

**Informe final\* del Proyecto ME012**  
**Fusión y análisis de imágenes satelitales de sensores MODIS y VIIRS\***

**Responsable:** Dr. Mariano José Juan Rivera Meraz  
**Institución:** Centro de Investigaciones en Matemáticas A. C.  
**Correo electrónico:** mrivera@cimat.mx  
**Fecha de inicio:** 20 de mayo de 2014  
**Fecha de término:** 18 de diciembre de 2015  
**Principales resultados:** Informe final, Manual técnico  
**Forma de citar\*\* el informe final y otros resultados:** **Informe final**  
Rivera Meraz, M. J. J. 2015. Fusión y análisis de imágenes satelitales de sensores MODIS y VIIRS. Centro de Investigaciones en Matemáticas A. C. **Informe final SNIB-CONABIO, proyecto No. ME012.** Ciudad de México.  
**Manual Técnico**  
Rivera Meraz, M. J. J, y J. Esquivel. 2015. Fusión y análisis de imágenes satelitales de sensores MODIS y VIIRS. Centro de Investigaciones en Matemáticas A. C. **Manual Técnico SNIB-CONABIO, proyecto No. ME012.** Ciudad de México.

**Resumen:**

Las imágenes de satélite proveen una rica y continua fuente de información. El contar con imágenes de alta resolución provee de mejor información para la toma de decisiones. Imágenes satelitales de interés para "LA CONABIO" son del tipo MODIS y VIIRS. Una característica de estas imágenes es que las bandas son de distintas resoluciones. Por ello, en este proyecto se propone implementar un sistema general de fusión de imágenes satelitales de diferentes resoluciones. La propuesta se presentará en el contexto de las imágenes MODIS. Sin embargo, como hemos dicho, se contempla su la fusión de imágenes en imágenes VIIRS y es lo suficientemente general para ser adaptado a otras modalidades que pudieran surgir en un futuro.

En el caso de imágenes MODIS, las bandas de más alta resolución son las 81 y 82 donde cada píxel corresponde a una superficie de 250x250m. En este proyecto se propone implementar un método para estimar imágenes de alta resolución de las bandas 83-87 así como llenado de huecos (errores de captura). La propuesta pretende mejorar el método reportado y adaptarlo a las necesidades de "LA CONABIO". Además, se pretende con este proyecto iniciar una colaboración científica/tecnológica productiva tanto para "LA CONABIO" como para "EL CIMAT". "EL CIMAT" pretende iniciar un laboratorio de imagenología que permita resolver problemas que sean definidos en conjunto con "LA CONABIO". Este laboratorio permitirá entrenar a personal (mediante tesis y estancias posdoctorales) sobre temas de sensores remotos, procesamiento de imágenes de grandes dimensiones, análisis de datos con contexto espacial que sean de interés para "LA CONABIO" y para otros agentes del país; por ejemplo, INEGI, CONAFOR, RFE, etc.

- 
- \* El presente documento no necesariamente contiene los principales resultados del proyecto correspondiente o la descripción de los mismos. Los proyectos apoyados por la CONABIO así como información adicional sobre ellos, pueden consultarse en [www.conabio.gob.mx](http://www.conabio.gob.mx)
  - \*\* El usuario tiene la obligación, de conformidad con el artículo 57 de la LFDA, de citar a los autores de obras individuales, así como a los compiladores. De manera que deberán citarse todos los responsables de los proyectos, que proveyeron datos, así como a la CONABIO como depositaria, compiladora y proveedora de la información. En su caso, el usuario deberá obtener del proveedor la información complementaria sobre la autoría específica de los datos.



CIMAT

# Fusión y análisis de imágenes satelitales de sensores MODIS y VIIRS

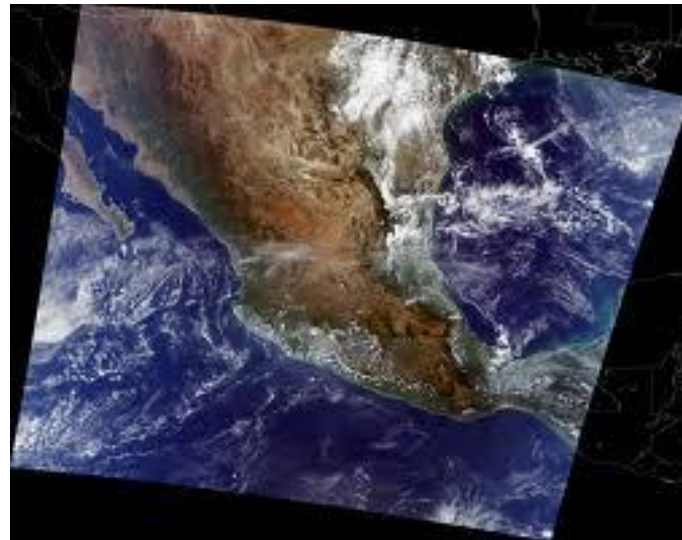
Centro de investigación en matemáticas A.C.

# Análisis de la cobertura terrestre

- Las actividades cambian drásticamente la cobertura del suelo y estos cambios influyen sobre los ciclos hidrológicos.
- Los cambios climatológicos provocan el aumento y la intensidad de los desastres naturales en todo el planeta como son los incendios, las inundaciones, los huracanes y las sequías.
- 1980 inician algunos proyectos creados para el monitoreo de coberturas globales con el sensor AVHRR.
- AVHRR motiva la creación de sensores creados para el monitoreo de la cobertura terrestre y sobresale el sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer ); 1999 (terra), 2002 (aqua).
- La experiencia con el sensor MODIS da paso a la creación de VIIRS (Visible Infrared Imager Radiometer Suite ); Suomi NPP 2011.

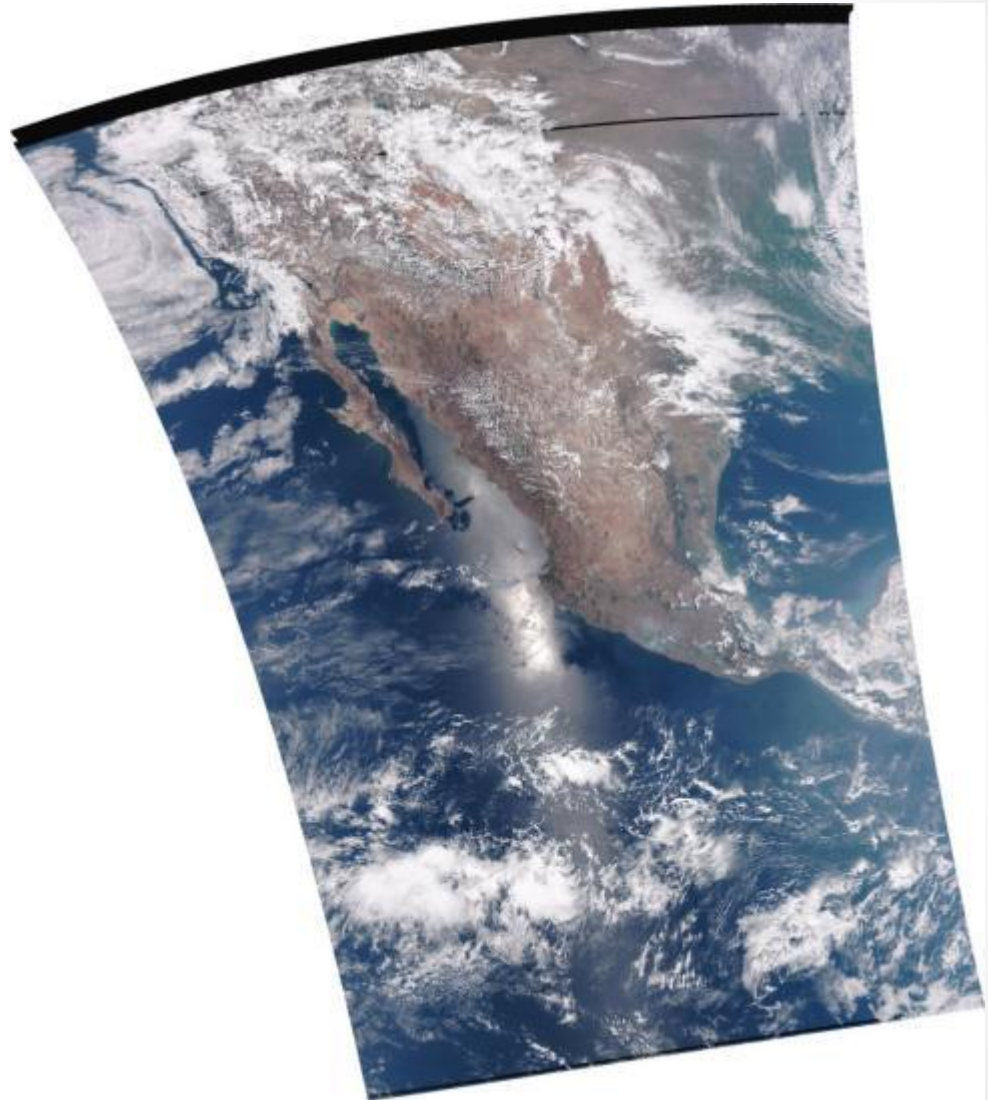
# MODIS

- Tres resoluciones espaciales: 250m at nadir, 500m at nadir, 1km at nadir
- 36 canales espectrales (longitud de onda que va de los  $0,4\mu\text{m}$  a los  $14,4\mu\text{m}$ .)
- Bandas 1-7: Aplicaciones terrestres.
- Bandas 8-16: Observaciones oceánicas.
- Bandas 17-19: Mediciones atmosféricas.
- Bandas 20-36: cubren la porción del infrarojo térmico.
- Utiliza archivo HDF y geotiff para su almacenamiento.



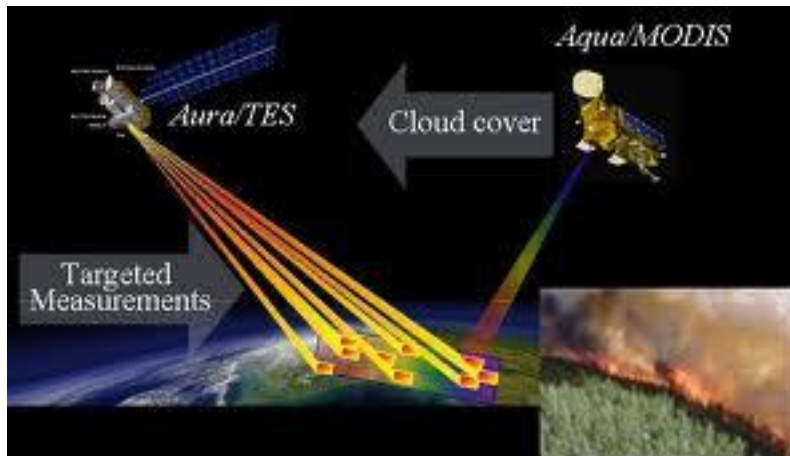
# VIIRS

- Dos resoluciones espaciales: Imaging (I) a 375m at nadir y Moderate a 742m at nadir.
- 22 bandas.
- 5 bandas Imaging
- 16 moderate
- Utiliza archivo HDF5 para su almacenamiento.



# Objetivo

- Realizar la fusión de imágenes satelitales de los sensores VIIRS y MODIS con el fin de aumentar la resolución baja de las imágenes del producto Reflectancia de la Superficie (SR) del sensor MODIS y el sensor VIIRS.





# Algoritmo a Implementar

- A method for downscaling MODIS land channels to 250 m spatial resolution using adaptive regression and normalization.

Alexander P. Trishchenko\*<sup>a</sup>, Yi Luo<sup>a</sup>, Konstantin V. Khlopenkova<sup>a</sup>  
<sup>a</sup>Canada Center for Remote Sensing, Earth Sciences Sector, Natural Resources Canada, 588 Booth Street, Ottawa, ON, Canada, K1A 0Y7

Natural Resources  
Canada

Ressources naturelles  
Canada





**Natural Resources Canada**  
www.nrcan.gc.ca

[Français](#) | [Home](#) | [Contact Us](#) | [Help](#) | [Search](#) | [canada.gc.ca](#)

[Home](#) > [Earth Sciences](#) > [Climate Change](#) > [Landscape and Ecosystems](#) > [Impacts on Canada's Landmass](#)

> National Scale Satellite Climate Data records of Canada's Landmass and Ecosystems

Earth Sciences
<a href="#">Earth Sciences Home</a>
<a href="#">Climate Change</a>
<a href="#">Impacts and Adaptation</a>
<a href="#">Landscape and Ecosystems</a>
<a href="#">Energy and Minerals</a>
<a href="#">Geography and Boundaries</a>
<a href="#">Groundwater</a>
<a href="#">Natural Hazards</a>
Products and Services
<a href="#">Land and Geodetic Surveys</a>

## National Scale Satellite Climate Data records of Canada's Landmass and Ecosystems

### Activity Rationale

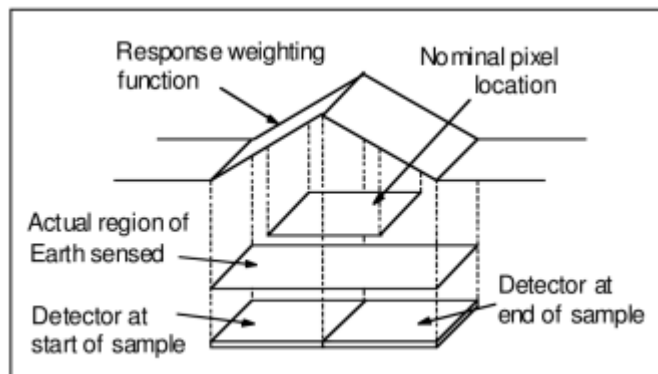
Systematic long-term observations of the Earth system are required to improve our understanding of climate and climate change impacts on Canada's landmass. Satellite observations are a key source of data that provide a wealth of information about environmental conditions and ecosystem dynamics. This activity develops methods to transform satellite observations into useable



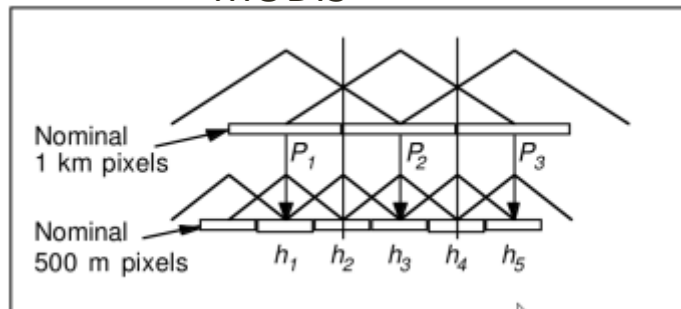
Landscape and Ecosystems
<a href="#">By Location</a>
<a href="#">By Project</a>
<a href="#">By Sector</a>
<a href="#">By Theme</a>
<a href="#">Data from the ERCC Program</a>
<a href="#">Economic and Natural Environment Sectors</a>
<a href="#">Human Settlements</a>
<a href="#">Impacts on Canada's Landmass</a>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Developing Earth Observation (EO)-based Ecosystem</li></ul>

# Registro entre bandas

- El Sensor percibe la señales usando un escáner espejo (para el sensor MODIS) o un telescopio (para VIIRS) que rota a una velocidad constante.
- Una muestra entonces consiste en un la integración de diversas señales recibidas por el detector durante un intervalo de tiempo, por lo cual la imagen del suelo viaja a través del detector, en otras palabras el pixel se mueve a través de la superficie de la tierra.



MODIS

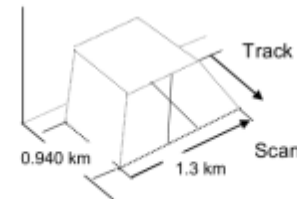


VIIRS

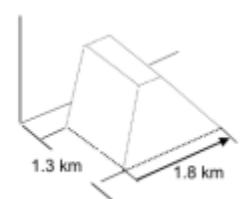
**Nadir**  
 ◦ 3 raw samples aggregated in the scan direction



**Scan Angle 35°**  
 600km  
 ◦ 2 raw samples aggregated in the scan direction

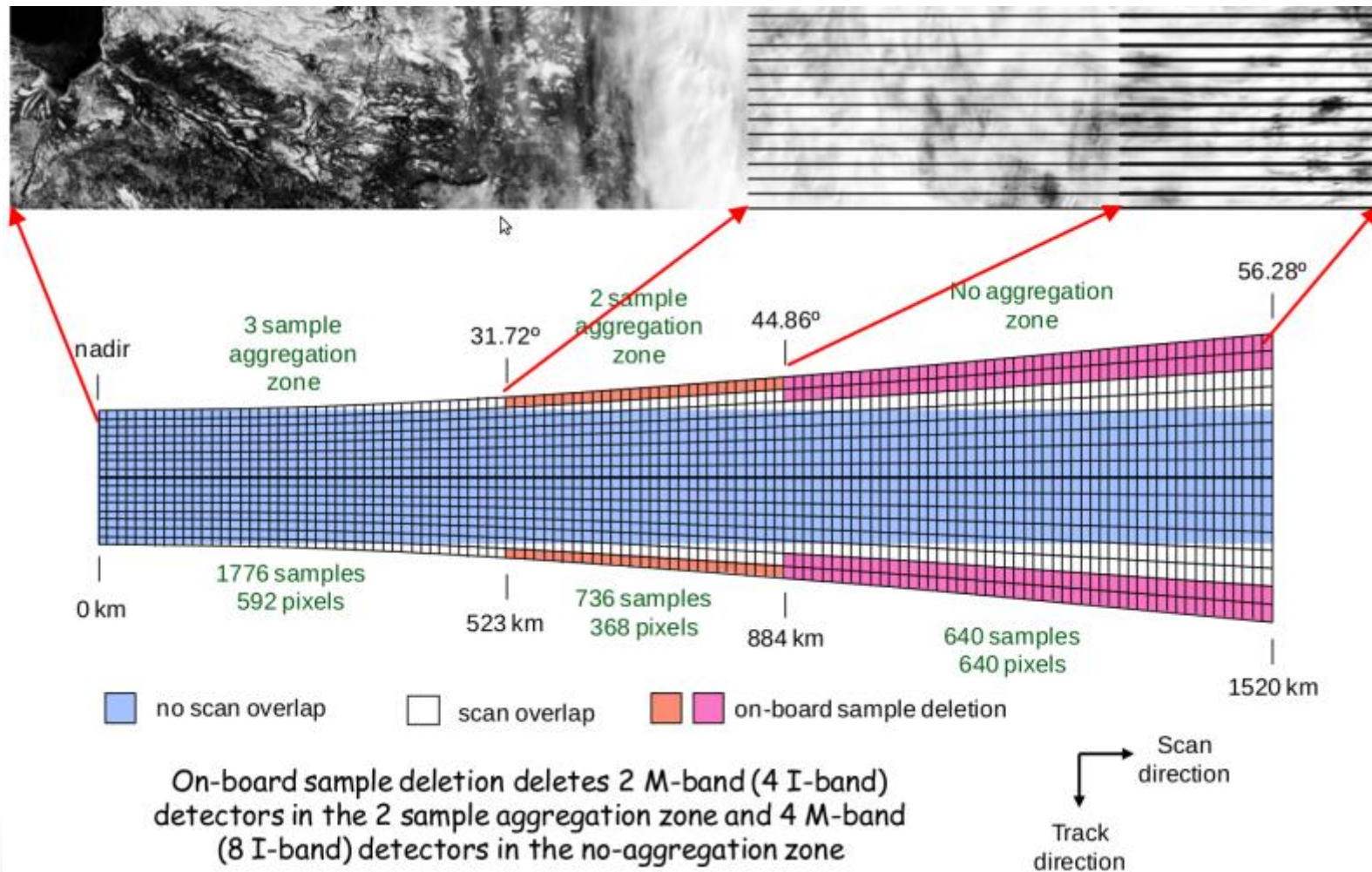


**Scan Angle 50°**  
 1100km  
 ◦ no aggregation



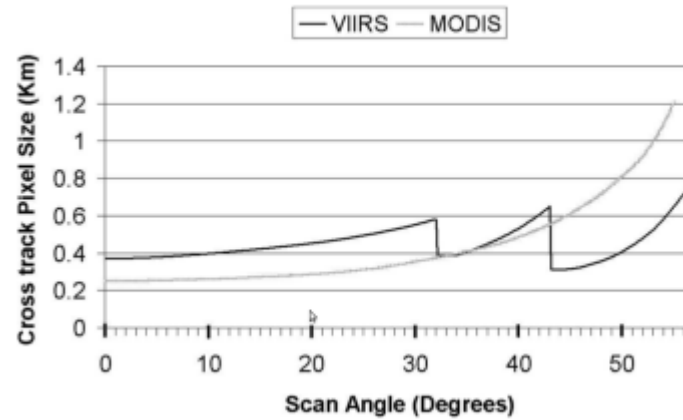
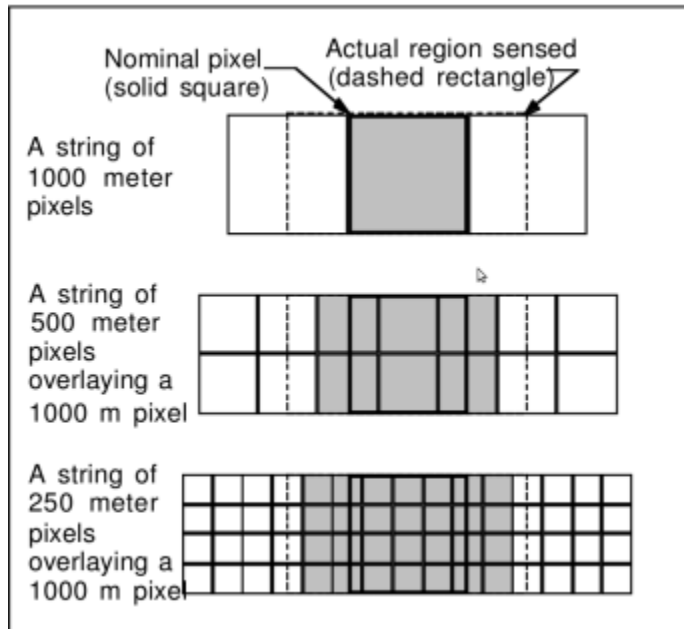


# Efecto Bowtie



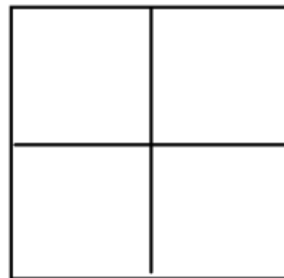
# Registro entre bandas

## Registro MODIS

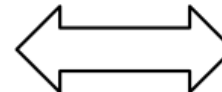


## Registro VIIRS

**2x2 I-band**

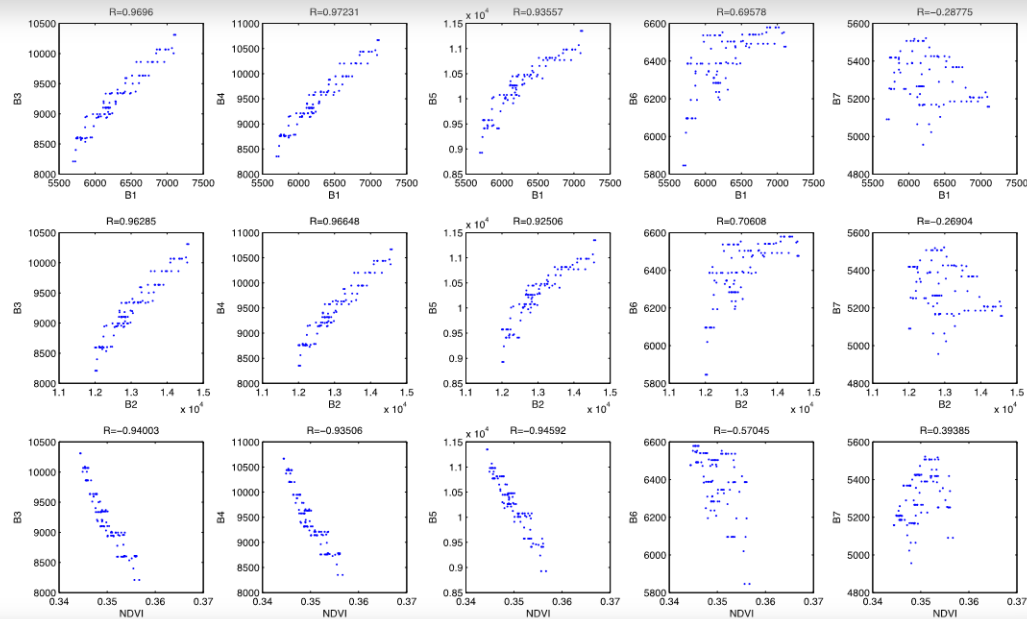
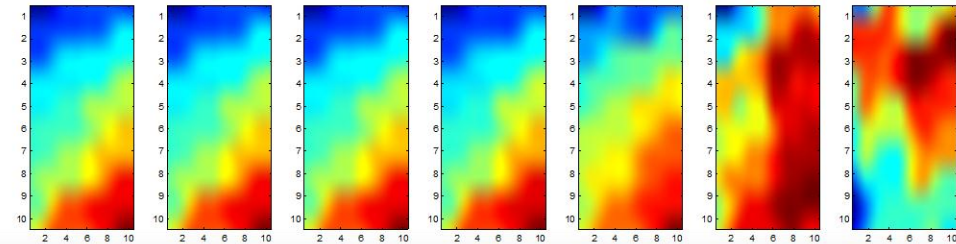
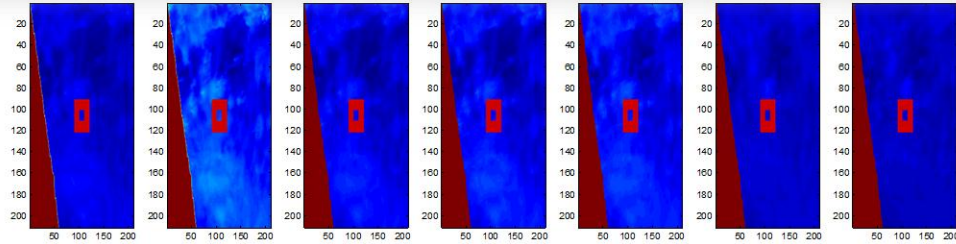


**1 M-band**



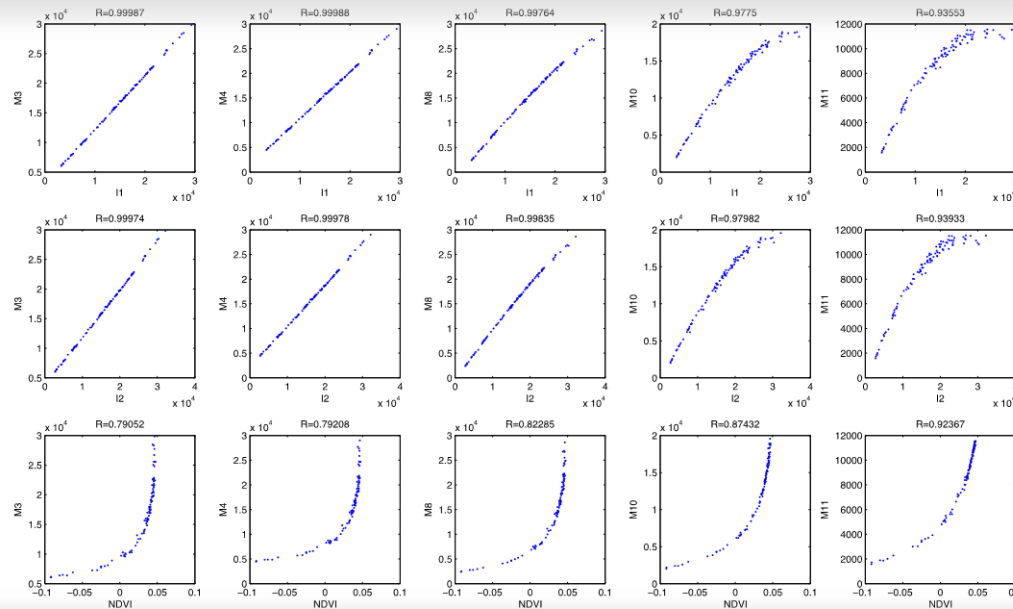
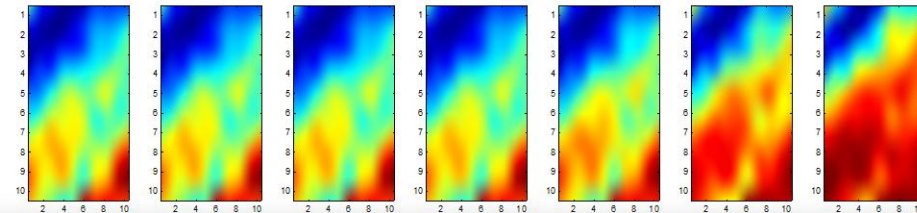
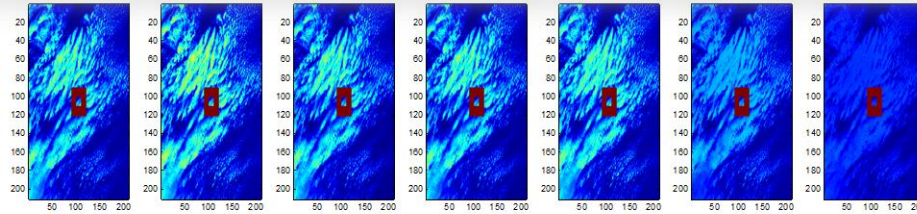
# Correlación entre bandas

MODIS



# Correlación entre bandas

VIIRS



# Regresión

El modelo de regresión propuesto por Trishchenko[1] tiene la forma:

$$G(B_1(x), B_2(x), a) = B_n(x) = a_0 + (a_1 B_1(x) + a_2 B_2(x))(1 + a_3 NDVI(x) + a_4 NDVI(x)^2) \quad (1)$$

Se busca encontrar los parámetros de un modelo de regresión  $B_n(x) = G(B_1(x), B_2(x), a)$  para estimar  $B_n(x)$  de  $B_1(x)$  y  $B_2(x)$ , donde  $G$  es una función paramétrica,  $x$  un punto en  $\mathbb{R}^2$ ,  $NDVI$  es el índice normalizado de vegetación [3] y  $a$  un vector de parámetros que pretende minimizar la siguiente función:

$$\min_a F(a) = \|y_i - G(B_1(x), B_2(x), a)\| \quad (2)$$

$$NDVI(x) = \frac{B_2(x) - B_1(x)}{B_2(x) + B_1(x)}. \quad (3)$$

Reescribimos el problema de minimización como un problema de mínimos cuadrados no lineales [A].

$$\min_a F(a) = \sum_{i=1}^m [y_i - G(B_1(x_i), B_2(x_i), a)]^2 \quad (4)$$

Propuesta: Levenberg-Marquardt



# Transformando el problema

$$\begin{aligned}
 B_n(x) &= a_0 + (a_1 B_1(x) + a_2 B_2(x))(1 + a_3 N(x) + a_4 N(x)^2) \\
 B_n(x) &= a_0 + a_1 B_1(x) + a_2 B_2(x) + a_1 a_3 B_1(x) N(x) + a_2 a_3 B_2(x) N(x) + a_1 a_4 B_1(x) N^2(x) + a_2 a_4 B_2(x) N^2(x) \quad (8) \\
 B_n(x) &= \theta_0 + \theta_1 B_1(x) + \theta_2 B_2(x) + \theta_3 B_1(x) N(x) + \theta_4 B_2(x) N(x) + \theta_5 B_1(x) N^2(x) + \theta_6 B_2(x) N^2(x)
 \end{aligned}$$

*Ahora tenemos un modelo de regresión con parámetros lineales y en lugar de estimar cinco parámetros en el modelo no lineal, en su lugar estimaremos siete parámetros de un modelo lineal.*

Podemos entonces trasladar el problema de regresión como un problema de minimización cuadrática donde la función a minimizar está dada por:

$$F(\theta) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m (f(\theta))^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m (y_i - B_n(\theta, x_i))^2 = \frac{1}{2} \|A\theta - b\|^2 \quad (9)$$

$$A\theta - b = \begin{bmatrix} 1 & B_1(x_0) & B_2(x_0) & B_1(x_0)N(x_0) & B_2(x_0)N(x_0) & B_1(x_0)N^2(x_0) & B_2(x_0)N^2(x_0) \\ 1 & B_1(x_1) & B_2(x_1) & B_1(x_1)N(x_1) & B_2(x_1)N(x_1) & B_1(x_1)N^2(x_1) & B_2(x_1)N^2(x_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & B_1(x_{n-1}) & B_2(x_{n-1}) & B_1(x_{n-1})N(x_{n-1}) & B_2(x_{n-1})N(x_{n-1}) & B_1(x_{n-1})N^2(x_{n-1}) & B_2(x_{n-1})N^2(x_{n-1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_0 \\ \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_6 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} B_n(x_0) \\ B_n(x_1) \\ \vdots \\ B_n(x) \end{bmatrix}$$



# Transformando el problema

La propuesta de solución visto en el apéndice [A](#) sugiere la solución vía *transformaciones ortogonales*, pero no será fácilmente resuelto debido a que la matriz  $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$  puede tener columnas linealmente dependientes por pérdida de datos o por que algunas de las componentes sea 0 (numericamente), entonces la matriz  $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$  no será de rango completo y al ser una matriz singular no tendría una factorización única (ver apéndice [A](#)). si agregamos un potencial convexo para obtener una solución de mínima norma ( regresión ridge), garantizamos una factorización única.

$$F(\theta) = \frac{1}{2} \|\mathbf{A}\theta - \mathbf{b}\|^2 + \lambda \|\theta\|^2 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda \mathbf{I}) \theta - \mathbf{A}^T \mathbf{b} &= \mathbf{0} \\ \mathbf{A}\theta - \mathbf{b} &= \mathbf{0} \end{aligned} \quad (11)$$

donde:  $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{7 \times 7}$ ,  $\theta \in \mathbb{R}^{7 \times 1}$ ,  $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^{7 \times 1}$

$$\mathbf{A}^T \mathbf{b} = \mathbf{b} = \begin{bmatrix} \sum_x b_3 \\ \sum_x b_1(x)b_3(x) \\ \sum_x b_2(x)b_3(x) \\ \sum_x b_1(x)n(x)b_3(x) \\ \sum_x b_2(x)n(x)b_3(x) \\ \sum_x b_1(x)n^2(x)b_3(x) \\ \sum_x b_2(x)n^2(x)b_3(x) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda \mathbf{I} = \mathbf{A} =$$

$$\begin{bmatrix} N + \lambda & \sum_i B_1(x_i) & \sum_i B_2(x_i) & \sum_i B_1(x_i)N(x_i) & \sum_i B_2(x_i)n(x_i) & \sum_i B_1(x_i)N^2(x_i) & \sum_i B_2(x_i)n^2(x_i) \\ \sum_i B_1(x_i) & \sum_i B_1^2(x_i) + \lambda & \sum_i B_1(x_i)B_2(x_i) & \sum_i B_1^2(x_i)N(x_i) & \sum_i B_1(x_i)B_2(x_i)N(x_i) & \sum_i B_1^2(x_i)N^2(x_i) & \sum_i B_1(x_i)B_2(x_i)N^2(x_i) \\ \sum_i B_2(x_i) & \sum_i B_1(x_i)B_2(x_i) & \sum_i B_2^2(x_i) + \lambda & \sum_i B_1(x_i)B_2(x_i)N(x_i) & \sum_i B_2^2(x_i)N(x_i) & \sum_i B_1(x_i)B_2(x_i)N^2(x_i) & \sum_i B_2^2(x_i)N^2(x_i) \\ \sum_i B_1(x_i)N(x_i) & \sum_i B_1^2(x_i)N(x_i) & \sum_i B_1(x_i)B_2(x_i)N(x_i) & \sum_i B_1^2(x_i)N^2(x_i) + \lambda & \sum_i B_1(x_i)B_2(x_i)N^2(x_i) & \sum_i B_1^2(x_i)N^3(x_i) & \sum_i B_1(x_i)B_2(x_i)N^3(x_i) \\ \sum_i B_2(x_i)N(x_i) & \sum_i B_1(x_i)B_2(x_i)N(x_i) & \sum_i B_2^2(x_i)N(x_i) & \sum_i B_1(x_i)B_2(x_i)N^2(x_i) & \sum_i B_2^2(x_i)N^2(x_i) + \lambda & \sum_i B_1(x_i)B_2(x_i)N^3(x_i) & \sum_i B_2^2(x_i)N^3(x_i) \\ \sum_i B_1(x_i)N^2(x_i) & \sum_i B_1^2(x_i)N^2(x_i) & \sum_i B_1(x_i)B_2(x_i)N^2(x_i) & \sum_i B_1^2(x_i)N^3(x_i) & \sum_i B_1(x_i)B_2(x_i)N^3(x_i) & \sum_i B_1^2(x_i)N^4(x_i) + \lambda & \sum_i B_1(x_i)B_2(x_i)N^4(x_i) \\ \sum_i B_2(x_i)n^2(x) & \sum_i B_1(x_i)B_2(x_i)N^2(x_i) & \sum_i B_2^2(x_i)N^2(x_i) & \sum_i B_1(x_i)B_2(x_i)N^3(x_i) & \sum_i B_2^2(x_i)N^3(x_i) & \sum_i B_1(x_i)B_2(x_i)N^4(x_i) & \sum_i B_2^2(x_i)N^4(x_i) + \lambda \end{bmatrix}$$

# Solución de sistemas

La descomposición de Cholesky se utiliza principalmente para la solución numérica de las ecuaciones lineales  $Ax = b$ . Si  $A$  es simétrica y definida positiva, entonces podemos resolver  $Ax = b$  calculando primero la descomposición de Cholesky  $A = LL^T$ ,  $Ly = b$  entonces calcular la solución para  $y$  con la sustitución hacia adelante, y finalmente, resolver la solución de  $L^T x = y$  para  $x$  por sustitución hacia atrás .

La factorización cholesky, en el fondo, es una descomposición  $LU$ . La ventaja es que el costo de cálculo de la matriz  $LL^T$  es menor que el de  $L$  y  $U$ . Sin embargo añadimos al procesamiento el calculo de  $n$  raices cuadradas para obtener  $LL^T$ . Los elementos de la matriz  $LL^T$  son:

$$\begin{aligned} l_{ii} &= \sqrt{a_{ii} - \sum_{k=1}^{i-1} (l_{ik})^2} \\ l_{ij} &= \frac{1}{l_{ii}} \left( a_{ij} - \sum_{k=1}^{i-1} l_{ik} l_{jk} \right), j = i + 1, i + 2, \dots, n \end{aligned} \quad (12)$$

Una variante estrechamente relacionado de la descomposición de Cholesky clásica es la descomposicin de  $LDL^T$ , donde  $L$  es una matriz inferior unitriangular y  $D$  es una matriz diagonal. Esta descomposición está relacionado con la descomposición de Cholesky clásica, de la forma  $LL^T$ , de la siguiente manera:

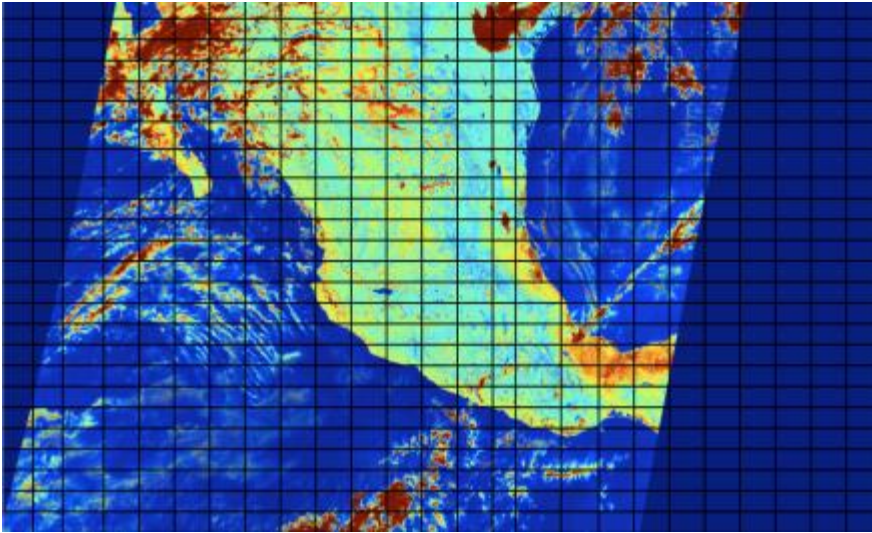
$$\begin{aligned} LDL^T &= LD^{\frac{1}{2}} D^{\frac{1}{2}} L^T = LD^{\frac{1}{2}} (LD^{\frac{1}{2}})^T \\ d_{ij} &= a_{jj} - \sum_{k=1}^{j-1} l_{jk}^2 d_{kk} \\ l_{ij} &= \left( a_{ij} - \sum_{k=1}^{j-1} l_{ik} d_{kk} l_{jk} \right) \times \left( \frac{1}{d_{jj}} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

A partir de la descomposición  $LDL^T$  se puede resolver el sistema y encontrar el vector de parámetros  $x$  haciendo las siguiente sustitución hacía atrás.

Define

$$\begin{aligned} A &= LDL^T \\ \mathbf{LDL}^T x &= b \end{aligned}$$

# Organización de la Memoria (OMP)



ANTES: RAM de una banda



DESPUÉS: RAM de una banda



**500000 sistemas 7x7 a 5 millones en menos de 1 segundo en CPU (HP)!**

# Interpolación en el espacio de parámetros

Filtro de datos atípicos

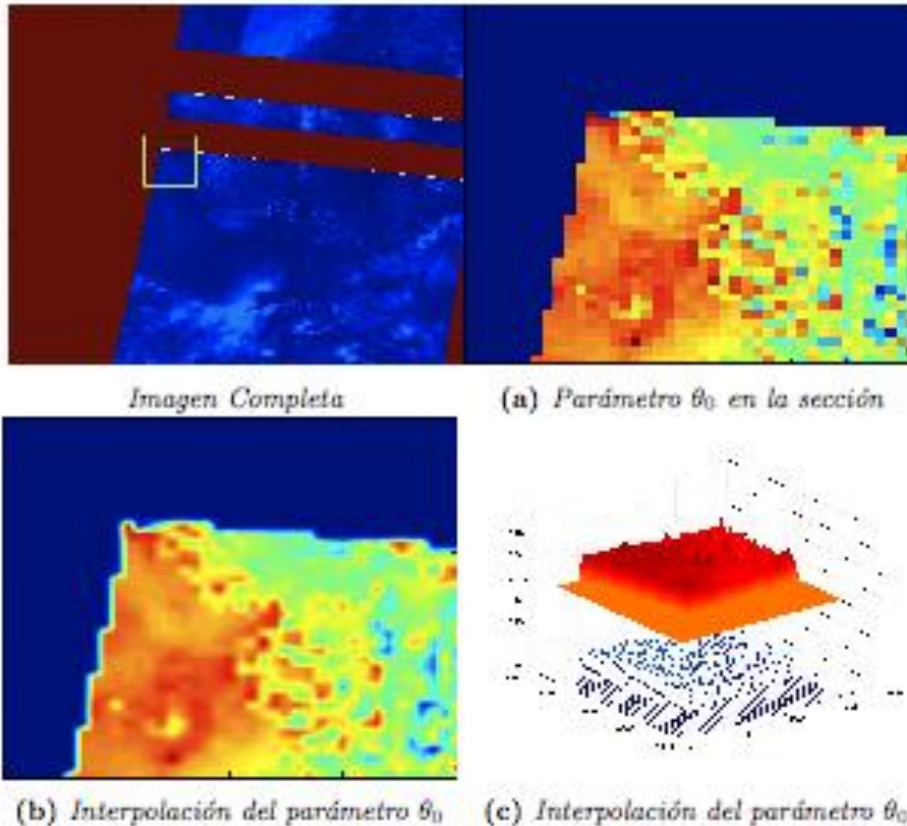


Figura 15: Interpolación Bicúbica del parámetro  $\theta_0$  para Banda 3 del sensor MODIS

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 0 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$
$$x_{\text{new}} = \sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 M_{k+1,l+1} * x_{i+k,j+l}$$



# Interpolación en el espacio de parámetros

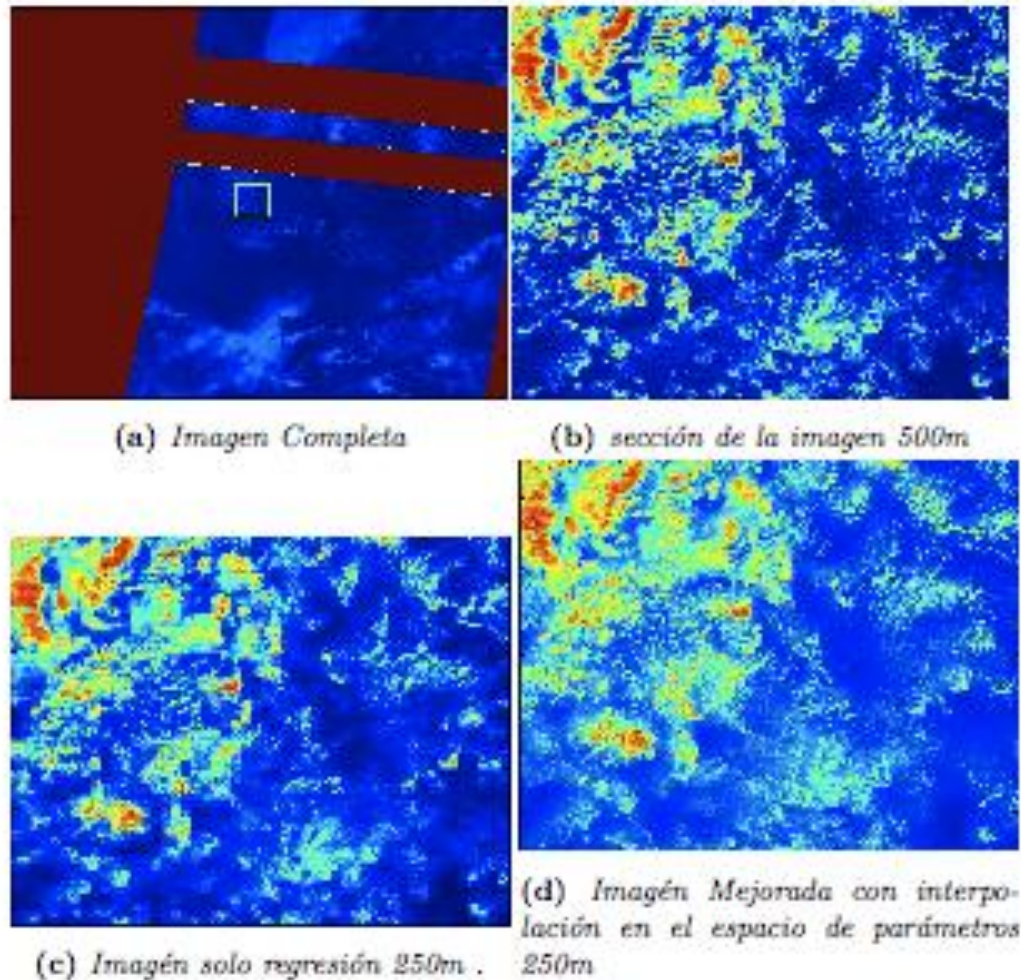


Figura 14: *Interpolación Bicúbica en el espacio de parámetros*

# Normalización

- Preservar la consistencia radiométrica

**MODIS**

$$\begin{aligned}
 2a_1\rho_1 + a_2\rho_2 &= 3r_1 \\
 a_2\rho_2 + 2a_3\rho_3 + a_4\rho_4 &= 4r_2 \\
 a_4\rho_4 + 2a_5\rho_5 + a_6\rho_6 &= 4r_3 \\
 &\dots\dots\dots \\
 a_{2n-2}\rho_{2n-2} + 2a_{2n-1}\rho_{2n-1} + a_{2n}\rho_{2n} &= 4r_n
 \end{aligned} \tag{15}$$

donde  $\rho_i$  es el promedio de la reflectancia de dos pixeles de 250m localizados en la misma columna de dos líneas consecutivas que contribuyen a un pixel de 500m,  $r_i$  es el valor de la reflectancia del pixel de 500m,  $a_i$  es el factor desconocido de la normalización y  $n$  es el número de elementos en la fila de la imagen de baja resolución.

El sistema lineal que representa al sistema de ecuaciones está dado por:

$$\begin{bmatrix} 2\rho_1 & \rho_2 & & & & \\ & \rho_2 & 2\rho_3 & \rho_4 & & \\ & & \rho_4 & 2\rho_5 & \rho_6 & \\ & & & \ddots & & \\ & & & \rho_{2n-2} & 2\rho_{2n-1} & \rho_{2n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ a_{2n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ \vdots \\ r_n \end{bmatrix}$$

Debido a que el problema es inconsistente y tiene multiples soluciones, representamos el problema como problema de minimización que sugiere optimizar con el siguiente problema de minimización  $Da - m = 0$

$$\begin{aligned}
 \min_a F(a) &= \frac{1}{2} \| Da - m \|^2 + \frac{1}{2} \lambda \| a - 1 \|^2 \\
 \min_a \frac{1}{2} [2\rho_1 a_1 + \rho_2 a_2 - 3r_1]^2 &+ \frac{1}{2} \sum_{k=2}^n [\rho_{2k-2} a_{2k-2} + 2\rho_{2k-1} a_{2k-1} + \rho_{2k} a_{2k} - 4r_k]^2 + \frac{1}{2} \lambda \sum_{k=1}^{2n} [a_k - 1]^2 \tag{16}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial f(a)}{\partial a_1} &= (2\rho_1 a_1 + \rho_2 a_2 - 3r_1)(2\rho_1) + \lambda(a_1 - 1) \\
 \frac{\partial f(a)}{\partial a_2} &= (2\rho_1 a_1 + \rho_2 a_2 - 3r_1)(\rho_2) + (2\rho_2 a_2 + 2\rho_3 a_3 + \rho_4 a_4 - 4r_2)(2\rho_2) + \lambda(a_2 - 1) \\
 \frac{\partial f(a)}{\partial a_{2k-1}} &= (\rho_{2k-2} a_{2k-2} + 2\rho_{2k-1} a_{2k-1} + \rho_{2k} a_{2k} - 4r_k)(2\rho_{2k-1}) + \lambda(a_{2k-1} - 1) & k \neq 1 \\
 \frac{\partial f(a)}{\partial a_{2k}} &= (\rho_{2k-2} a_{2k-2} + 2\rho_{2k-1} a_{2k-1} + \rho_{2k} a_{2k} - 4r_k)(\rho_{2k}) + (\rho_{2k} a_{2k} + 2\rho_{2k+1} a_{2k+1} + \rho_{2k+2} a_{2k+2} - 4r_{k+1})(2\rho_{2k}) + \lambda(a_{2k} - 1) & k \neq 1
 \end{aligned}$$



# NORMALIZACIÓN GAUSS SEIDEL

$$\begin{aligned}\frac{\partial f(a)}{\partial a_1} &= (2\rho_1 a_1 + \rho_2 a_2 - 3r_1)(2\rho_1) + \lambda(a_1 - 1) \\ \frac{\partial f(a)}{\partial a_2} &= (2\rho_1 a_1 + \rho_2 a_2 - 3r_1)(2\rho_2) + (2\rho_2 a_2 + 2\rho_3 a_3 + \rho_4 a_4 - 4r_2)(2\rho_2) + \lambda(a_2 - 1) \\ \frac{\partial f(a)}{\partial a_{2k-1}} &= (\rho_{2k-2} a_{2k-2} + 2\rho_{2k-1} a_{2k-1} + \rho_{2k} a_{2k} - 4r_k)(2\rho_{2k-1}) + \lambda(a_{2k-1} - 1) & k \neq 1 \\ \frac{\partial f(a)}{\partial a_{2k}} &= (\rho_{2k-2} a_{2k-2} + 2\rho_{2k-1} a_{2k-1} + \rho_{2k} a_{2k} - 4r_k)(2\rho_{2k}) + (\rho_{2k} a_{2k} + 2\rho_{2k+1} a_{2k+1} + \rho_{2k+2} a_{2k+2} - 4r_{k+1})(2\rho_{2k}) + \lambda(a_{2k} - 1) & k \neq 1\end{aligned}$$

Encontrar el minimizador de la ecuación, consiste en  $\nabla_a F(a) = 0$ .

$$\nabla_a f(a) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f(a)}{\partial a_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial f(a)}{\partial a_{2n}} \end{bmatrix} = 0$$

$$\begin{aligned}a_1 &= \frac{(2\rho_1)(3r_1 - \rho_2 a_2) + \lambda}{(2\rho_1)^2 + \lambda} \\ a_2 &= \frac{(\rho_2)(3r_1 + 4r_2 - 2\rho_1 a_1 - 2\rho_3 a_3 - \rho_4 a_4) + \lambda}{(2\rho_2^2) + \lambda} \\ a_{2k-1} &= \frac{(2\rho_{2k-1})(4r_k - \rho_{2k-2} a_{2k-2} - \rho_{2k} a_{2k}) + \lambda}{(2\rho_{2k-1})^2 + \lambda} & k = 2, 3, \dots, n \\ a_{2k} &= \frac{(\rho_{2k})(4r_k + 4r_{k+1} - \rho_{2k-2} a_{2k-2} - 2\rho_{2k-1} a_{2k-1} - 2\rho_{2k+1} a_{2k+1} - \rho_{2k+2} a_{2k+2}) + \lambda}{(2\rho_{2k}^2) + \lambda} & k = 2, 3, \dots, n\end{aligned} \tag{17}$$

Se implementa para resolverse en paralelo

# Medidas de similitud

◆ Normalized Cross- Correlation

$$NCC = \frac{\sum_{i,j} [Hr_1(i,j) - \overline{Hr_1}] [Lr(i,j) - \overline{Lr}]}{\sqrt{\sum_{i,j} [Hr(i,j) - \overline{Hr}]^2 \sum_{i,j} [Lr(i,j) - \overline{Lr}]^2}}$$

◆ Quadratic Distance

$$MSE = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} (i,j) [Hr(i,j) - Lr(i,j)]^2}{mn}$$

◆ Relative Difference Of Means

$$RDM = \frac{\overline{HR} - \overline{Lr}}{\overline{Lr}}$$

◆ Relative Variation Difference

$$RVD = \frac{\sigma_{HR}^2 - \sigma_{Lr}^2}{\sigma_{Lr}^2}$$

◆ Peak Signal-to- Noise Ratio(PSNR)

$$PSNR = 20 \log_{10} \frac{P_{peak}}{\sqrt{MSE}}$$

◆ Mask Similarity.

# Aplicación: Downscaling

## REQUERIMIENTOS

- C++.
- CentOS versión 7.0.14.
- Procesadores Multicore.
- Línea de comandos.
- Tres tipos de archivos( hdf4, hdf5, geotiff).

## Librerías

- Gcc
- Hdf5
- Geotiff
  - Tiff
- Hdf4
- OpenMP
- Algoritmos de algebra lineal (CIMAT)

## Otras aplicaciones auxiliares. ENTREGABLE 1

- GenerateMsk
- Bin2Tiff
- hdf2hdf5
- hdf52tiff

- Manual de instalación para pruebas.
- Manual de usuario de las aplicaciones.
- Reporte técnico.
- Documentación de código fuente( PTE)
- Instalación(PTE).

# Aplicación: Downscaling

---

## MODIS en formato GEOTIFF

```
./Downscaling path_fileConfig.txt pathB1.tif pathB2.tif pathB3.tif 3
```

- Archivo de parámetros de configuración GEOTIFF
- Ruta de la imagen B1
- Ruta de la imagen B2
- Ruta de la imagen B3
- Nombre de la banda a procesar (3-7)

Nota: Para compilar la versión Geotiff, se establece en el archivo de configuración fusion\_config.h la directiva **GEOTIFF\_PROCESSING 1**

---

---

## MODIS en formato HDF

```
./Downscaling path_fileConfig.txt pathModis.hdf 3 pathModisQuality250.bin  
pathModisQuality500.bin
```

- Archivo de parámetros de configuración MODIS HDF
- Ruta del archivo MODIS
- Nombre de la banda a procesar (3-7)
- Banda de máscara de calidad de alta resolución 250 con extensión .bin, generada con la aplicación GenerateMsk.
- Banda de máscara de calidad de alta resolución 500 con extensión .bin, generada con la aplicación GenerateMsk.

Nota: los dos últimos parámetros se tomarán en cuenta solo si dentro del archivo de configuración está activada la bandera **USEQUALITYMSK =1**

---

# Aplicación: Downscaling

---

## VIIRS en formato HDF5

./Downscaling	path_fileConfig.txt	pathVirrsI1.h5	pathVirrsI2.h5	pathVirrsM3.h5	M3
I1_QF1_VIIRSIBANDSDR.bin	M3_QF1_VIIRSMBANDSDR.bin				

- Archivo de parámetros de configuración VIIRS HDF5
- Ruta del archivo VIIRS I1
- Ruta del archivo VIIRS I2
- Ruta del archivo VIIRS Moderate correspondiente( M3, M4, M8, M10, M11)
- Nombre de la banda a procesar (M3, M4, M8, M10, M11)
- Banda de máscara de calidad de alta resolución 375 con extensión .bin, generada con la aplicación GenerateMsk.
- Banda de máscara de calidad de alta resolución 750 con extensión .bin, generada con la aplicación GenerateMsk.

Nota: los dos últimos parámetros se tomarán en cuenta solo si dentro del archivo de configuración está activada la bandera USEQUALITYMSK =1

---

# Archivos MODIS HDF

MODIS SWATH TYPE L2	Geolocation Fields	
	DataFields	1km Atmospheric Optical Depth Band 1
		...
		250m Surface Reflectance Band 1
		250m Surface Reflectance Band 2
		500m Surface Reflectance Band 3
		<b>250m Surface Reflectance Band 3</b>
		...
		250m Reflectance Band Quality
		...
	Swath Attributes	

MYD09\_L2.2014282\_2049.hdf

A B C

Donde:

A: identificador del producto, en este caso es reflectancia de la superficie. Puede ser MOD09 para imágenes registradas por el sensor MODIS a bordo del satélite Terra o MYD para imágenes registradas por el sensor MODIS a bordo del satélite Aqua.

B: nivel de procesamiento siempre será L2.

C: fecha y hora YYYY = año, aaa= día juliano, en el ejemplo corresponde al día 9 de octubre, hhmm hora y minuto de la hora del registro de la imagen.

Días transcurrido del año

MOD09\_L2.2013060.1801.20153.1743.hdf



# Archivos VIIRS HDF

All_Data	VIIRS_I1_SDR_All	
		ModeGran
		....
		QF1_VIIRSIBANDSDR
		Reflectance
Data_productos		<b>Downscaled.</b>
		Radiance
		....

SVM01\_npp\_d20141006\_t1957297\_e2013084\_b15243\_c20141006202840176357\_cspp\_dev.h5

A B C D E F G H

A: tipo de archivo (en este caso, banda M-01 SDR data file)

B: identificador del satélite (Suomi-NPP)

C: fecha en YYYYMMDD (06 octubre 2014)

D: tiempo UTC en el inicio en HHMMSS.S

(19:57:29.7 UTC)

E: tiempo UTC time en el fin en HHMMSS.S

(20:13:08.4 UTC)

F: número de orbita (15243)

G: fecha y hora del archivo cuando fue creado en YYYYMMDD

HHMMSS.SSSSSS (20:28:40.176357 UTC, 06 octubre 2014)

H: fuente del archivo

SVM03\_npp\_d20130506\_t2002365\_e2015240\_b00001\_c20150104182718conabio\_cimat\_dwncsl.h5

# Archivo de configuración

---

## **configFile.txt**

```
PATHOUT = /home/jvazquez/Escritorio/viirs_results/  
TYPEFILE = VIIRS-HDF  
SOURCEDATAFILE = conabio_cimat_dwmscl  
SAVEFILES = 0  
TAMANIOBLOQUEX = 3200  
TAMANIOBLOQUEY = 8  
FILELOG = logFileDowns.txt  
GENERATEREPORT = 1  
FILEREPORT = ReportViirs  
USEQUALITYMSK = 1
```

---

PATHOUT = Directorio donde se desea guardar los resultados

TYPEFILE = Tipo de procesamiento VIIRS-HDF, MODIS-HDF, MODIS-GEOTIFF.

SOURCEDATAFILE= prefijo de terminación de los archivos VIIRS a guardar.

SAVEFILES = 0 en la versión actual este parámetro no es utilizado

TAMANIOBLOQUEX= Píxeles a procesar en cada bloque en las columnas

TAMANIOBLOQUEY= Píxeles a procesar en cada bloque en las filas.

FILELOG = Nombre del archivo .txt donde se almacenan los errores generados durante el procesamiento.

GENERATEREPORT = Bandera que indica si se activa la creación de un archivo de reporte del resultado.

GENERATEREPORT = Si la bandera GENERATEREPORT está activada, indica el sufijo en el archivo de salida.

USEQUALITYMSK = 1 Bandera que indica si se desea procesar utilizando la máscara de calidad generada por la aplicación generateMsk.

# Máscara de calidad

- `./generateMsk configFiles/metaVIIRS375.txt`  
`SVI01_npp_d20130820_t2015201_e2028076_b09399_c20130820215021193412_cspp_de`  
`v.h5`

`configFiles/metaMODIS.txt`

`250m Reflectance Band Quality;B;16;configFiles/250m_Reflectance_Band_Quality.txt#CALLS 250M BAND QUALITY`  
`500m Reflectance Band Quality;B;16;configFiles/500m_Reflectance_Band_Quality.txt#CALLS 500M BAND QUALITY`  
`1km Reflectance Data State QA;B;16;configFiles/1km_Reflectance_Data_State_QA.txt#CALLS 1KM DATA STATE FLAGS`

## **250m\_Reflectance\_Band\_Quality.txt**

`0;1;Y;00,01 #MODLAND QA: ideal, less than idean quality`  
`2;3;Y;00 #CLOUD STATE: clear`  
`4;7;Y;0000 #BAND1 QA: highest`  
`8;11;Y;0000 #BAND2 QA: highest`  
`12;12;N; #ATMOSPHERIC CORRECTION:`  
`13;13;N; #ADJACENCY:`  
`14;14;N; #UNUSED`  
`15;15;N; #UNUSED`

**Bit Inicial; Bit Final; Y/N; VALID CONFIGURATION**

`configFiles/metaVIIRS375.txt`

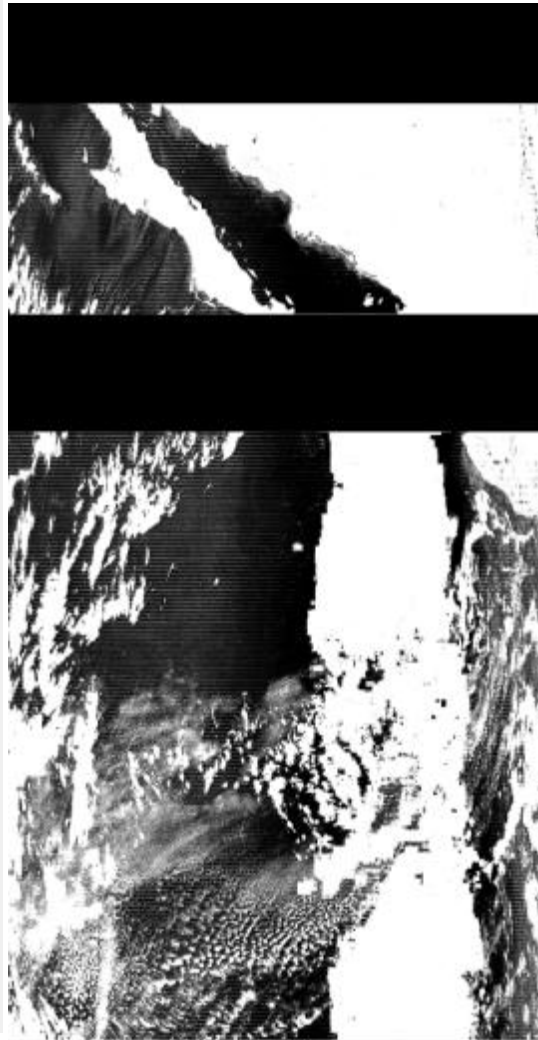
`QF1_VIIRSIBANDSDR;B;8;configFiles/375m_Reflectance_Band_Quality.txt#CALLS 375M BAND QUALITY`

# Máscara de calidad

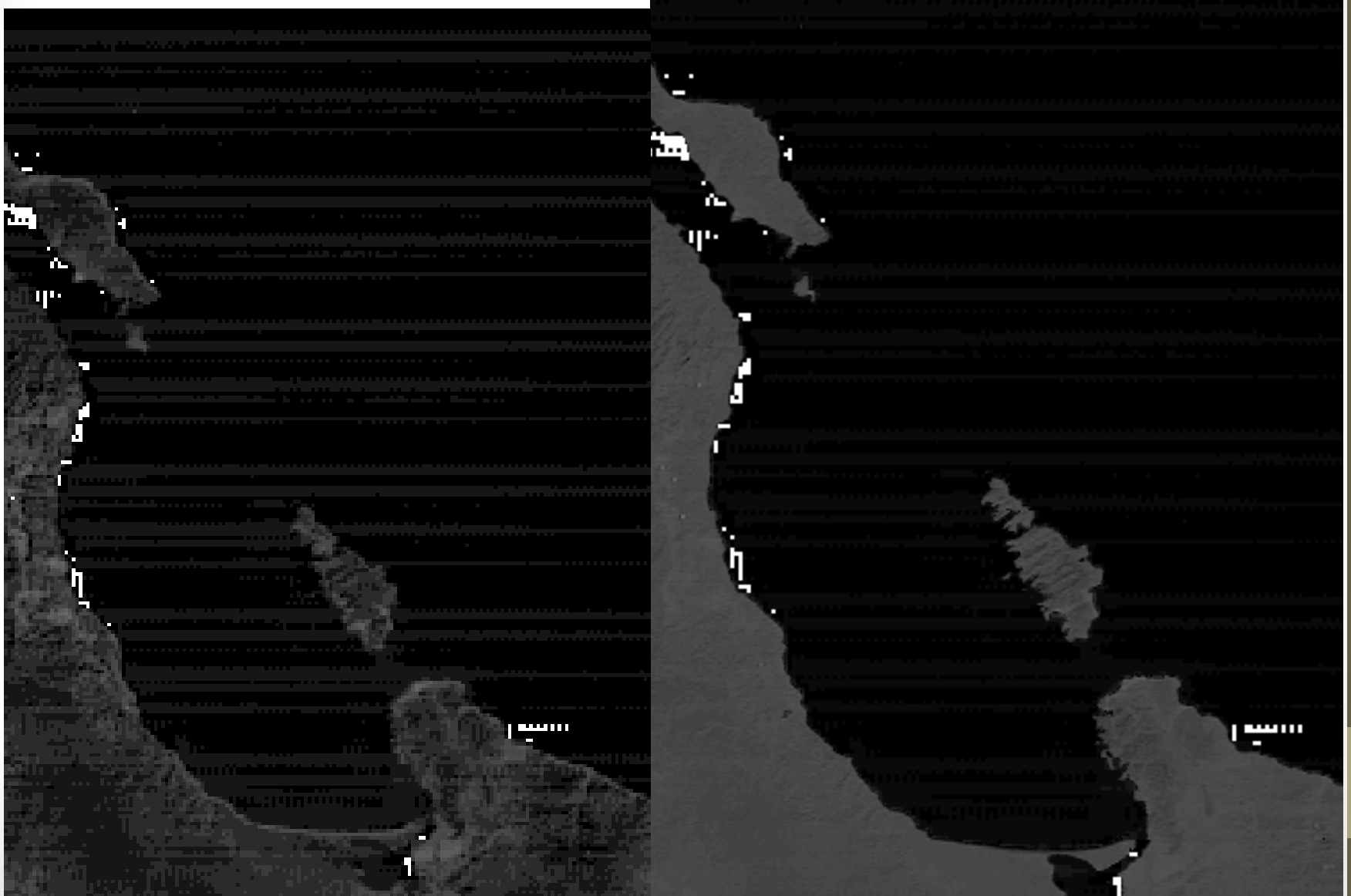
## Algoritmo binario

- CONF=00xxxx10xx11
- M1= 000000100011
- M2= 001111101111
- Value= 001010101111
- $r1 = \text{not}(M1 \text{ xor Value}) = \text{not}(001011001100) = 110101110011$
- $r2 = \text{not}(M2 \text{ xor Value}) = \text{not}(000101000000) = 111010111111$
- $R3 = r1 \text{ or } r2 = 111111111111$

# Máscara de calidad: Ejemplos

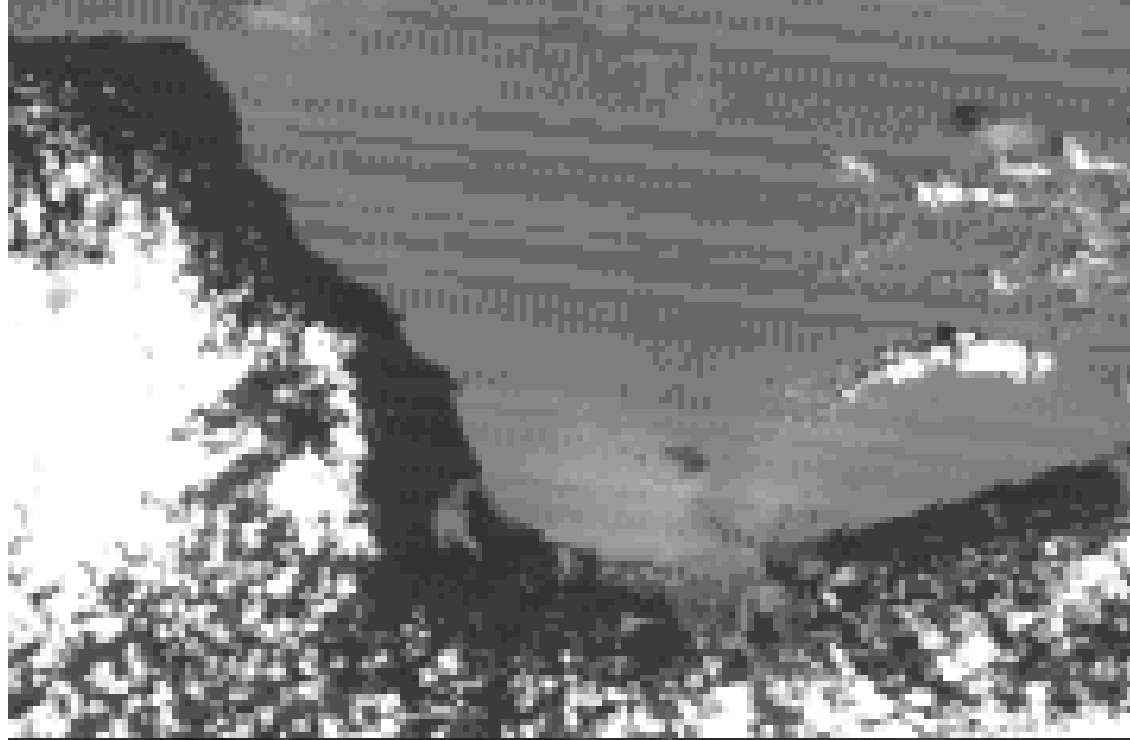
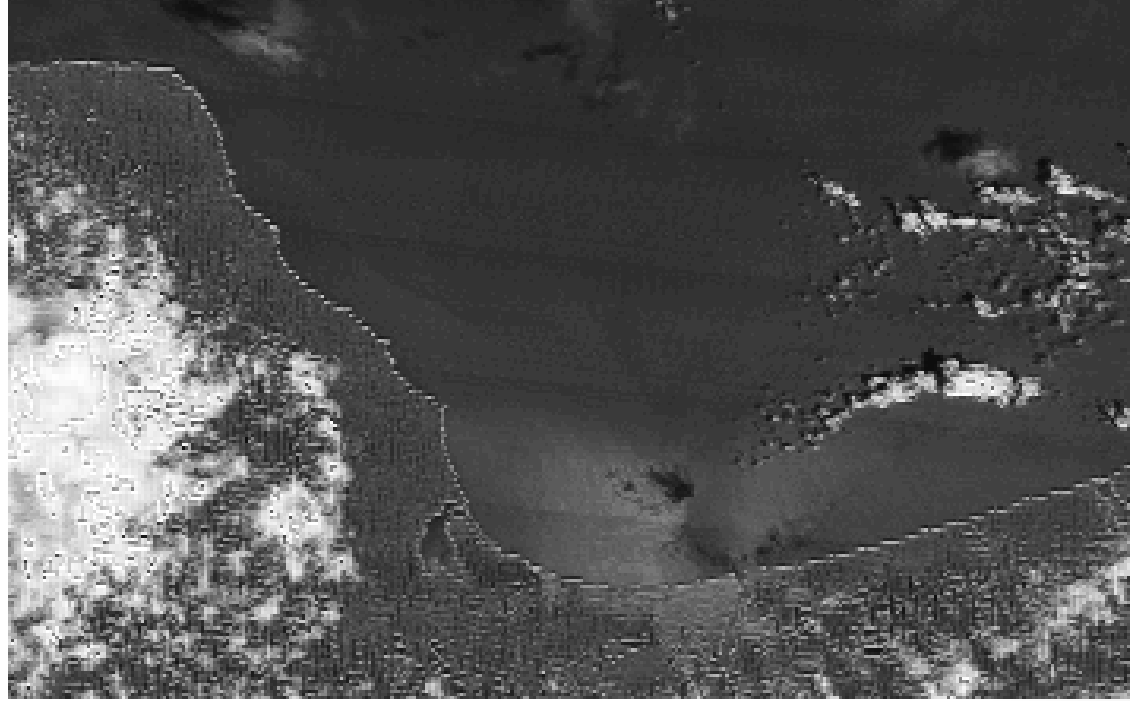


# Resultados MODIS HDF

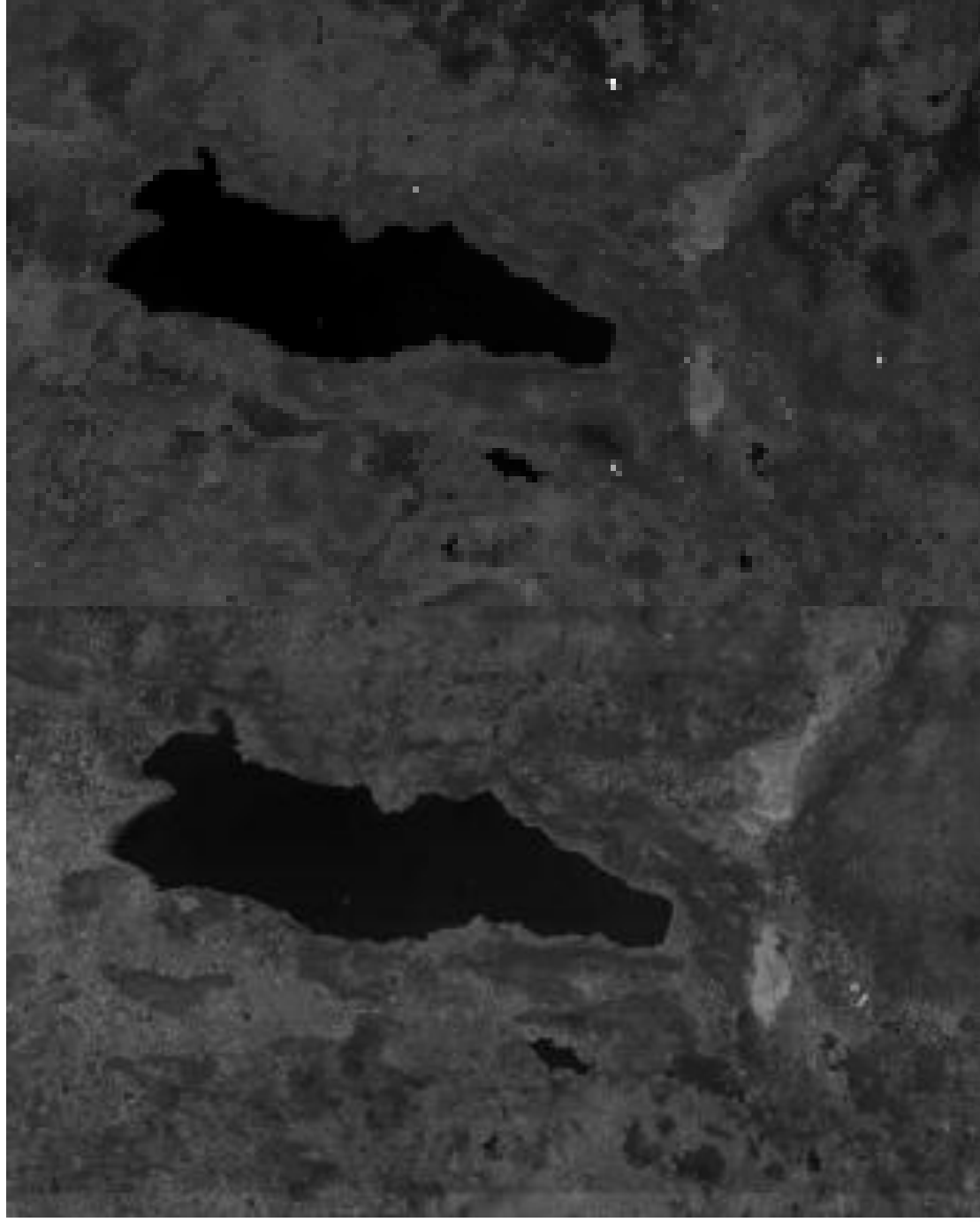




# Resultados MODIS GEOTIFF



# Resultados VIIRS HDF5





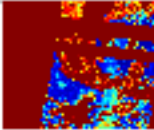
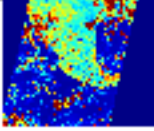
# Resultados de las Pruebas

Características de la máquina donde se realizaron las pruebas

Processor Intel® Core™ i7 CPU Q 740 @ 1.73GHz 8

Memory 8GiB

SO ubuntu 12.04 LTS(64-bit)

Resumen de resultados								
Figura	Tipo	Banda	Fecha	Tamaño ( $h \times w$ )	% Área procesada	Tiempo	Correlación	PSNR
	VIIRS	M3	06-05-2013	13824 × 6400	66.83	35 sec.	0.98729	32.2239
	VIIRS	M8	20-08-2013	13824 × 6400	68.1249	32 sec.	0.986059	32.8161
	MODIS	B4	16-09-2012	11132 × 13360	52.1333	54 sec.	0.988259	32.51
	MODIS	B7	10-01-2013	11132 × 13360	68.4721	1m 10sec	0.972716	33.1112

Cuadro 4: Resumen de resultados

# Reporte de resultados

```
----- RESULT REPORT -----
SVM04_npp_d20130506_t2002365_e2015240_b00001_c20130506205038132755_cspp_dev.h5
Size image (13824 6400)
1 TIME reading files SYS_USER<0 m, 4.12 s> ELAPSED<0 m, 4 s>
.....STARTING PRINCIPAL PROCESS.....
<<<**** Down resolution B1--> b1 and B2-->b2 ****>>>
-----Down resolution time: SYS_USER<0 m, 2.5 s> ELAPSED<0 m, 2 s>
<<<***Reording Memory blup b2up bn mskup1 mskup2 msknew3 ****>>>
---DIF AFTER down resolution: mskb1 vs mskb3: 56736 0.25651 %
---DIF AFTER down resolution: mskb2 vs mskb3: 91840 0.41522 %
---DIF mskB1 vs msk B2: 35104 0.158709 %
---DIF mskB1 vs msk B2 vs B3: 56736 0.25651 %
---Mskb1: 18904288 85.4686 %
---Mskb2: 18869184 85.3099 %
---MskB1: 75610752 85.4614 %
---MskB2: 75476736 85.3099 %
----- reording Memory time: SYS_USER<0 m, 4.62 s> ELAPSED<0 m, 3 s>
<<<*****OMP PROCESS*****>>>
---NUM THREADS 1
---NUM PROCESSOR 2
---MAX THREADS 2
----- Time processing Regression:
<<<**** Interpolation in parameter's space ****>>>
-----time processing regression: SYS_USER<0 m, 0.89 s> ELAPSED<0 m, 1 s>
----- time processing interpolation: SYS_USER<0 m, 0 s> ELAPSED<0 m, 0 s>
---Porcent tried regression( all images): 97.9167
---Porcent real regression( successful): 99.9409
---- (msk b3) 18866560 85 %
---- (msk B3)75655168 85 %
<<<**** Working whit atypical data ****>>>
----- time delete atypital data: SYS_USER<0 m, 0.52 s> ELAPSED<0 m, 1
s>
<<<***** NORMALIZATION*****>>>
-----time NORMALIZACION result: SYS_USER<0 m, 9.24 s> ELAPSED<0 m, 5 s>
2)Time complete process aprox: SYS_USER<0 m, 23.38 s> ELAPSED<0 m, 16 s>
.....Calculating error.....
3) TIME calculating error SYS_USER<0 m, 4.08 s> ELAPSED<0 m, 2 s>
ERROR:
correlation 0.949376
error cuadratico Medio 0.00240092
PSNR 26.1962
RDM 0.14709
RVD 0.186689
4) TIME saving binary image SYS_USER<0 m, 1.04 s> ELAPSED<0 m, 1 s>
OUT FILE : /home/jvazquez/Escritorio/viirs_results/
4) ****TIME PROGRAM**** SYS_USER<0 m, 35.29 s> ELAPSED<23694972 m, 20 s>
```

# Resultados

- Tiempos aproximados de 15 a 70 segundos( dependiendo el área de procesamiento y la cantidad de cores involucrados).
- Correlación cruzada normalizada de 0.85-0.98.
- Mejora la calidad de las imágenes.
- Configuración del procesamiento de las capas de calidad.
- Configuración de los parámetros de regresión.

# CONCLUSIONES

- El tiempo de procesamiento fue mejorado en cada versión, la primer versión en MATLAB tardaba dos horas por imagen, la versión más actual procesa en promedio de un minuto o menos.
- Se uso una regresión lineal adaptativa con el uso del metodo LDLT obteniendo caso el 100 % de los modelos de regresión en menos de 1 segundo.
- La eliminación de datos atípicos contribuye a preservar los datos en el rango establecido.
- Se propone una solución de normalización con gauss seidel.
- Se adapta la metodología de MODIS a sensores VIIRS.
- Se estudiaron otros modelos de regresión que también logran factores de correlación altos.
- Todos los métodos propuestos han sido programados en c++.
- Hay más propuestas : Uso de análisis de componentes principales para encontrar combinaciones lineales que proyecten la mejor relación entre las bandas.



CIMAT

# Fusión y análisis de imágenes satelitales de sensores MODIS y VIIRS

Centro de investigación en matemáticas A.C.