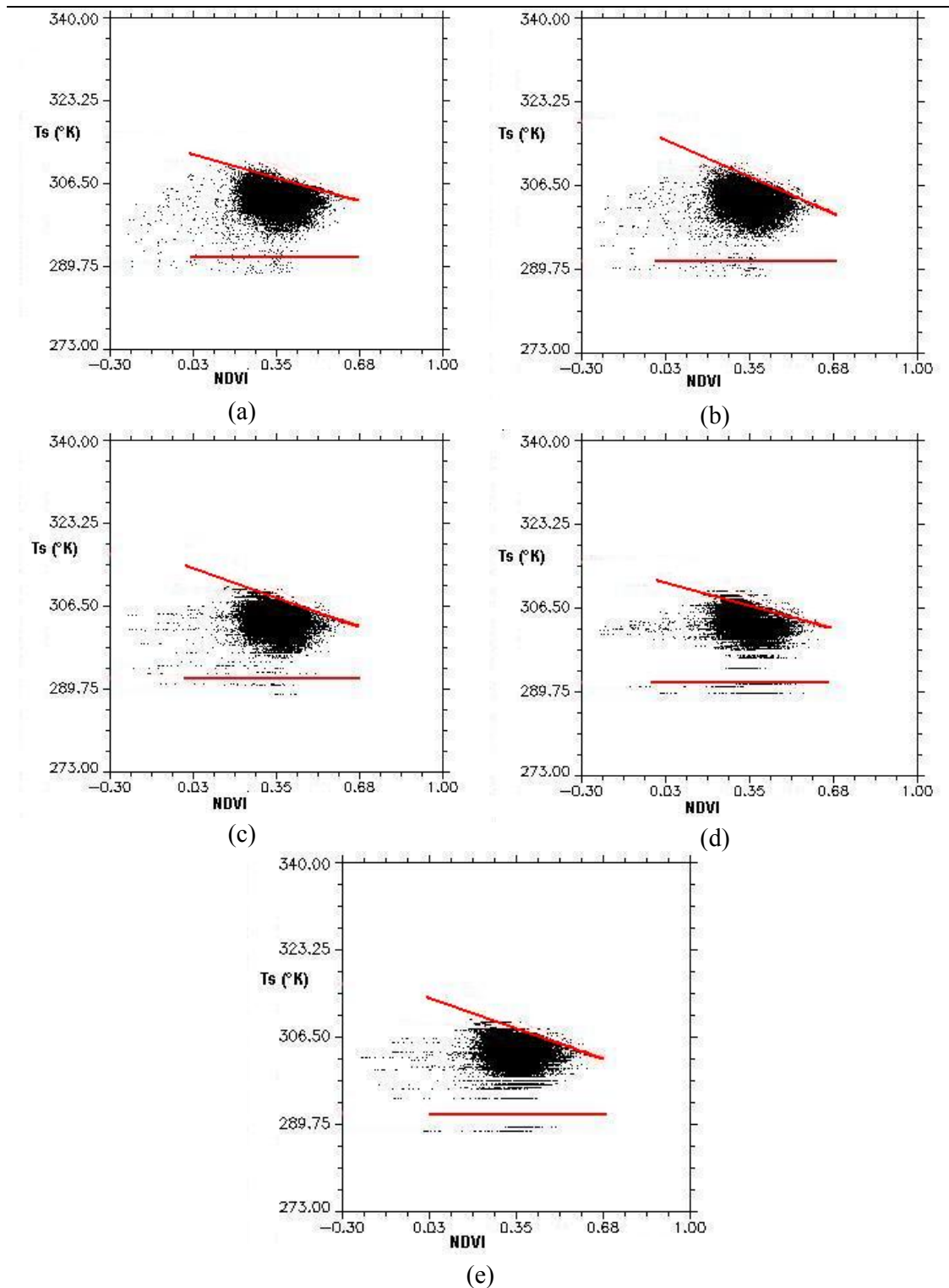
(e)

Día 266/2004

Continuación Figura N° 4.20: Diagramas triangulares NDVI- T_s obtenidos con T_{\min} constante para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km.

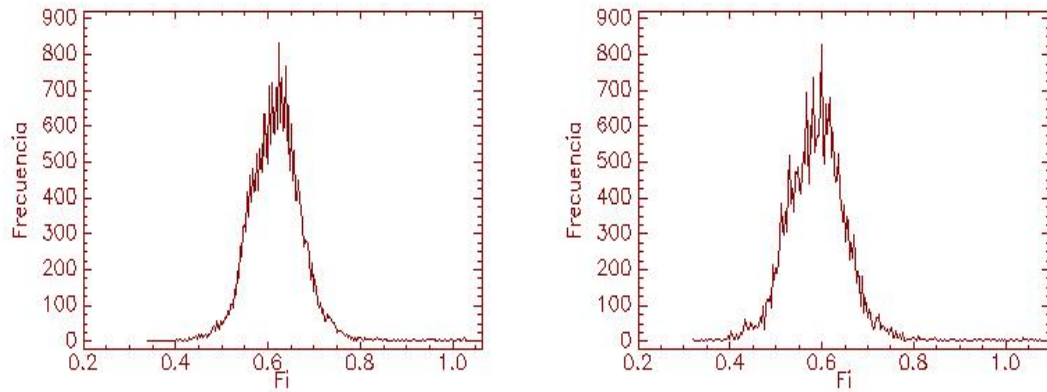


Día 259/2004



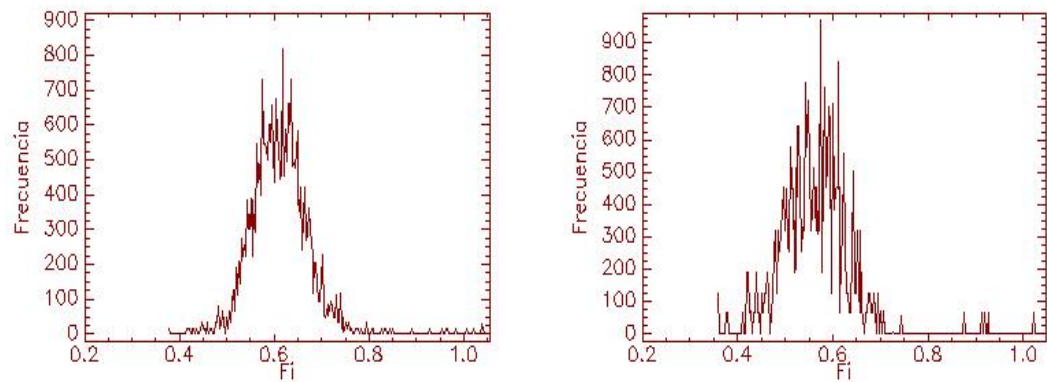
Día 266/2004

Continuación Figura N° 4.22: Histogramas de frecuencia de ϕ con T_{\min} constante para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km.



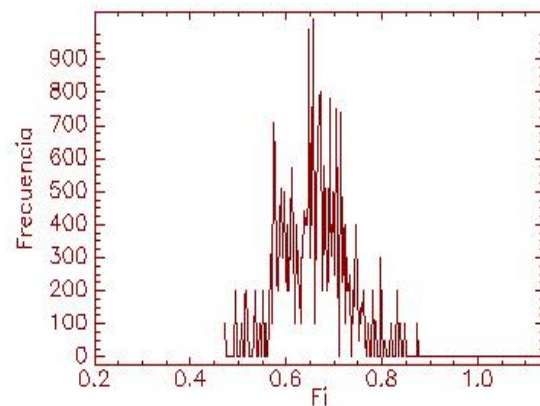
(a)

(b)



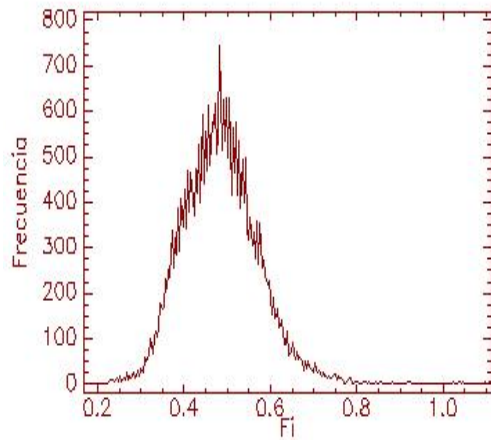
(c)

(d)

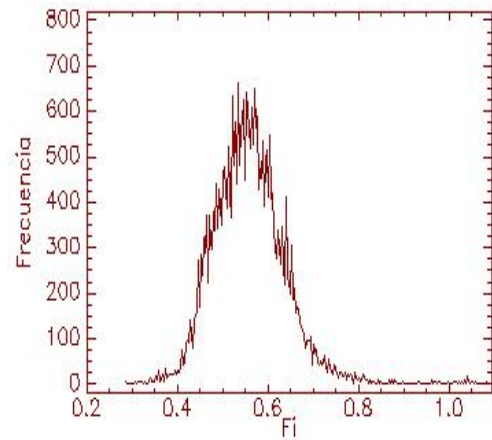


(e)

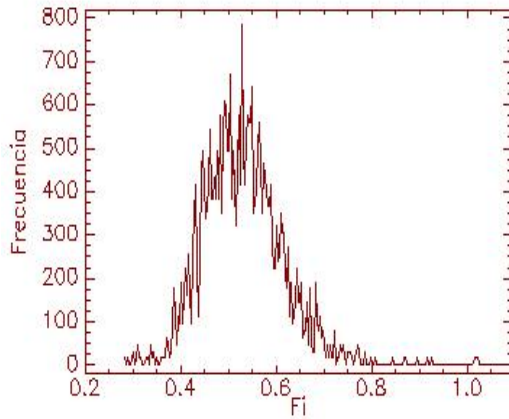
Día 259/2004



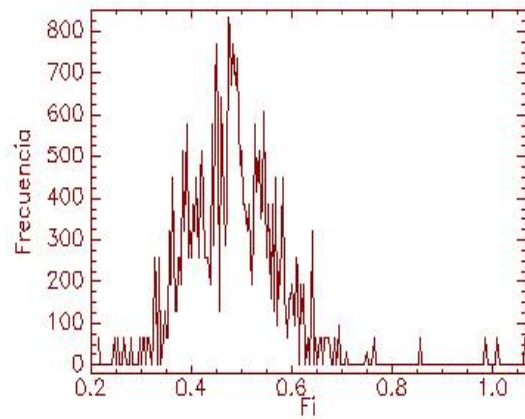
(a)



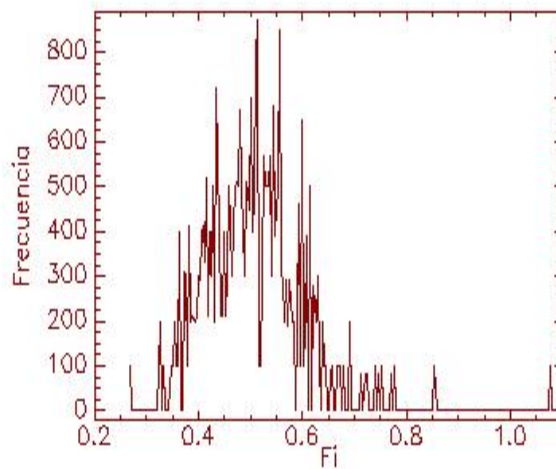
(b)



(c)



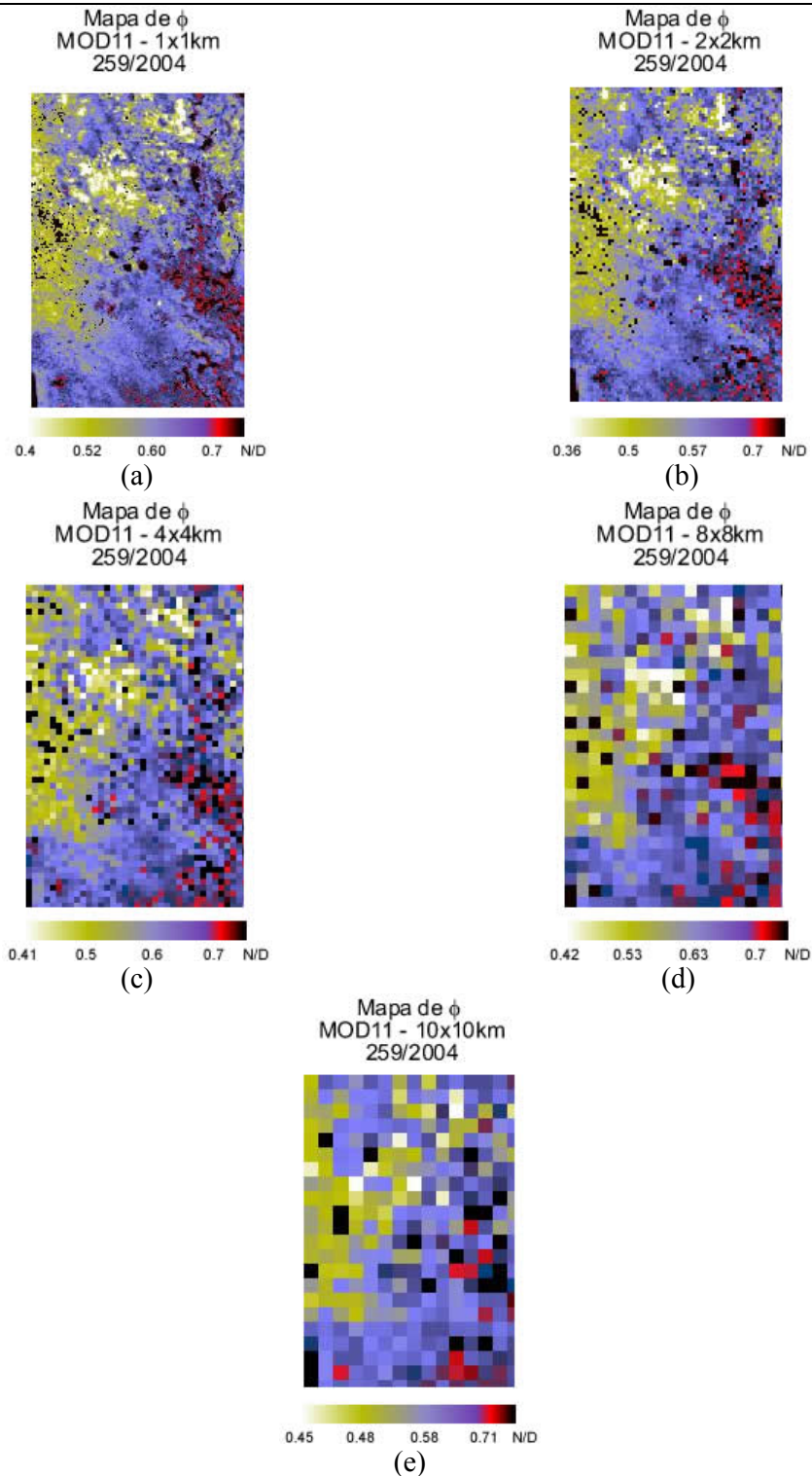
(d)



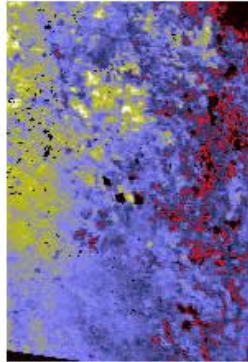
(e)

Día 266/2004

Continuación Figura N° 4.23: Imágenes de ϕ con T_{\min} constante para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km.



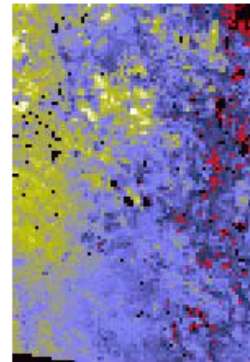
Mapa de ϕ
MOD11 - 1x1km
266/2004



0.24 0.34 0.48 0.63 N/D

(a)

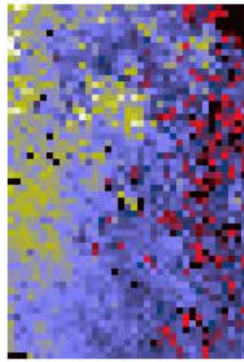
Mapa de ϕ
MOD11 - 2x2km
266/2004



0.31 0.42 0.54 0.66 N/D

(b)

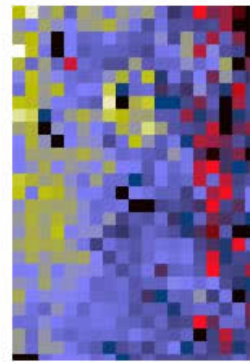
Mapa de ϕ
MOD11 - 4x4km
266/2004



0.3 0.4 0.51 0.66 N/D

(c)

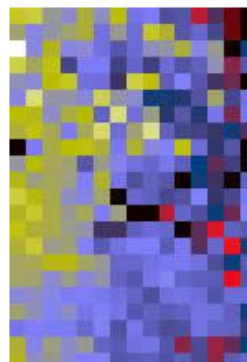
Mapa de ϕ
MOD11 - 8x8km
266/2004



0.25 0.34 0.46 0.61 N/D

(d)

Mapa de ϕ
MOD11 - 10x10km
266/2004

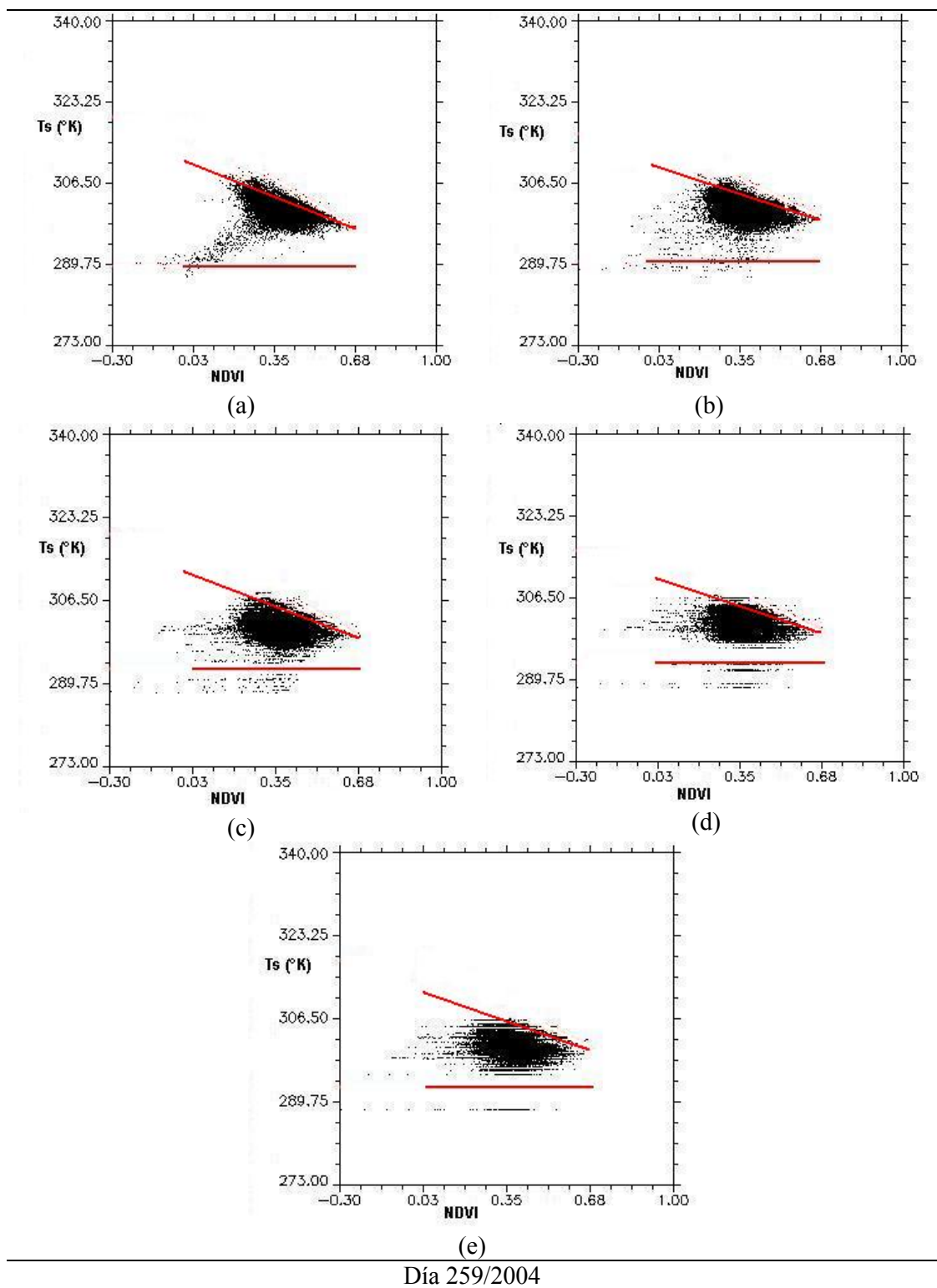


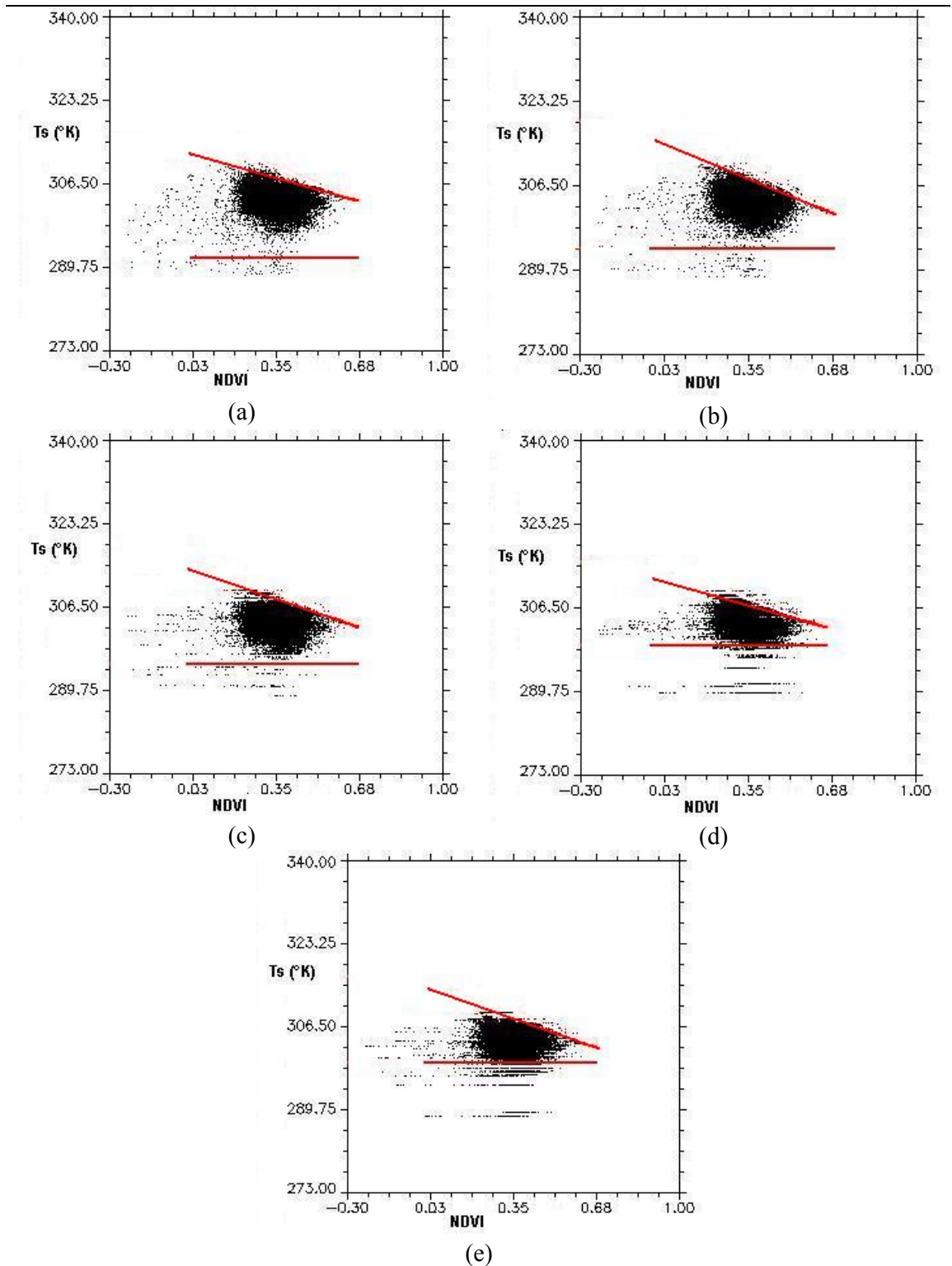
0.26 0.37 0.51 0.66 N/D

(e)

Día 266/2004

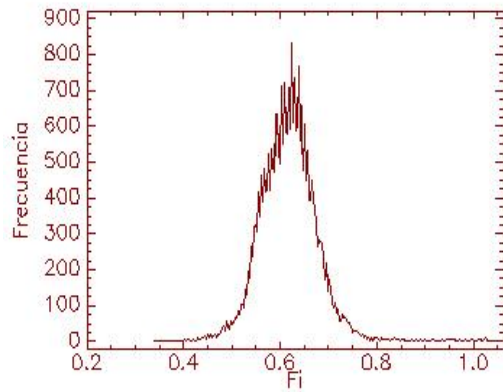
Continuación Figura N° 4.24: Diagramas triangulares NDVI- T_s con T_{\min} variable para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km.



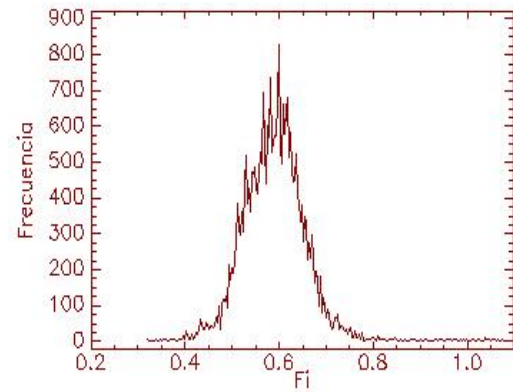


Día 266/2004

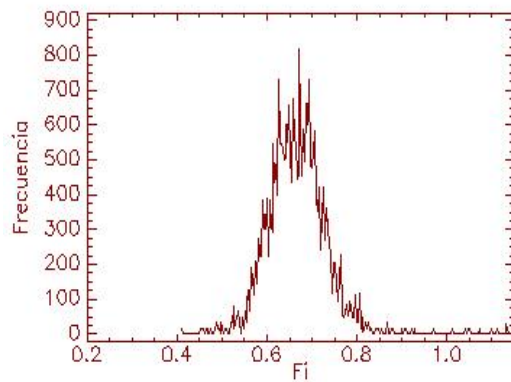
Continuación Figura N° 4.26: Histogramas de frecuencia de ϕ con T_{\min} variable para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km.



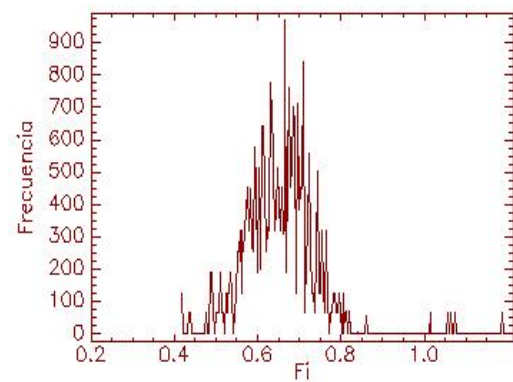
(a)



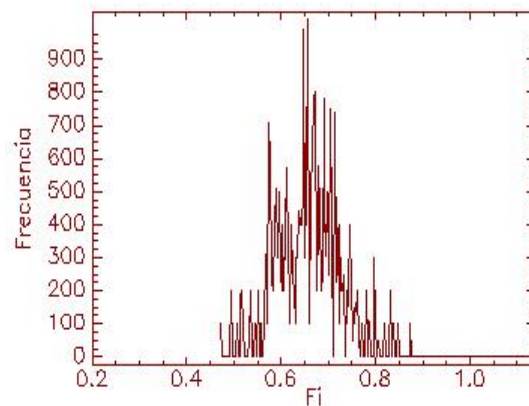
(b)



(c)

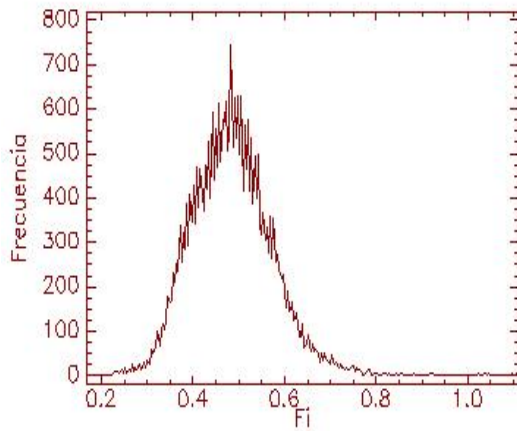


(d)

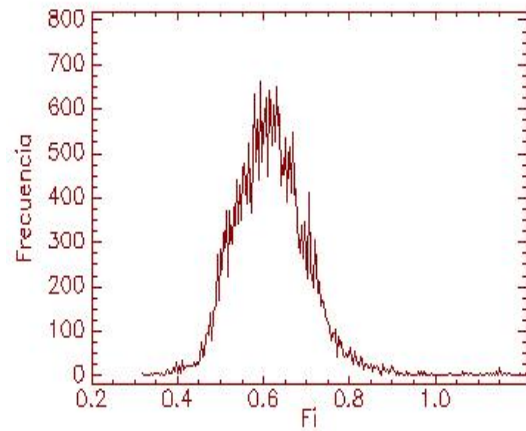


(e)

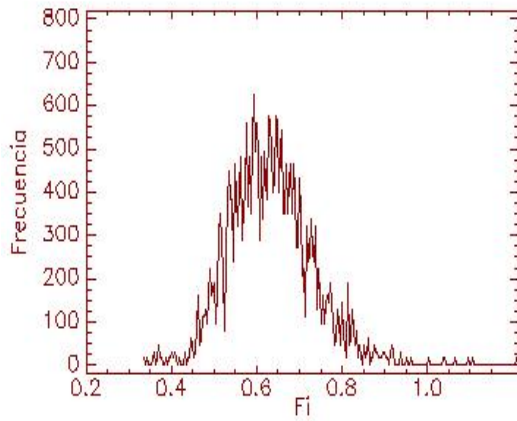
Día 259/2004



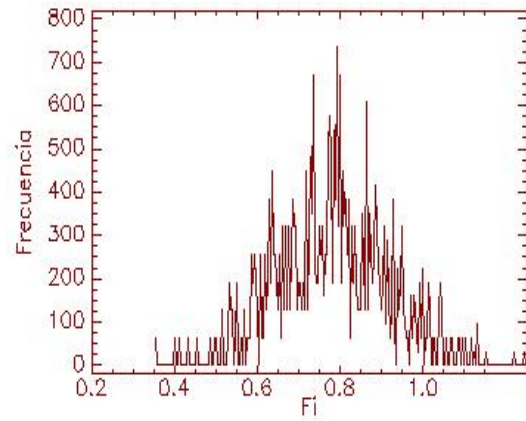
(a)



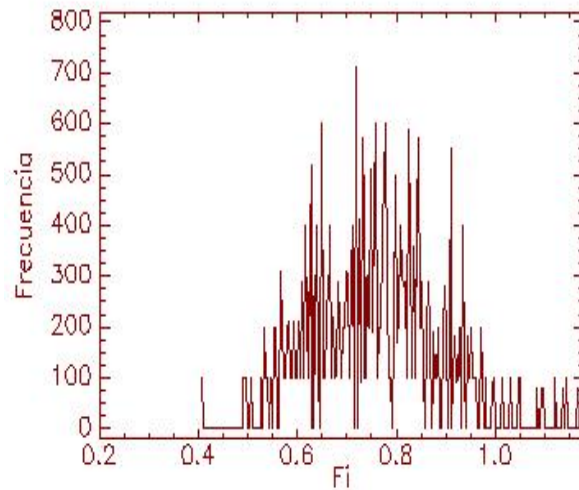
(b)



(c)



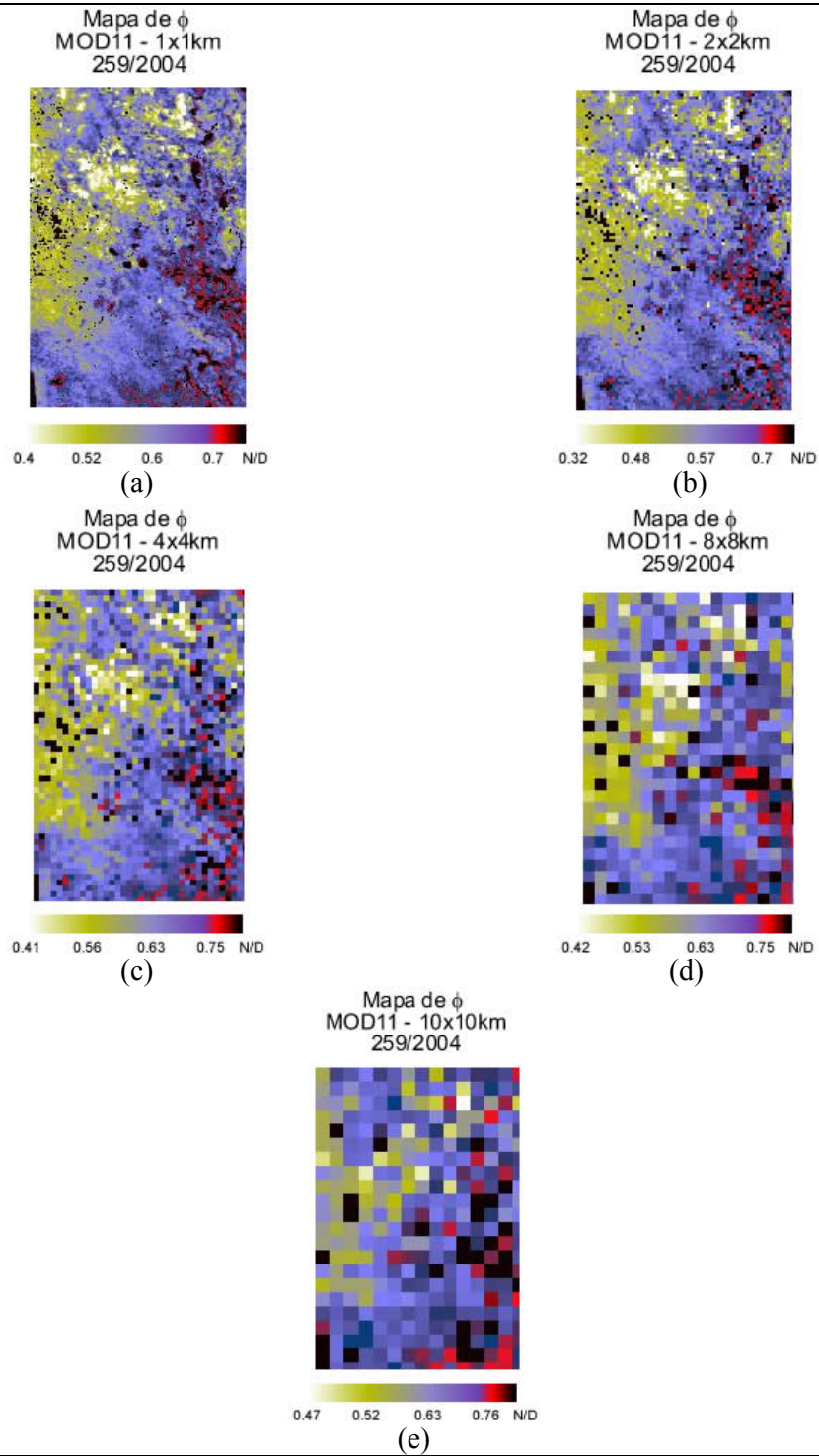
(d)



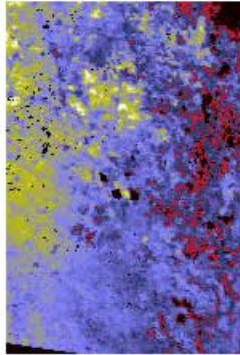
(e)

Día 266/2004

Continuación Figura N° 4.27: Imágenes de ϕ con T_{\min} variable para resoluciones: (a) 1x1 km (b) 2x2 km (c) 4x4 km (d) 8x8 km (e) 10x10 km.



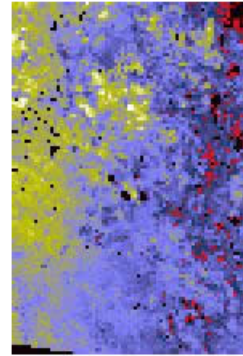
Mapa de ϕ
MOD11 - 1x1km
266/2004



0.24 0.34 0.48 0.63 N/D

(a)

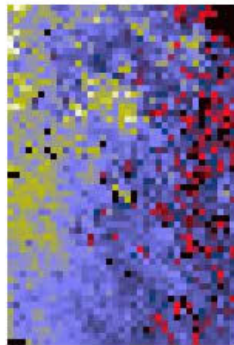
Mapa de ϕ
MOD11 - 2x2km
266/2004



0.31 0.42 0.54 0.66 N/D

(b)

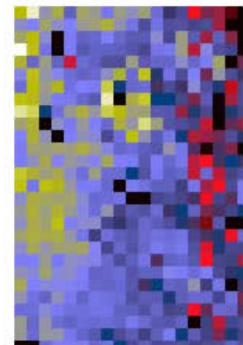
Mapa de ϕ
MOD11 - 4x4km
266/2004



0.3 0.4 0.51 0.66 N/D

(c)

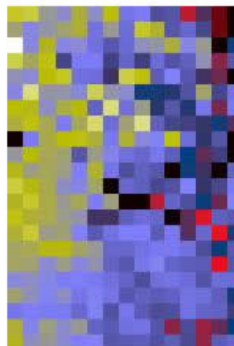
Mapa de ϕ
MOD11 - 8x8km
266/2004



0.25 0.34 0.46 0.61 N/D

(d)

Mapa de ϕ
MOD11 - 10x10km
266/2004



0.26 0.37 0.51 0.66 N/D

(e)

Día 266/2004