

DESARROLLO DE UN MODELO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN EN CULTIVOS DE COBERTURA INCOMPLETA: APLICACIÓN AL VIÑEDO




M^a del Mar Artigao Castillo

Dpto de Física Aplicada

Universidad de Castilla-La Mancha

Definición de evapotranspiración

- La evapotranspiración (ET) es la suma de la transpiración de la planta más la evaporación del suelo. Se mide en mm/día.
- Con la evapotranspiración se describe el proceso total de **transferencia** de agua a la atmósfera desde suelos con vegetación.
- El control diario de la evapotranspiración permite **optimizar** los recursos hídricos disponibles en zonas semi-áridas.
- Permite **predecir** la producción de la cosecha y el rendimiento de los cultivos  **Planificación** de las exportaciones e importaciones agrícolas de cada país.

- ✓ **Evapotranspiración de referencia (ET_o)**: Evapotranspiración de una superficie extensa de un cultivo sano que cubre totalmente el suelo y está siempre bien abastecido de agua (Rosenberg, 1974).
- ✓ **Evapotranspiración máxima (ET_m)**: Se define como la tasa de evapotranspiración de un cultivo sano, que crece en grandes campos y en condiciones óptimas de ordenación y riego (Doorembos y Kasam, 1980).
- ✓ **Evapotranspiración real (ET)**: Tasa de evapotranspiración igual o menor que la ET_m prevista en función del nivel de humedad del suelo, de la salinidad, tamaño del campo u otras causas.

I **Primer método:** Adaptación para teledetección del modelo de radiación propuesto por Dooremos y Kassam (1980). Válido para cultivos homogéneos (maíz o cebada). La ET se determina mediante la siguiente relación (Caselles et al, 1992)

$$ET_m = k_c[(AT_a + B)R_g + C]$$

- k_c es el coeficiente de cultivo,
- T_a es el valor máximo de la temperatura del aire,
- R_g es el valor diario de la radiación solar global, y
- A , B y C son coeficientes empíricos específicos para cada región.

II Segundo método: Basado en la relación propuesta por Jackson et al (1977):

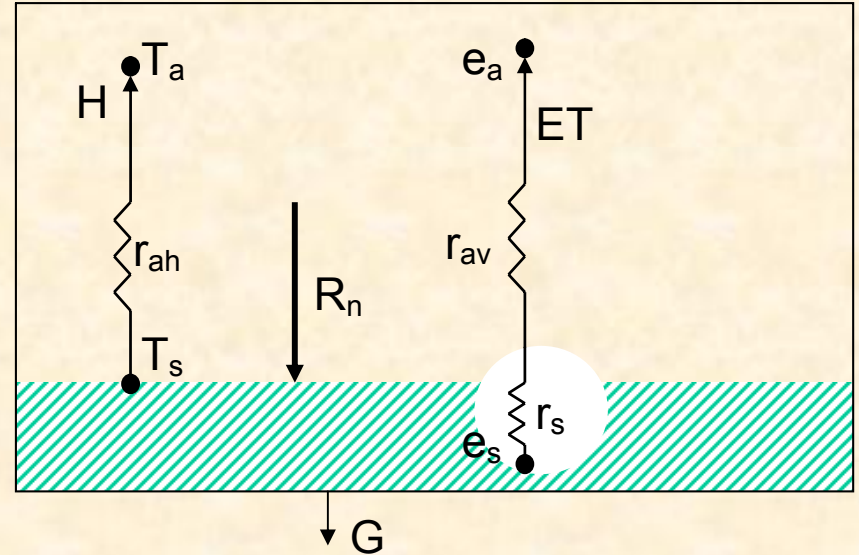
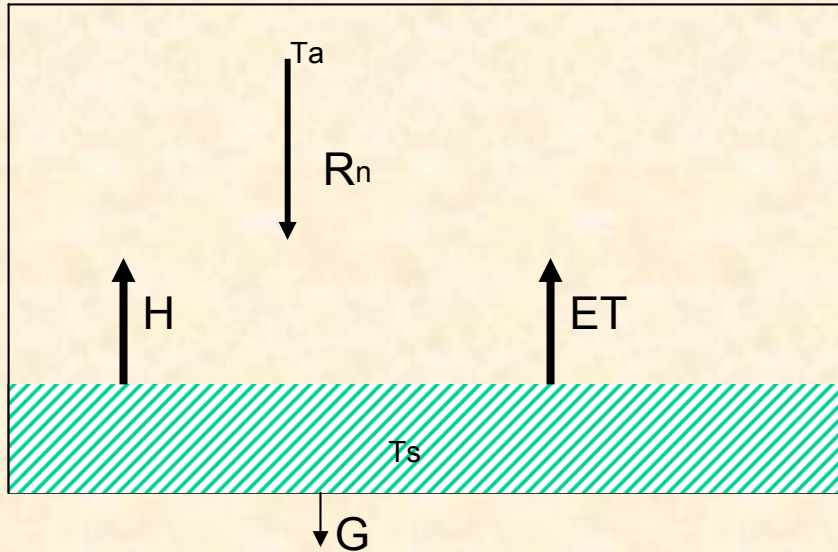
$$ET = Rn + B(Ta - Ts)$$

- **Rn** es el valor diario de radiación neta,
- **(Ta-Ts)** es la diferencia de temperatura entre el aire y la superficie del cultivo, obtenida al mediodía, y
- **B** es una constante semiempírica. Se evalúa adoptando un modelo de resistencias para el intercambio de flujos en el sistema suelo-planta-atmósfera.

Factores que influyen en la estimación de la ET utilizando técnicas de teledetección

1. Modelización adecuada del balance de energía para cada cultivo.
2. Superposición de imágenes de distintos sensores.
3. Identificación de los cultivos de interés dentro de la zona de estudio.
4. Cálculo preciso de la temperatura.

1. Modelos de resistencias



donde:

▲ H es el flujo de calor sensible

▲ ET es el flujo de calor latente (evapotranspiración)

▲ R_n es la radiación neta

▲ G es el flujo geotérmico

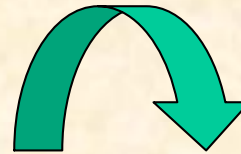
$$R_n + G + H + ET = 0$$

$$H = \rho c_p \frac{\Delta T}{r_a}$$

$$ET = \frac{\rho c_p}{\gamma} \frac{e_a - e_s}{r_a + r_s}$$



Cálculo de la evapotranspiración



$$ET_d = R_{nd} + B (T_a - T_s)_i$$

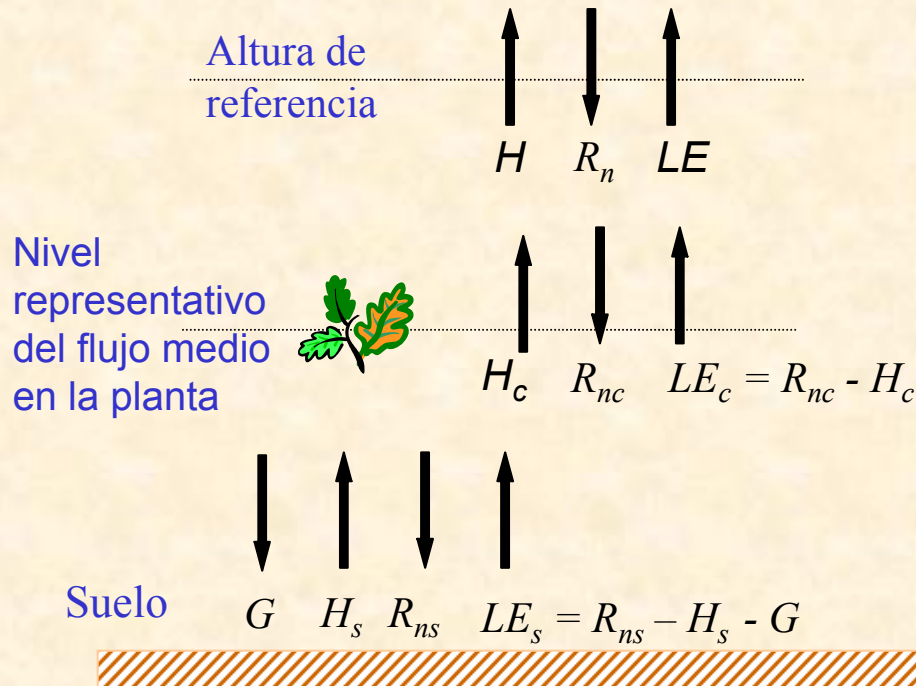
B Coeficiente medio de intercambio

$$B = \frac{R_{nd}}{R_{ni}} \frac{\rho c_p}{r_a^*}$$

Depende de la
modelización de H

➔ **Modelo de dos capas:** Considera la interacción entre suelo y vegetación

Válido para cultivos con cobertura completa o dispersa

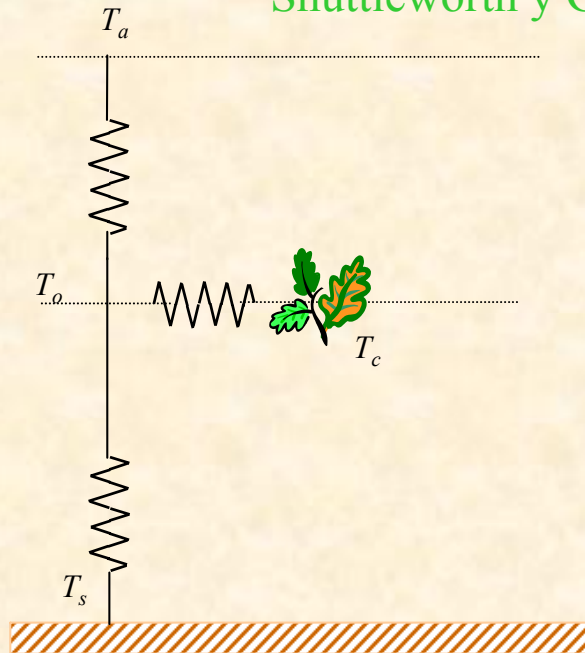


$$H = H_c + H_s$$

Asociación de resistencias

Serie Chodhury y Monteith (1988)

Shuttleworth y Gurney (1989)



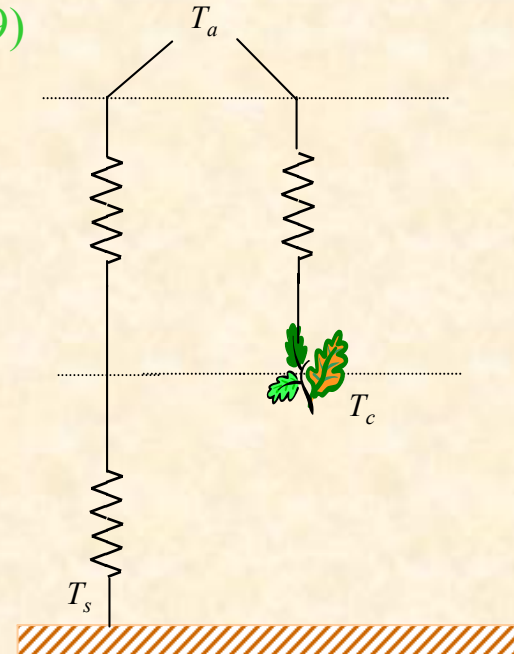
(a)

$$H_c = \rho c_p \frac{T_c - T_o}{r_a^c}$$

$$H_s = \rho c_p \frac{T_s - T_o}{r_a^s}$$

$$H = \rho c_p \frac{T_o - T_a}{r_a^a}$$

Paralelo Norman et al (1996)



(b)

$$H_s = \rho c_p \frac{T_s - T_a}{r_a^a + r_a^s}$$

$$H_c = \rho c_p \frac{T_c - T_a}{r_a^a}$$

Desarrollo del modelo bicapa

Suponiendo la asociación de resistencias en serie

I

Cálculo de la temperatura aerodinámica

Suma de flujos de calor sensible de los dos focos

$$T_o = \frac{r_a^a r_a^s T_c + r_a^a r_a^c T_s + r_a^c r_a^s T_a}{r_a^a r_a^c + r_a^a r_a^s + r_a^c r_a^s}$$

$$\frac{T_o - T_a}{r_a^a} = \frac{T_c - T_o}{r_a^c} + \frac{T_s - T_o}{r_a^s}$$

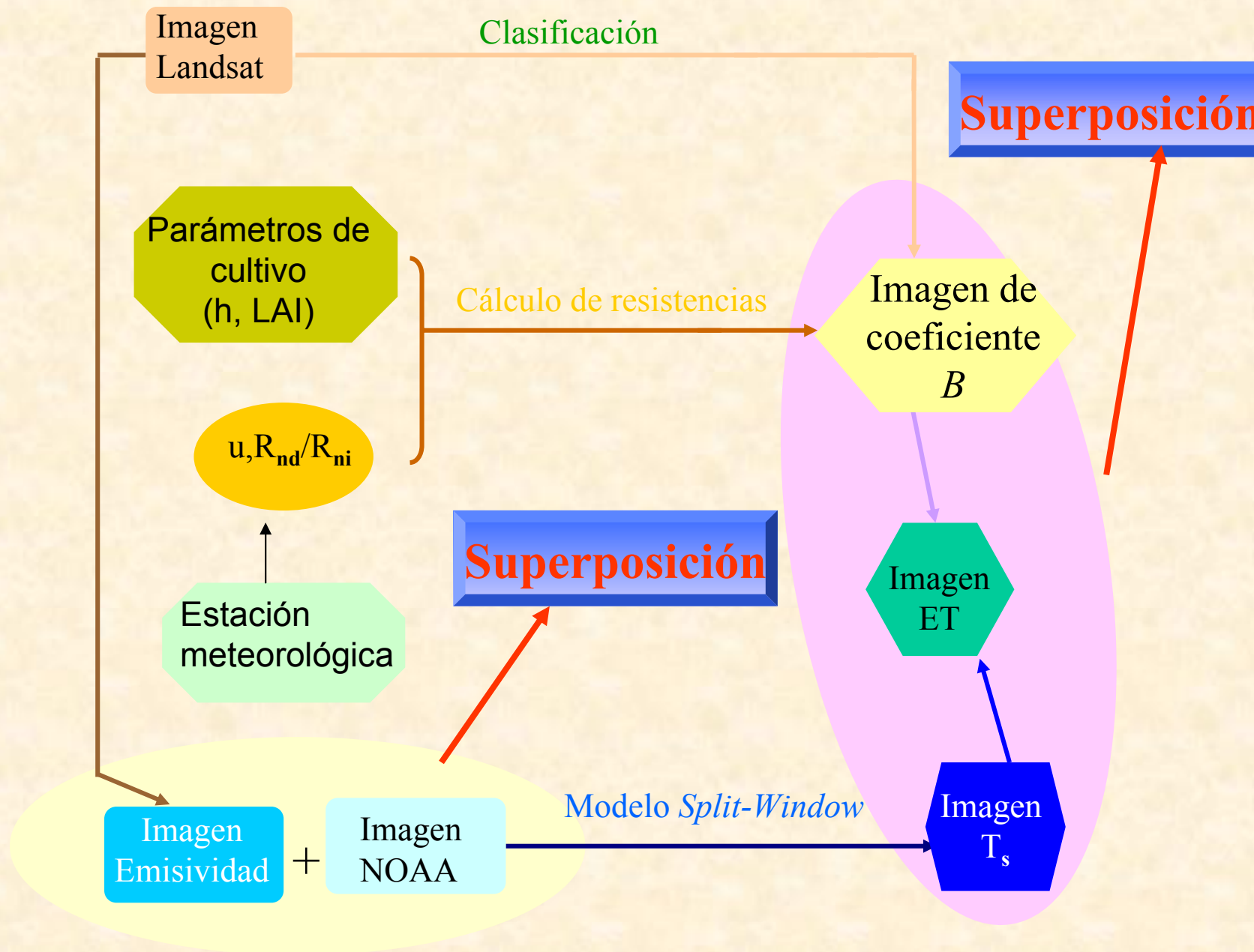
II Cálculo de la resistencia equivalente

Introduciendo la temperatura radiativa

$$T_{rad} = T_c P_v + T_s (1 - P_v)$$

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

Aplicación operativa del modelo



Selección de sensores

	Landsat-TM	NOAA-AVHRR
Ventajas	<ul style="list-style-type: none">• Resolución espacial adecuada• Respuesta espectral• Clasificación	<ul style="list-style-type: none">• Buena sensibilidad térmica• Aplicación <i>split-window</i>• Coste económico bajo
Inconvenientes	<ul style="list-style-type: none">• Poca sensibilidad en el térmico• Hora de paso inadecuada• Elevado coste económico	<ul style="list-style-type: none">• Baja resolución espacial• Corrección geométrica complicada

2. Superposición de imágenes

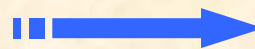
Algoritmo de corrección
geométrica basado en
puntos de control



Válido a escala
Landsat

METODOLOGÍA

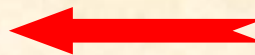
Corrección geométrica de
la imagen Landsat



Corrección geométrica
de la imagen NOAA-
AVHRR respecto de la
Landsat

Técnicas de
correlación

Posterior ajuste de la
corrección



Zona de
Tomelloso

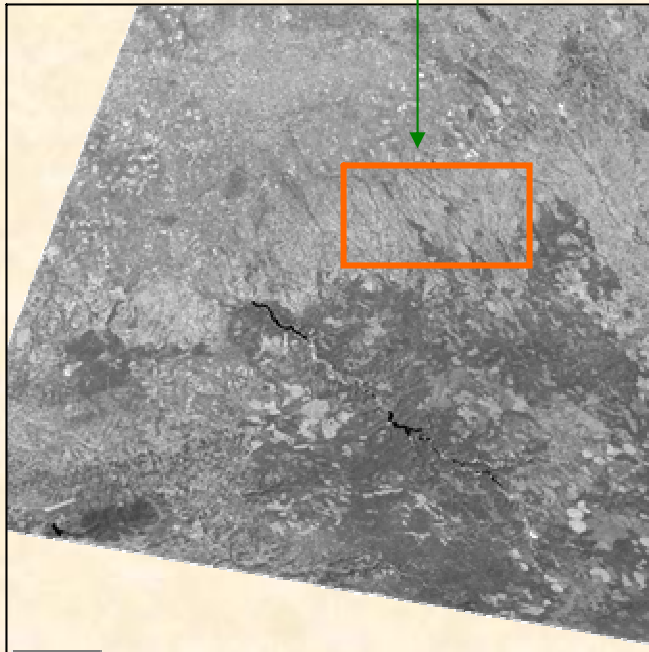


Imagen Landsat

Corregida

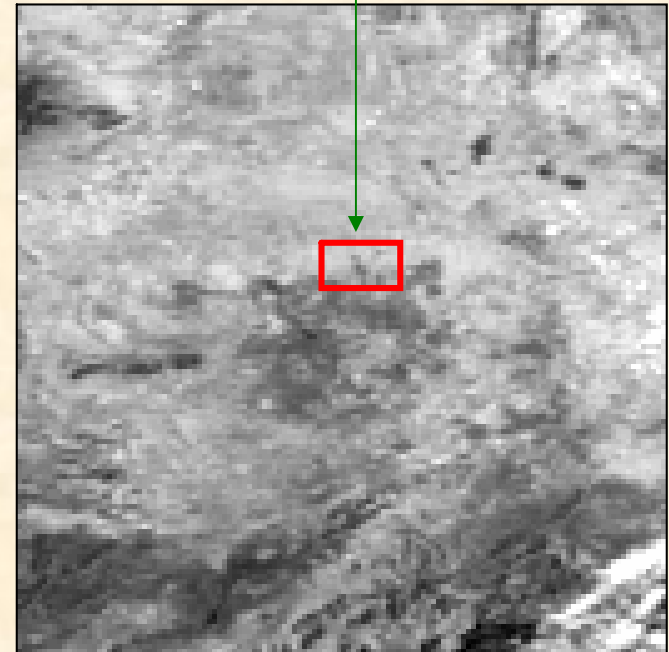


Imagen NOAA-AVHRR

Deformada

Efecto de la degradación de la imagen Landsat



Origen (0,0)



Origen (18,18)

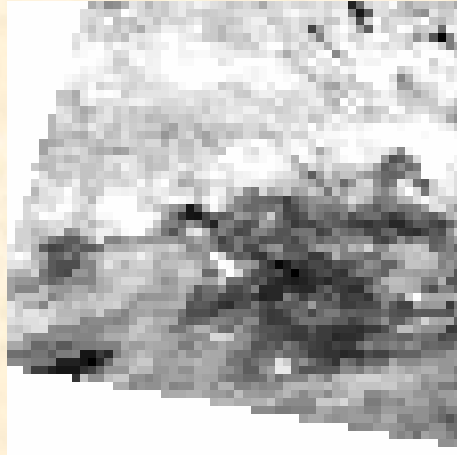


Origen (18,0)

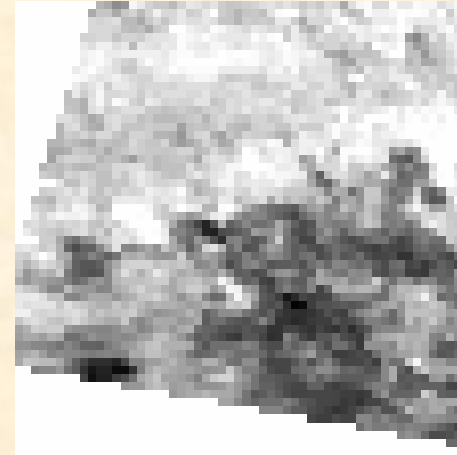


Origen (0,18)

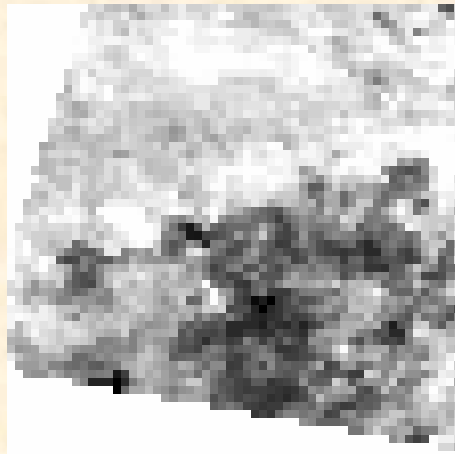
Imágenes NOAA corregidas respecto de las cuatro degradaciones



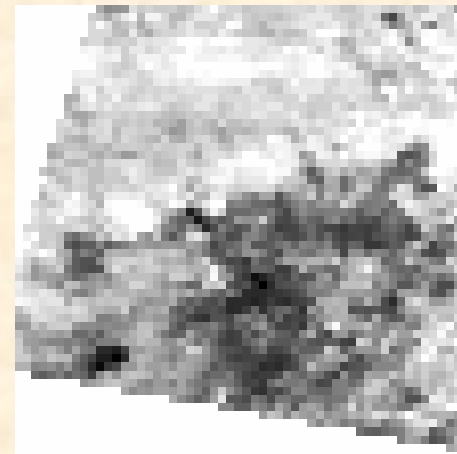
Corrección 1



Corrección 2



Corrección 3

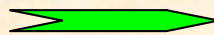


Corrección 4

Método para elegir la imagen NOAA que más se parece a la Landsat original

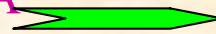
Técnicas de correlación

- Autocorrelación de la imagen Landsat original



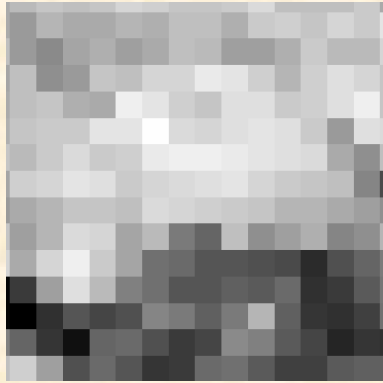
Pico de correlación máximo

- Correlación de las cuatro imágenes NOAA corregidas respecto de la Landsat original

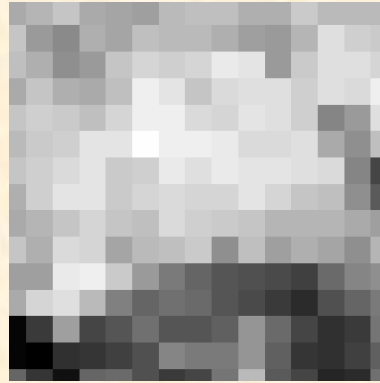


Elegimos aquella que tenga un pico de correlación más alto

Correlación entre imágenes



Corrección 1



Corrección 2

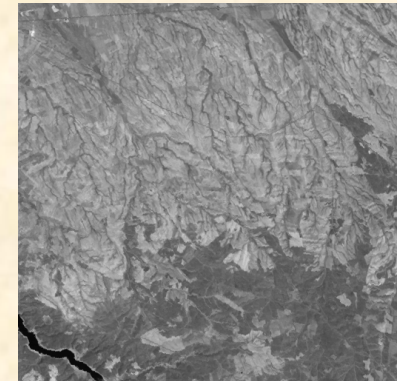
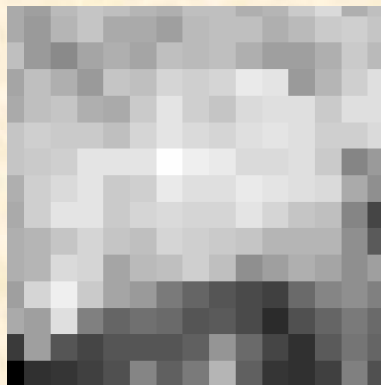


Imagen Landsat
original

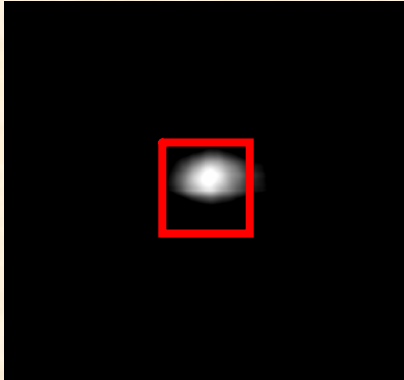


Corrección 3

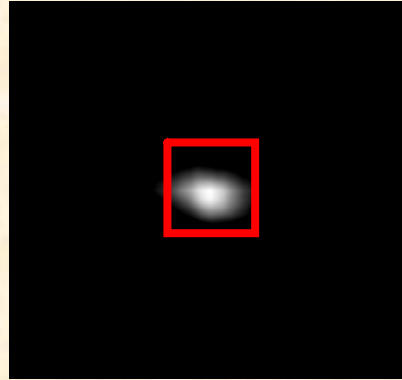


Corrección 4

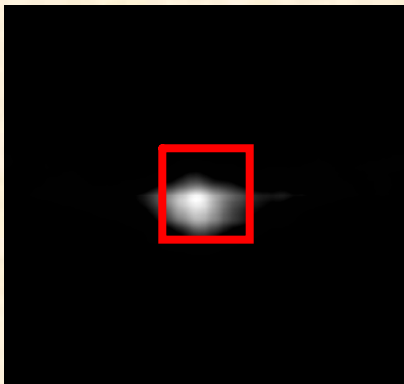
Localización del máximo de correlación



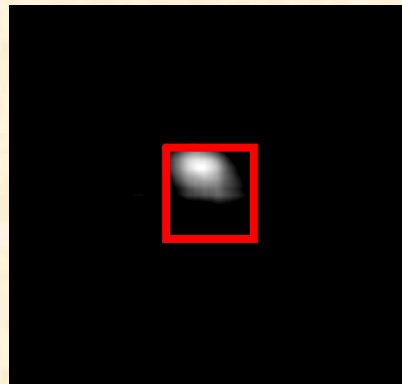
Correlación 1



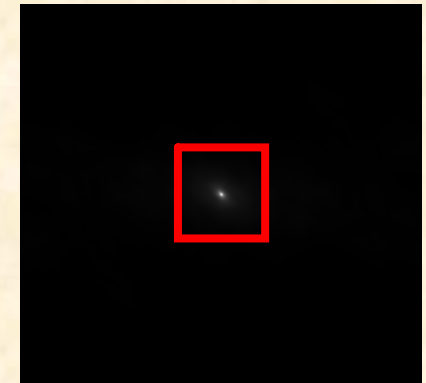
Correlación 2



Correlación 3



Correlación 4



Autocorrelación

Ajuste de la imagen NOAA corregida



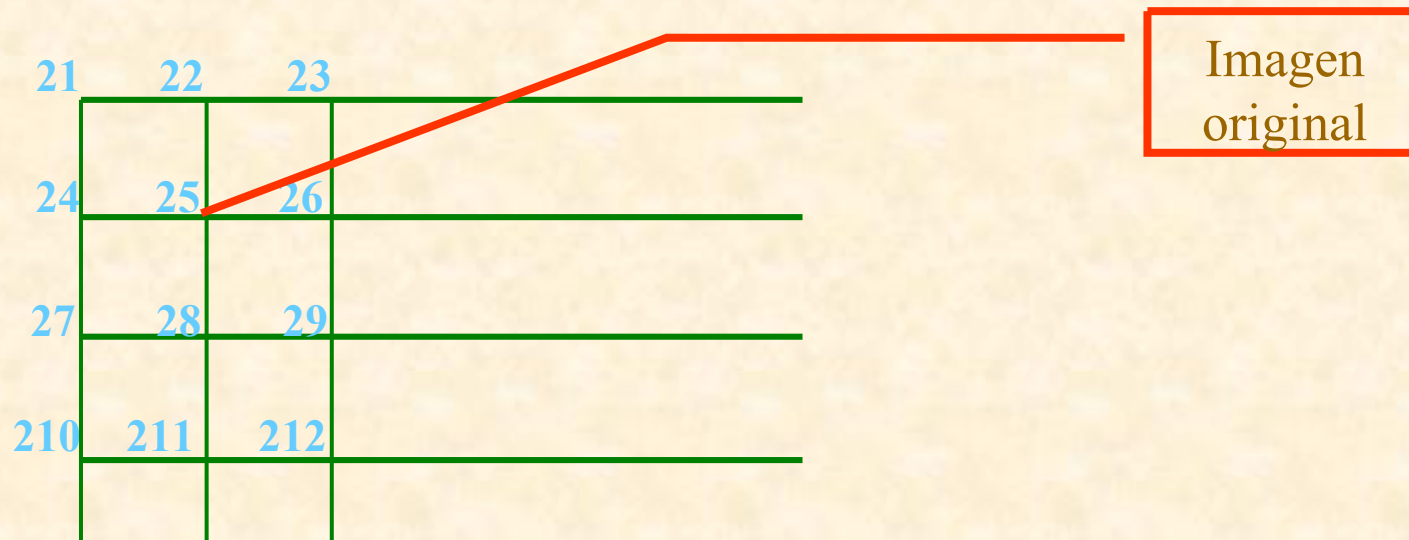
Método que proponemos

Mover la imagen NOAA en un intervalo adecuado en torno a un punto central.



Correlación mediante un filtro de Wiener entre la imagen Landsat original y las imágenes NOAA corregidas que se han obtenido

Ajuste en la corrección

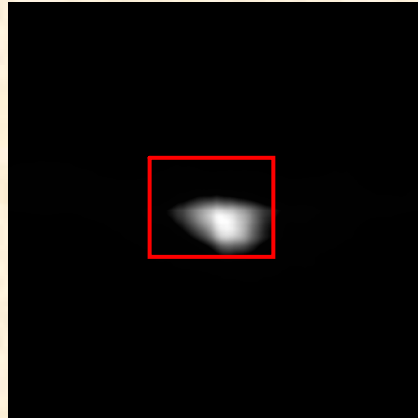


Seleccionamos nuevas imágenes moviéndonos en intervalos de (18,18) píxeles en torno a la imagen original y volvemos a correlacionar con la imagen Landsat original

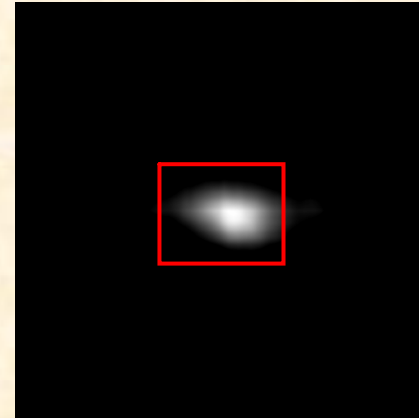
Resultados de las correlaciones

Filtro de Wiener	Autocorr.	Corr1	Corr2	Corr3	Corr4
Máximo	3,7	0,12	0,13	0,12	0,15
		Corr5	Corr6	Corr7	Corr8
		0,16	0,15	0,16	0,18
		Corr9	Corr10	Corr11	Corr12
		0,17	0,15	0,16	0,15

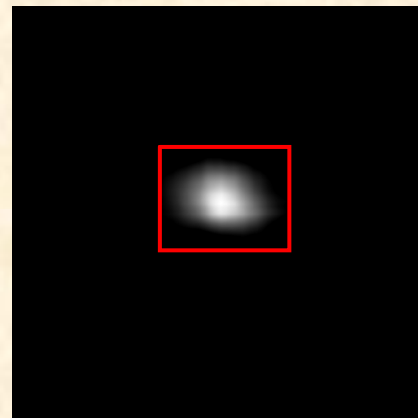
Localización del máximo de correlación



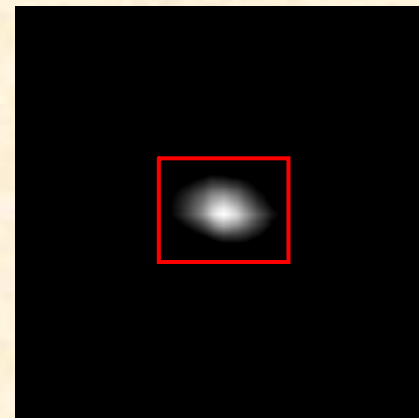
Correlación 1



Correlación 4



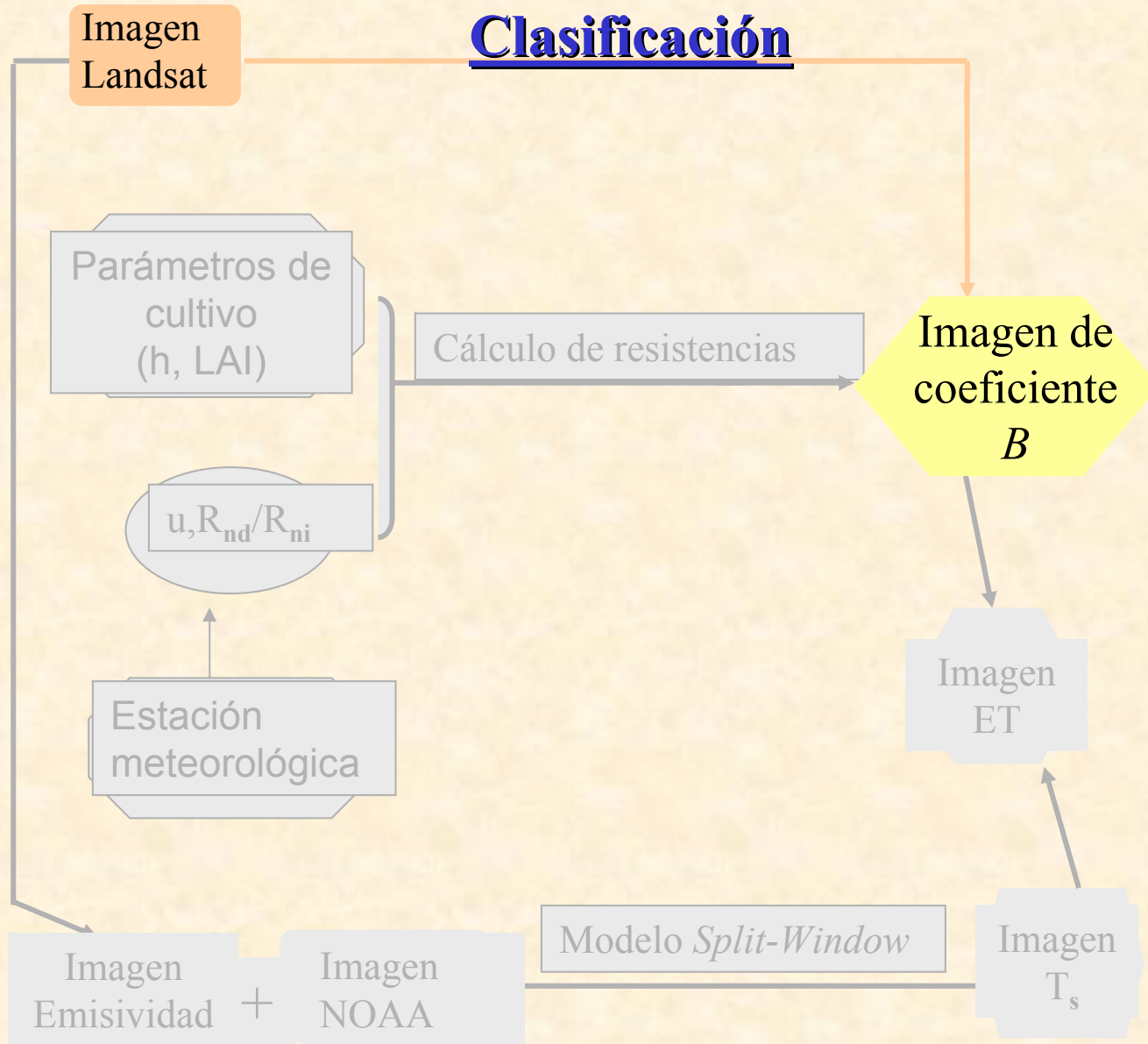
Correlación 11



Correlación 8



3. Identificación del cultivo



Relación entre clases informacionales y clases espectrales

**Categorías
informacionales**

**Categorías
espectrales**

Barbecho

Bar1
Bar2

Cereal

Cer1
Cer2
Cer3

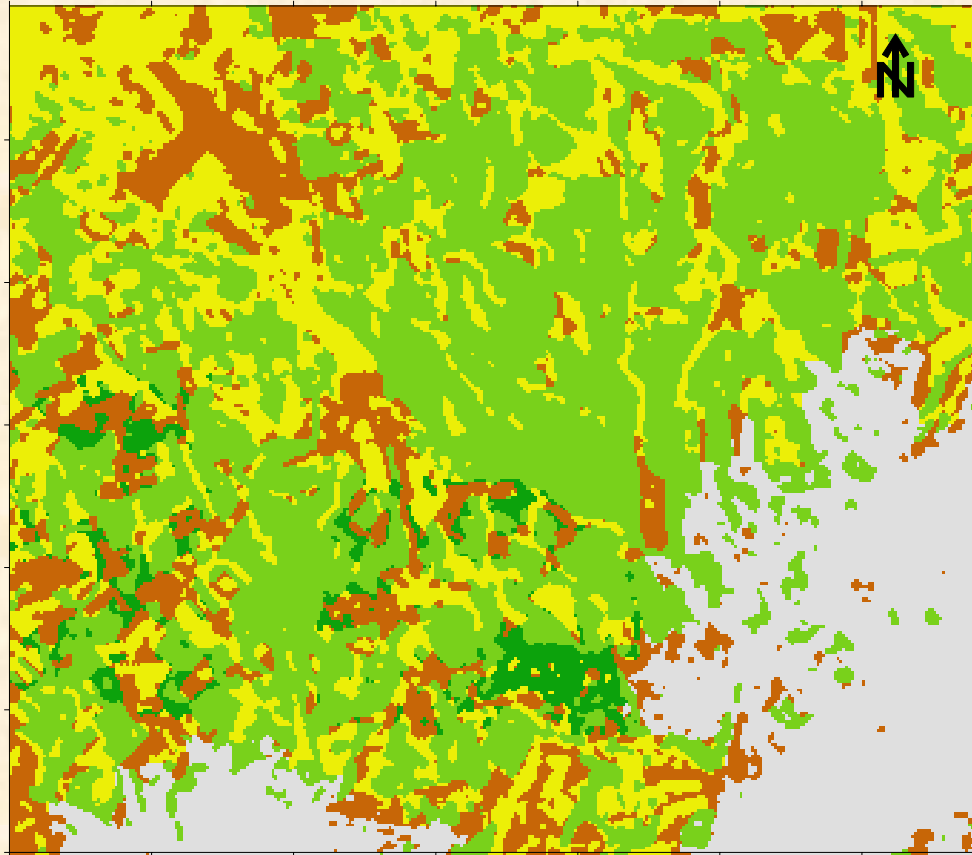
Olivo






Oli1

Vid

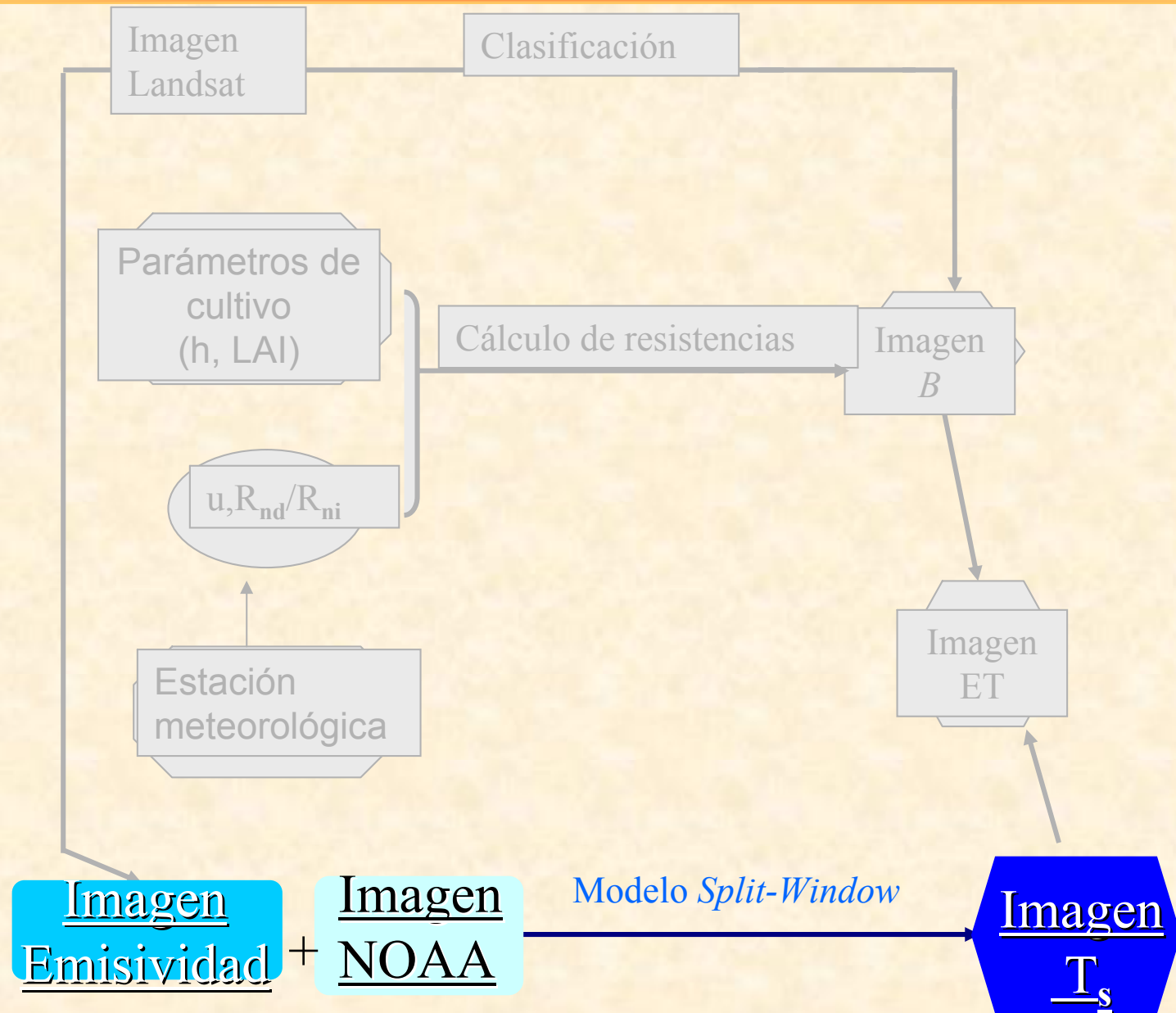
Vid1
Vid2

Imagen clasificada



				
Cereal	Barbecho	Olivo	Vid	Nubes

4. Cálculo de la temperatura

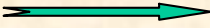


Cálculo de la emisividad

Paso previo  Estimación de la proporción de vegetación

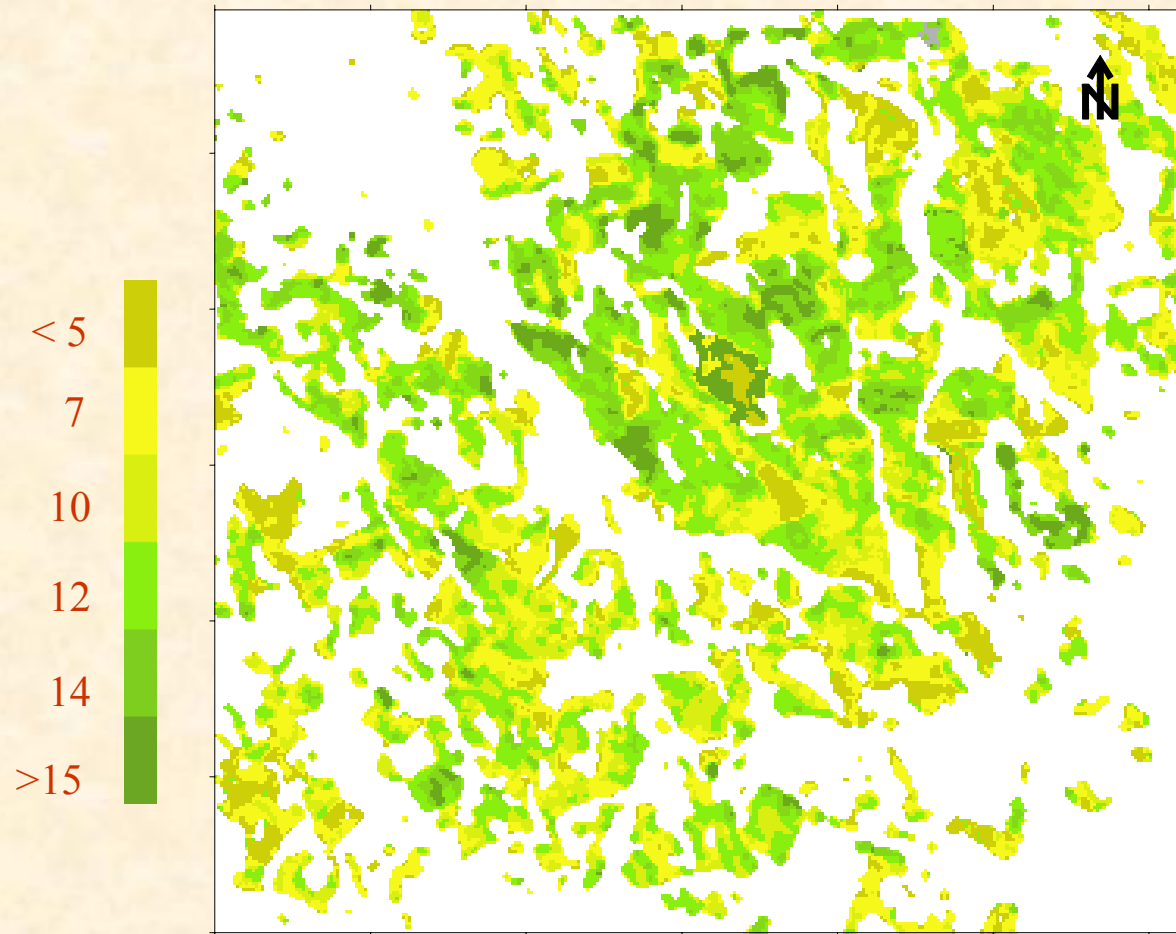
Asignando toda la variabilidad de la reflectividad en el suelo y adoptando como índice de vegetación el NDVI

$$P_V = 1 - \frac{(\rho_R - \rho_{cR})[\rho_{cR}(1 + NDVI) - \rho_{cIR}(1 - NDVI)]}{(\rho_{sR} - \rho_{cR})[(\rho_{IR} - \rho_{cIR})(1 - NDVI) - (\rho_R - \rho_{cR})(1 + NDVI)]}$$

ρ_{sR} se calcula a partir de datos de P_V medidos “*in situ*” 

$$\rho_{sR} = \frac{\rho_R - \overline{P_V} \rho_{cR}}{1 - \overline{P_V}}$$

Imagen de proporción de vegetación (%)



Cálculo de la temperatura



Superposición

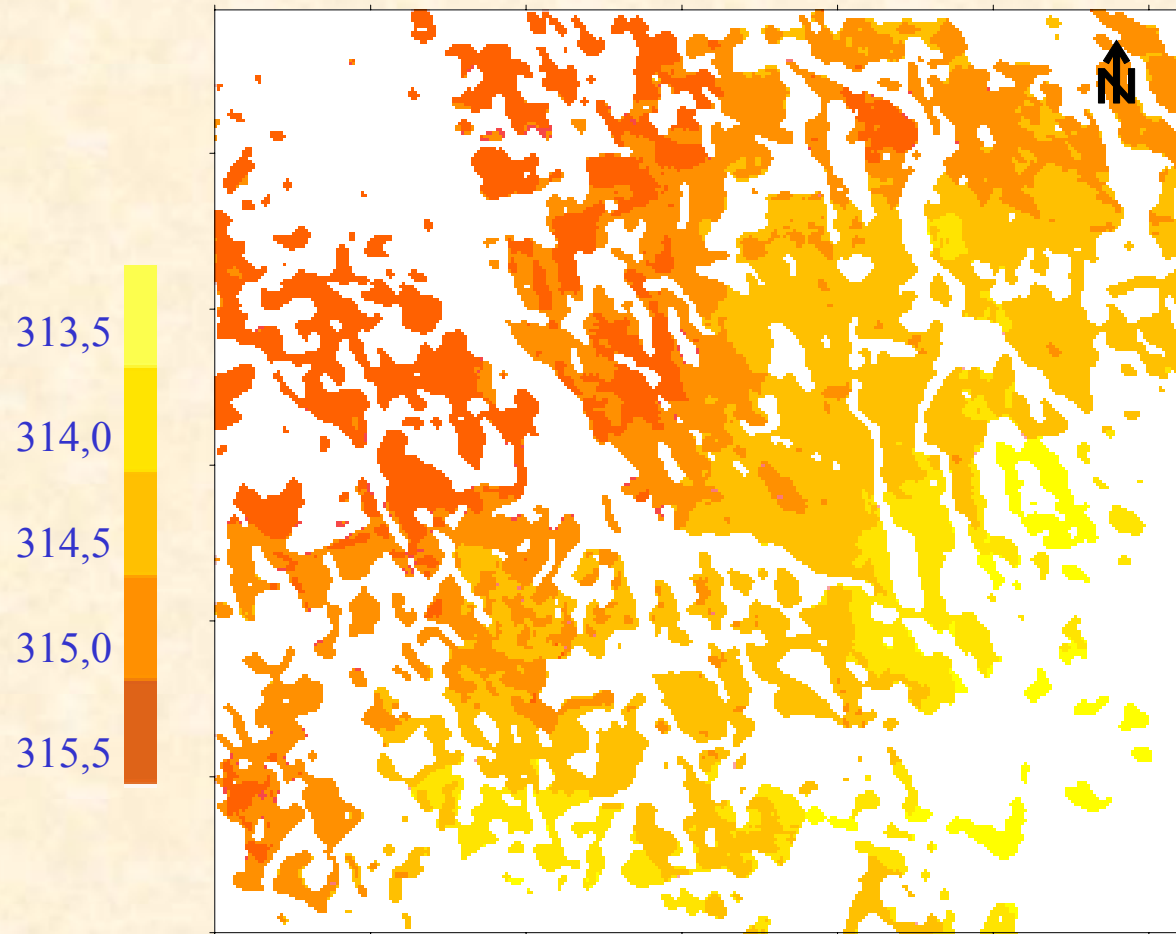
$$T = T_4 + A(T_4 - T_5) + \Delta + B(\varepsilon)$$

Escala NOAA

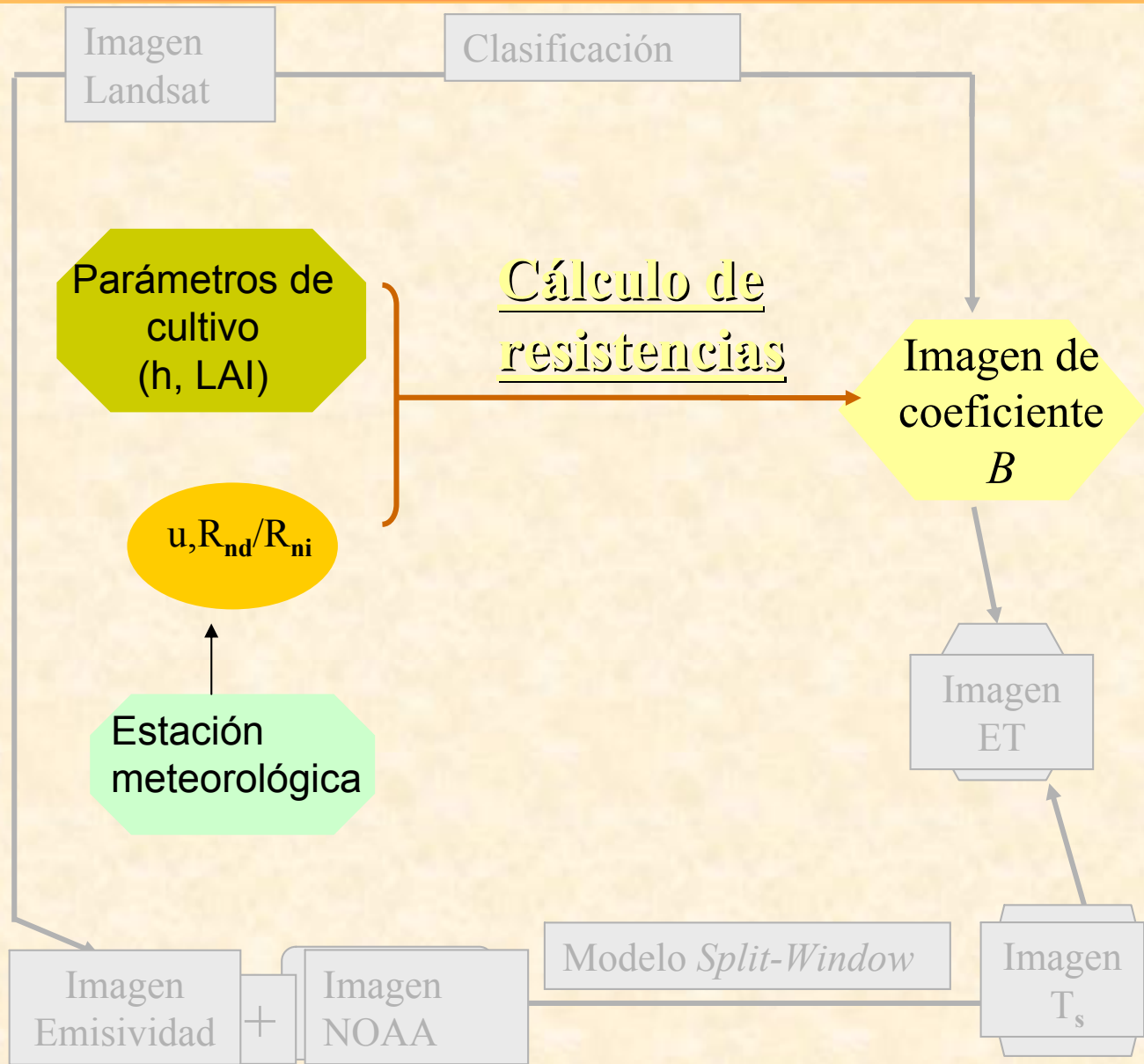
$$B(\varepsilon) = \alpha(1 - \varepsilon) - \beta\Delta\varepsilon$$

Escala Landsat

Imagen de temperatura (K)



Aplicación operativa del modelo



Determinación del coeficiente B

Resistencia
equivalente

- Resistencia aerodinámica del suelo
- Resistencia aerodinámica del cultivo
- Resistencia aerodinámica del aire



Chodhury y Monteith (1988)

Shuttleworth y Gurney (1989)

$$r_a^s = \frac{h \exp(n)}{n K(h)} \left[\exp\left(\frac{-n z_o'}{h}\right) - \exp\left(\frac{-n (d + z_o)}{h}\right) \right]$$

$$r_a^c = \left\{ LAI \left(\frac{0,02}{\alpha_u} \right) \sqrt{\frac{u(h)}{I_\omega}} \left[1 - \exp\left(-\frac{\alpha_u}{2}\right) \right] \right\}^{-1}$$

Cálculo de la resistencia y temperatura aerodinámica

$$r_a^a = \frac{1}{k^2 u} \operatorname{Ln} \left(\frac{z-d}{z_o} \right) \left(1 + 5g (z-d)(T_o - T_a) / (T_a u^2)^2 \right)$$



Proceso iterativo



$$T_o = \frac{r_a^a r_a^s T_v + r_a^a r_a^c T_s + r_a^c r_a^s T_a}{r_a^a r_a^c + r_a^a r_a^s + r_a^c r_a^s}$$

Primer paso $T_o = T_a$

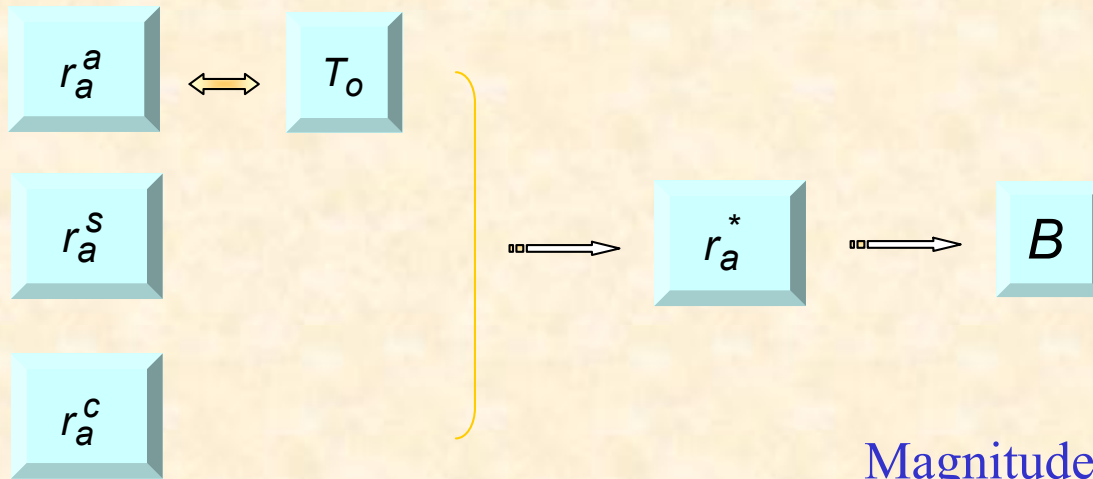


Primer valor de r_a^a



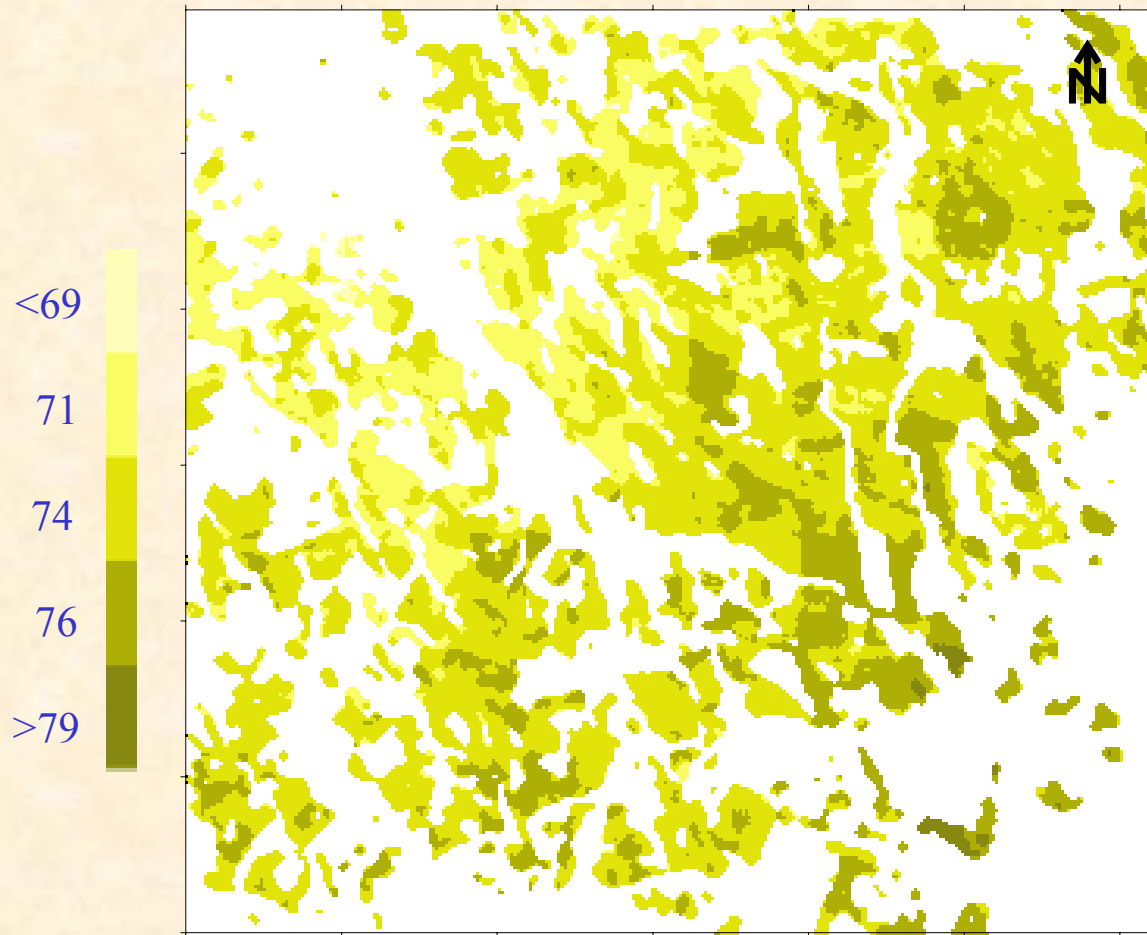
En tres iteraciones los valores convergen

Esquema de trabajo para el cálculo del coeficiente característico del viñedo



Magnitudes calculadas	Valor obtenido
r_a^a (s/m)	22,5
r_a^s (s/m)	34,4
r_a^c (s/m)	83,4
T_o (K)	306,6
r_a^* (s/m)	74,1
B (mm/día K)	0,21

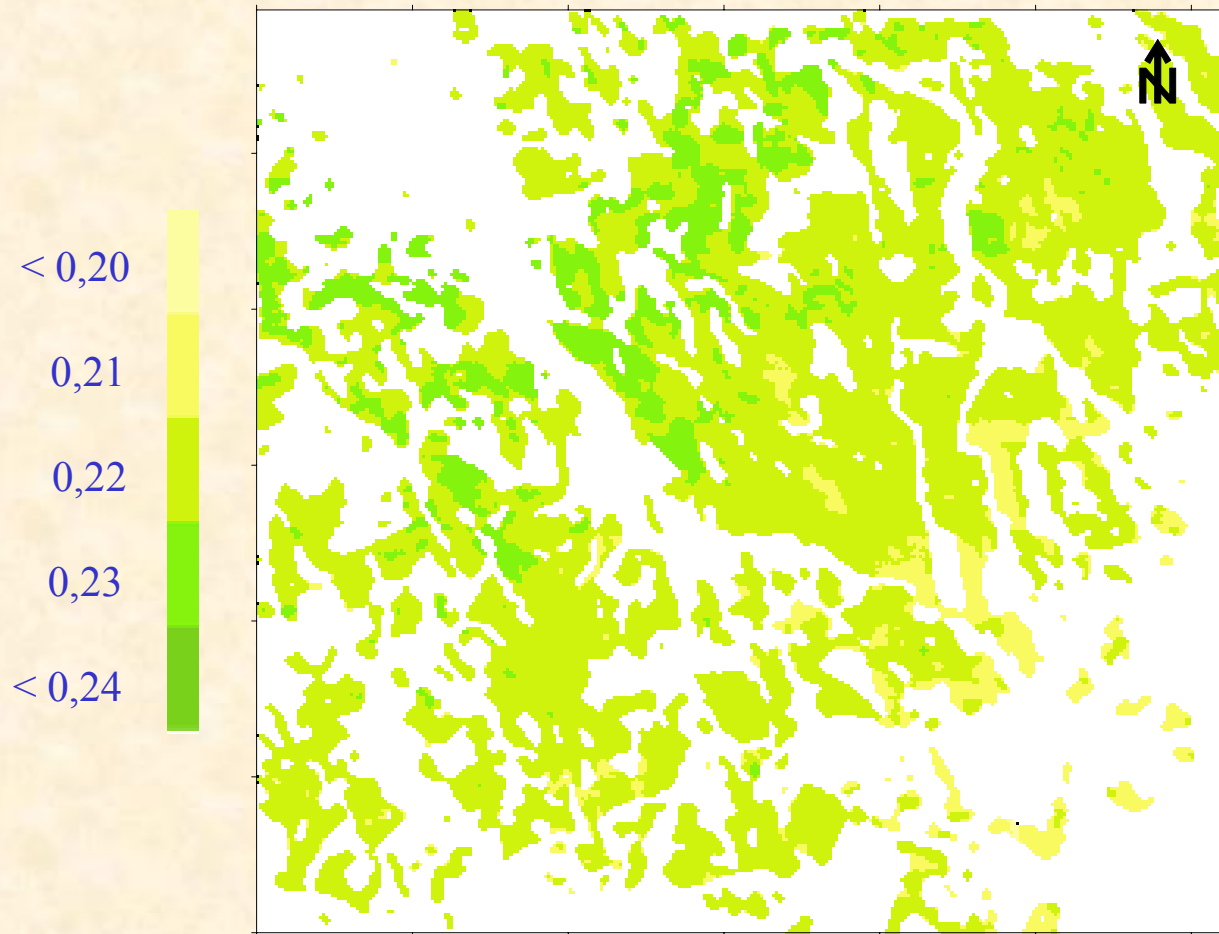
Imagen de resistencia equivalente (s/m)



Valor medio

74 ± 3 s/m

Imagen de coeficiente B (mm/día K)



Valor medio

$0,21 \pm 0,01$ mm/día K

Aplicación operativa del modelo

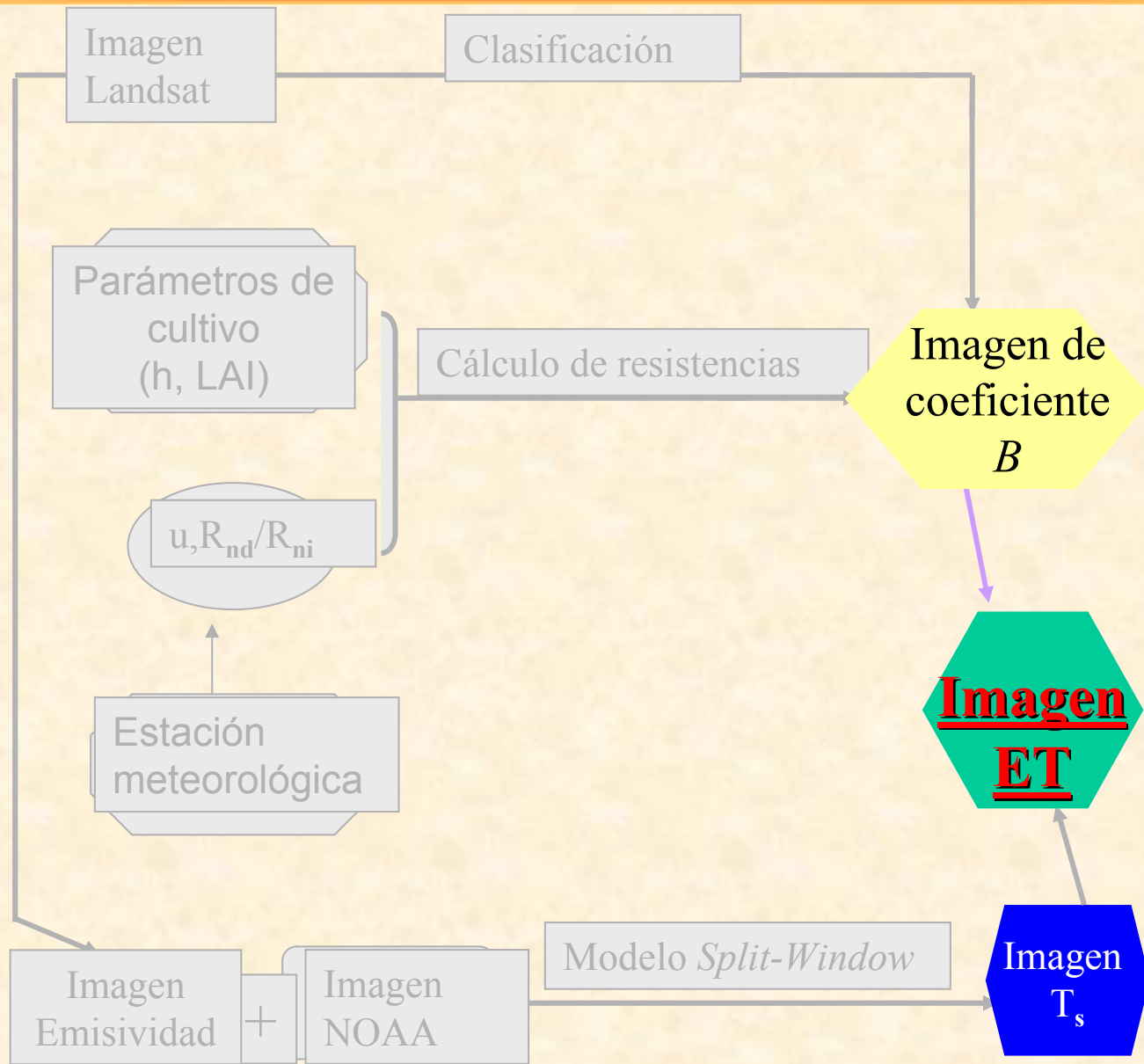
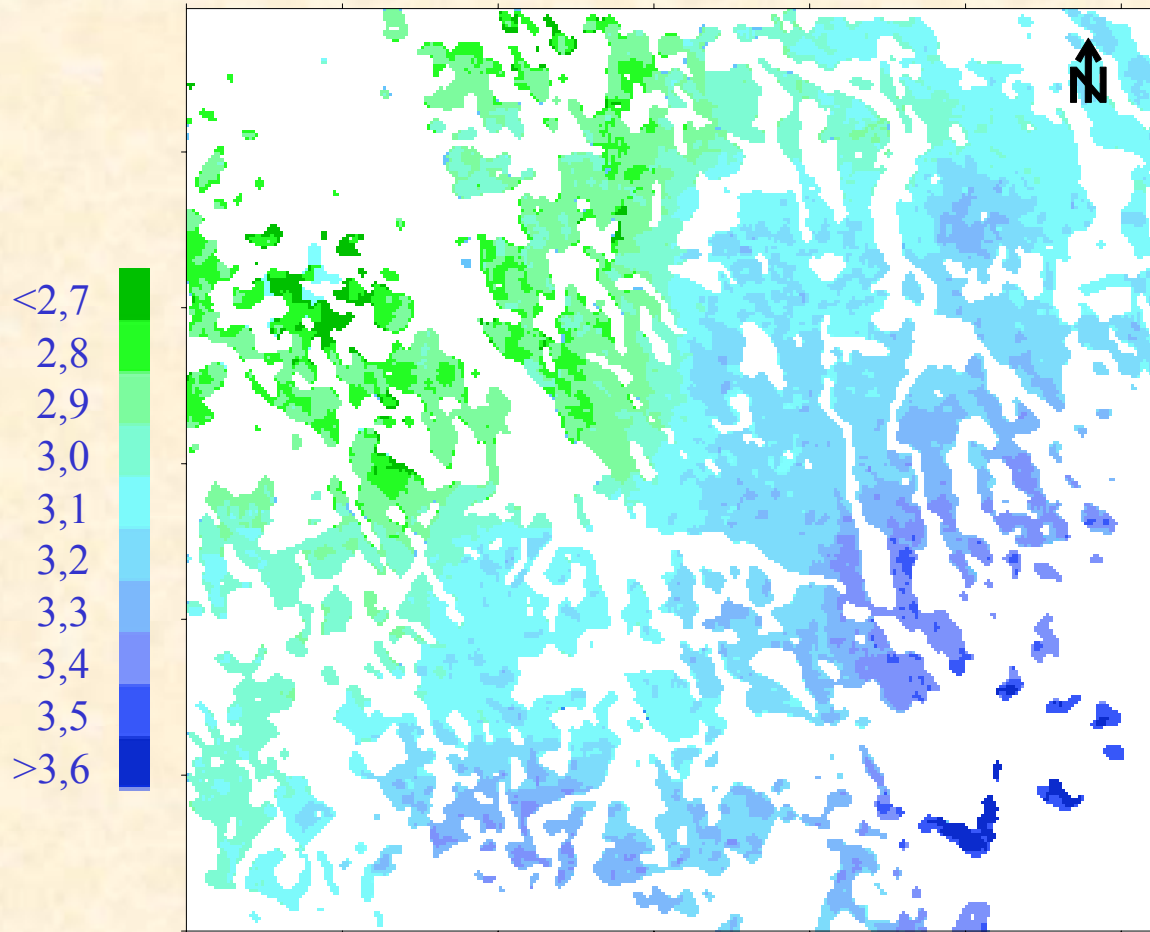


Imagen de evapotranspiración para la vid (mm/día)

$$ET_d = R_{nd} + B (T_a - T_s)_i$$



Valor medio

$3,3 \pm 0,5$ mm/día

Análisis de sensibilidad en el cálculo de las resistencias

Magnitudes directas de las que dependen las resistencias aerodinámicas del suelo y del cultivo

Altura del cultivo
Velocidad del viento
LAI

**Resistencia del
suelo**

Error absoluto → $34,4 \pm 1,2$ s/m

**Resistencia del
cultivo**

Error absoluto → 83 ± 3 s/m

Sensibilidad del modelo de ET frente a las variables de entrada

Todas las magnitudes que intervienen en el modelo están íntimamente relacionadas entre sí



Se pueden obtener valores que no son posibles físicamente

Solución: Estudiar el modelo en cuatro casos distintos a lo largo del mes de agosto y evaluar, en cada caso, el error tanto absoluto como relativo en el cálculo de la ET

Datos de entrada

- ✓LAI
- ✓Altura del cultivo
- ✓Velocidad del viento
- ✓Temperatura del aire
- ✓Temperatura del suelo
- ✓Temperatura del cultivo
- ✓Radiación neta
- ✓Proporción de vegetación

Caso 1: 2/8/94**Error absoluto**

0,4 mm/día

Error relativo

12%

Caso 2: 8/8/94**Error absoluto**

0,5 mm/día

Error relativo

21%

Caso 3: 16/8/94**Error absoluto**

0,4 mm/día

Error relativo

18%

Caso 4: 28/8/94**Error absoluto**

0,4 mm/día

Error relativo

12%

Variaciones parciales →

Dependencia mayor con la radiación neta
y menor con la proporción de vegetación