

Correcciones atmosféricas relativas de imágenes de satélite: patrones invariantes múltiples e inversiones

Relative atmospheric corrections of satellite images: multiple invariant patterns and inversions

Fernando Paz Pellat^{1‡}

¹ GRENASER, Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco km 36.5. 56230 Montecillo, Estado de México, México.

[‡] Autor responsable (ferpazpel@gmail.com)

RESUMEN

La corrección de los efectos atmosféricos en imágenes de satélite es una tarea crucial para el entendimiento de los patrones espacio-temporales de las reflectancias e índices de vegetación en el análisis de la dinámica de la vegetación. En el presente trabajo se analizó el problema de inversión de modelos de transferencia de radiación de la atmósfera mediante el uso de los patrones invariantes de las líneas del suelo y de la vegetación densa, bajo un esquema de restricciones múltiples o definición de relaciones a cumplir. Las inversiones de radiación se invirtieron al minimizar una función objetivo o de mérito asociada a las restricciones disponibles y a las relaciones funcionales de compactación (análisis multivariado) de simulaciones de radiación. Las líneas del suelo resultaron mejores con las dos restricciones disponibles, que para el uso de una sola restricción. En el caso general de usar todas las restricciones disponibles para las líneas del suelo y la vegetación densa, se lograron precisiones de clasificación correcta del binomio atmósfera-aerosol mayores al 80%, sin conocimiento previo de esta información. En conclusión, cuando se usan las restricciones de las líneas del suelo y de la vegetación densa, las estimaciones mejoran para las constantes multiplicativas y las soluciones óptimas de los esquemas de inversión se ubican dentro de los mejores cinco valores que minimizan las funciones objetivo propuestas.

Palabras clave: invarianza, líneas del suelo, línea de la vegetación densa, modelos atmosféricos y de aerosoles.

SUMMARY

The correction of atmospheric effects in satellite images is a crucial task for the understanding of spatial-temporal patterns of reflectances and vegetation indices in the analysis of vegetation dynamics. In this paper the problem of inversion of radiative models of the atmosphere was analyzed by the use of invariant line patterns of soil and dense vegetation, under a scheme of multiple constraints. Radiative inversions were achieved by minimizing a merit function associated with the available restrictions and functional relationships compaction (multivariate analysis) of radiative simulations. Soil lines were better with the two constraints available in regard to the use of a single constraint. In the general case of using all available constraints for soil lines and dense vegetation, correct classification accuracies of the pair aerosol-atmosphere were greater than 80%, without prior knowledge of this information. In conclusion, when the restrictions on soil lines and dense vegetation are used to improve estimates of the multiplicative constant and optimal solutions inversion schemes are among the top five values that minimize the proposed objective functions.

Index words: invariance, soil lines, dense vegetation lines, atmospheric and aerosol models.

Cita recomendada:

Paz Pellat, F. 2018. Correcciones atmosféricas relativas de imágenes de satélite: patrones invariantes múltiples e inversiones. Terra Latinoamericana 36: 211-220.

DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v36i3.229>

Recibido: julio de 2017. Aceptado: mayo de 2018.
Publicado en Terra Latinoamericana 36: 211-220.

INTRODUCCIÓN

La corrección atmosférica de la información espectral satelital es un requisito para realizar estimaciones con relación a parámetros biofísicos de la vegetación. A medida que los efectos atmosféricos son más agudos (mayor bruma), la vegetación que se observa por algún índice de vegetación espectral genera una menor cantidad de ésta, aunque a nivel de la superficie terrestre es la misma (Kaufman *et al.*, 2002; Paz, 2018). Lo anterior destaca la necesidad de estandarizar los efectos atmosféricos a una atmósfera de referencia o corregirlos en forma absoluta, para poder analizar las curvas de crecimiento espectrales de la vegetación a un nivel de píxel por píxel.

Aunque existen muchos métodos de corrección atmosférica de imágenes satelitales (Kaufman y Sendra, 1988; Richter, 1996; Kaufman *et al.*, 2002; Fox *et al.*, 2003), la mayoría están basados en el concepto de que los objetos terrestres permanecen invariantes (mismas propiedades ópticas) entre imágenes satelitales (invarianza absoluta). El concepto de invarianza relativa se refiere a que una propiedad geométrica (p. ej. una línea) de un objeto, o conjunto de ellos, en la superficie terrestre permanece igual (sigue siendo una línea) bajo efectos atmosféricos; aunque sus parámetros son modificados por la transformación.

El enfoque de corrección atmosférica que se analiza en este trabajo utiliza las bandas del rojo (R) y del infrarrojo cercano (IRC), por ser dos de las bandas que existen en la mayoría de los sensores satelitales y las de mayor contraste para detectar la vegetación (Tucker, 1979; Huete y Jackson, 1987; Gilabert *et al.*, 2002).

Este trabajo es la segunda parte de uno previamente publicado (Paz, 2018), donde se analizó el problema de inversión de modelos de radiación de la atmósfera mediante el uso de los patrones invariantes de las líneas del suelo y de la vegetación densa. La inversión de los modelos de radiación de la atmósfera consiste en determinar las constantes de la transformación atmosférica por banda espectral ($Y = a + bX$, $a =$ constante aditiva, $b =$ constante multiplicativa, $X =$ banda con efecto atmosférico y $Y =$ banda con efecto atmosférico corregido) para realizar correcciones, donde las constantes son función del tipo de modelo atmosférico y de aerosol. En la versión genérica de las inversiones usando patrones invariantes (Paz, 2018), sin conocimiento del modelo atmosférico ni

del aerosol, los resultados que se obtienen para la línea del suelo fueron relativamente pobres, con problemas de soluciones múltiples en el proceso de inversión. Asimismo, para el caso de la línea de la vegetación densa, la estimación de las constantes aditivas tuvo los mismos problemas que el caso de las líneas del suelo, pero para las constantes multiplicativas, especialmente las relacionadas con la banda del R, los resultados tuvieron mejorías en las estimaciones. Para realizar inversiones atmosféricas; es decir, para estimar las constantes de la transformación, se usan restricciones (p. ej. relaciones entre parámetros) para realizar búsquedas de soluciones (obtenidas previamente) que cumplan con un criterio de minimización usando una función de mérito (p. ej. error cuadrático medio mínimo).

En Paz (2018), para el caso de las líneas del suelo, solo se usó una restricción de búsqueda en las inversiones, de las dos disponibles. A diferencia de esto, en el presente trabajo se analiza el uso de las dos restricciones para el caso de las líneas del suelo y el uso conjunto de las restricciones de búsqueda de las líneas del suelo y de la vegetación densa.

MATERIALES Y MÉTODOS

Base de Datos de las Simulaciones de Radiación Atmosféricas

Las simulaciones del proceso de transferencia radiativa de la atmósfera se realizaron con el modelo 6S (Vermote *et al.*, 1997), que se define como:

$$\rho_{EXO}(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) = \tau_g(\theta_s, \theta_v) \left[\rho_{R+A} + \frac{\rho_{sv} \tau(\theta_s) \tau(\theta_v)}{1 - \rho_{sv} S} \right] \quad (1)$$

donde:

- ρ_{EXO} = Reflectancia exo-atmosférica
- ρ_{sv} = Reflectancia del sistema suelo-vegetación
- S = Albedo esférico
- τ = Transmitancia atmosférica
- θ_s = Ángulo cenital solar
- θ_v = Ángulo cenital de visión del sensor
- ϕ_s = Ángulo acimutal solar
- ϕ_v = Ángulo acimutal de visión
- τ_g = Transmisión total de gases
- ρ_{R+A} = Reflectancia de trayectoria (Rayleigh + Aerosoles)

El modelo 6S simula la absorción por los gases y la dispersión por aerosoles y moléculas (de Rayleigh), que son procesos atmosféricos de la radiancia solar que refleja el sistema suelo-vegetación, cuando la capta el sensor en una plataforma espacial. Si la absorción de los gases se desacopla de la dispersión, como cuando los agentes absorbentes se localizarán por encima de las capas de absorción, la Ecuación 1 modela la transferencia de radiación para un píxel homogéneo Lambertiano de reflectancia ρ_{sv} , a nivel del mar, visto por un sensor afuera de la atmósfera e iluminado por el sol.

La Ecuación 1 puede simplificarse al quitar los argumentos angulares como:

$$\rho_{EXO} = a_{\lambda} + b_{\lambda} \rho_{sv} \quad (2)$$

donde: λ representa una banda espectral (R o IRC). La constante a es la radiancia de trayectoria (radiación que no tiene contacto con la superficie terrestre) y b es una constante multiplicativa que considera la segunda parte del término de la derecha de la Ecuación 1.

Para analizar el esquema de corrección atmosférica se generaron, inicialmente, 82 944 simulaciones de radiación con el modelo 6S, variando los modelos atmosféricos y los tipos de aerosoles (Cuadro 1). Las bandas espectrales que se usaron fueron las del sensor ETM+ (satélite LANDSAT 7), con 6 bandas, por lo que el ángulo cenital de visión fue de 0° (nadir). Los ángulos cenitales solares fueron 0°, 10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60° y 70°. No se contempló el efecto del acimut relativo sol-sensor, ya que las simulaciones no mostraron un efecto significativo de esta variable. La altitud varió de 0 a 5 km, en intervalos de 0.5 km. Las visibilidades atmosféricas fueron de 5, 7, 10, 25, 50, 100, 150 y 200 km. Para las simulaciones primero se dejó fijo el ángulo cenital solar, después se modificó la altitud y,

Cuadro 1. Atmósferas y aerosoles del modelo 6S.

Código 6S	Atmósfera	Código 6S	Aerosol
1	Tropical	1	Continental
2	Verano latitud media	3	Urbano
3	Invierno latitud media	5	Desértico
6	E.U.A. Estándar 62		

para cada altitud, se cambió la visibilidad atmosférica. El proceso se realizó para cada aerosol y atmósfera particular. Para una atmósfera dada (ángulo cenital solar y altitud fija), con el aerosol fijo, se analizó cada visibilidad atmosférica y se simuló la relación entre las bandas del R e IRC. La Ecuación 2 se utilizó para analizar el efecto de los cambios de las reflectancias de la mezcla suelo-vegetación, con variación de la banda del R de 5 a 25% (intervalos de 2.5%) y la banda del IRC de 5 a 50% (intervalos de 5%). La relación entre las reflectancias terrestres y aquellas con efecto atmosférico (para la visibilidad de interés) se examinó por regresión lineal, con la relación (2). El análisis de los resultados mostró que el error asociado al uso de la Ecuación 2 fue menor al 4% (banda del IRC) y menor al 1% (banda del R) en relación al uso de la Ecuación 1.

En lo siguiente sólo se incluyen y discuten los resultados de las simulaciones para las bandas del R e IRC, con una altitud máxima de 4 km. El subconjunto de simulaciones retenidas fue de 12 288, ya que el aerosol marítimo y el estratosférico no se analizaron en este trabajo, por enfocarse solo a la parte terrestre.

Para la realización de correcciones atmosféricas relativas; es decir, hacer que dos imágenes tengan los mismos efectos atmosféricos o ninguno (cuando la imagen de referencia ha sido corregida atmosféricamente con otra técnica), es necesario definir las relaciones entre ambas imágenes.

Si se consideran las reflectancias terrestres (sin atmósfera) como correspondientes a una escena satelital 1 y a las reflectancias con atmósfera como de la escena satelital 2, para las bandas espectrales del R y del IRC, se pueden establecer las relaciones:

$$R_2 = a_R + b_R R_1 \quad (3)$$

$$IRC_2 = a_{IRC} + b_{IRC} IRC_1 \quad (4)$$

donde: los parámetros a y b se definen en función del modelo atmosférico y de aerosol que se use, para una visibilidad atmosférica, ángulo cenital solar y altitud dada. En general, las relaciones 3 y 4 pueden considerarse como relativas a la atmósfera que se usó en una escena 1 de referencia o estándar.

Compactación Funcional de las Simulaciones Atmosféricas

Todas las simulaciones se compactaron funcionalmente (se definió una relación entre la variable dependiente y las independientes) con las visibilidades atmosféricas (espesor óptico de la atmósfera) como puntos comunes, para obtener relaciones genéricas entre los diferentes parámetros, que se definen en las relaciones 3 y 4:

$$b_{IRC} = A_1 + B_1 b_R \tag{5}$$

$$b_R = A_2 + B_2 a_R \tag{6}$$

$$b_{IRC} = A_3 + B_3 a_{IRC} \tag{7}$$

$$a_{IRC} = A_4 + B_4 a_R \tag{8}$$

Los parámetros A_i y B_i , $i=1, 2, 3, 4$, que se determinaron para diferentes visibilidades atmosféricas, posteriormente se compactaron y se dejó fijo el modelo atmosférico y el aerosol:

$$A_i \text{ o } B_i = k_{1,i} + k_{2,i} \theta_s + k_{3,i} Alt + k_{4,i} \theta_s^2 + k_{5,i} Alt^2 + k_{6,i} \theta_s^3 + k_{7,i} Alt^3 \tag{9}$$

Así, para un ángulo cenital solar y altitud dada, con el modelo atmosférico y el aerosol fijos, es posible estimar los parámetros de las relaciones 5 a 8.

Restricciones de Búsqueda para las Inversiones Radiativas

Con el uso de los patrones espectrales del crecimiento de la vegetación, que se define por el índice de área foliar o IAF, se pueden establecer propiedades invariantes (líneas iso-IAF; Huete *et al.*, 1985; Yoshioka *et al.*, 2000; Paz, 2018). La Figura 1 muestra simulaciones de la mezcla suelo-vegetación (Paz *et al.*, 2005a), donde se observa que los suelos (línea más inferior) caen sobre una “línea de suelo” (Baret *et al.*, 1983), que se define como:

$$IRC = a_s + b_s R \tag{10}$$

donde: el subíndice s es por suelo.

En la Figura 1 se observa, también, que los patrones espectrales de la mezcla suelo-vegetación, con igual IAF, es del tipo lineal (líneas iso-IAF). Asimismo, a medida que la vegetación se incrementa o se vuelve más densa (IAF grande), la banda del R se satura (no cambia de valor), por lo que solo el IRC sigue creciendo y forma una línea recta vertical (ápice de la Figura 1), denominada línea de la vegetación densa. Los patrones de las líneas del suelo y de la vegetación densa forman patrones invariantes; es decir, siguen siendo líneas rectas con o sin efecto atmosférico; aunque sus parámetros varían. Paz *et al.* (2005b) utilizan dichos patrones invariantes para desarrollar métodos de correcciones atmosféricas relativas.

Restricciones Asociadas a las Líneas del Suelo

Paz *et al.* (2005b) establecieron que las inversiones de los modelos radiativos de la atmósfera deberán cumplir condiciones para que puedan considerarse válidas:

$$\frac{b_{s2}}{b_{s1}} = \frac{b_{IRC}}{b_R} \tag{11}$$

$$a_{IRC} = (a_{s2} - a_{s1} b_{IRC}) + b_{s2} a_R \tag{12}$$

donde: en la escena 1 y 2 se supone que se conocen los parámetros de las líneas del suelo.

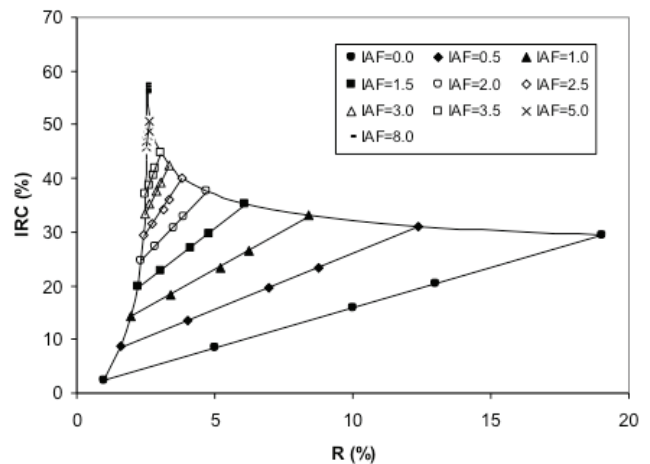


Figura 1. Patrones espectrales de la mezcla suelo-vegetación, donde R es la reflectancia del rojo e IRC la del infrarrojo. IAF = índice de área foliar.

Restricciones Asociadas a las Líneas de la Vegetación Densa

Paz *et al.* (2005b) mostraron que para una línea de vegetación densa definida por $R = R_c$, la restricción que se asocia a las inversiones de modelos radiativos está dada por:

$$a_R = R_{c2} - b_R R_{c1} \quad (13)$$

donde: se supone que los parámetros de las líneas de vegetación densa en la escena 1 y 2 se conocen.

Tanto para las líneas del suelo, como para las de la vegetación densa, se puede usar un clasificador genérico de objetos (Palacios *et al.*, 2006) para definir las clases “suelo desnudo” y “vegetación densa”. Así, para las clases de interés se estiman por regresión lineal los parámetros de las líneas del suelo y de la vegetación densa. De esta manera es posible obtener los datos de dichas líneas, para cualquier conjunto de escenas satelitales y analizar cada una para una escena de referencia.

Para probar las estrategias de inversiones radiativas de la atmósfera se usó un subconjunto de 5376 simulaciones, al no considerar el aerosol de quema de biomasa por presentar problemas en la compactación funcional (Paz, 2018).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Inversiones Radiativas Asociadas a las Líneas del Suelo

Para invertir el modelo radiativo de la atmósfera, parámetros de las relaciones 3 y 4, para el caso de las líneas del suelo se utilizaron las relaciones 11 y 12 como criterios de restricción de búsqueda en las relaciones (compactación) funcionales de las simulaciones radiativas, relaciones 5 a 8. Con base en lo anterior, el uso conjunto de las relaciones 11 y 12 y 5 a 8, se pueden analizar en forma combinada (solución de un par de ecuaciones) o independiente, para establecer las ecuaciones de las inversiones (estimaciones) como las siguientes (donde el subíndice e significa estimación):

$$\begin{aligned} b_X &= \frac{b_{s2}}{b_{s1}} \\ b_{R,e} &= \frac{A_1}{b_X - A_1} \\ b_{IRC,e} &= b_X b_{R,e} \\ a_{R,e} &= \frac{(a_{s2} - a_{s1} b_{IRC,e}) - A_4}{B_4 - b_{s2}} \\ a_{IRC,e} &= a_{s2} - a_{s1} b_{IRC,e} + b_{s2} a_{R,e} \end{aligned} \quad (14)$$

Las estimaciones del conjunto (14) se pueden condicionar, adicionalmente, a otro sistema de ecuaciones de congruencia (subíndice c) del mismo sistema global de ecuaciones disponibles:

$$\begin{aligned} b_{R,c} &= A_2 + b_2 a_{R,e} \\ b_{IRC,c} &= A_3 + B_3 a_{IRC,e} \\ a_{R,c} &= \frac{b_{R,e} - A_2}{B_2} \\ a_{IRC,c} &= \frac{b_{IRC,e} - A_3}{B_3} \end{aligned} \quad (15)$$

Del sistema de ecuaciones 14 y 15, es posible establecer un sistema de errores cuadráticos de estimación (función de mérito):

$$\begin{aligned} e2, b_R &= (b_{R,e} - b_{R,c})^2 \\ e2, b_{IRC} &= (b_{IRC,e} - b_{IRC,c})^2 \\ e2, a_R &= (a_{R,e} - a_{R,c})^2 \\ e2, a_{IRC} &= (a_{IRC,e} - a_{IRC,c})^2 \end{aligned} \quad (16)$$

Así, el problema de estimación o inversión puede establecerse como:

$$\text{Minimizar } \{e2, b_R + e2, b_{IRC} + e2, a_R + e2, a_{IRC}\} \quad (17)$$

Las Figuras 2 y 3 muestran estimaciones razonables para b_R y b_{IRC} , respectivamente, y que mejoran las estimaciones realizadas por Paz (2018) mediante el uso de la relación (11) únicamente. Para el caso de las Figuras 4 y 5, las estimaciones de a_R y a_{IRC} resultan relativamente pobres, lo que deja en claro la dificultad de las soluciones múltiples del problema de inversión de los modelos radiativos.

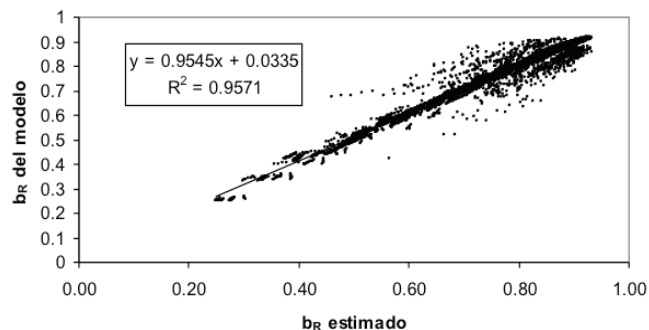


Figura 2. Resultado de la estimación de b_R , líneas del suelo.

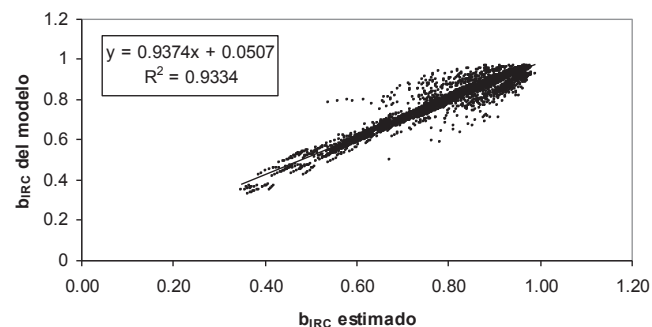


Figura 3. Resultado de la estimación de b_{IRC} , líneas del suelo.

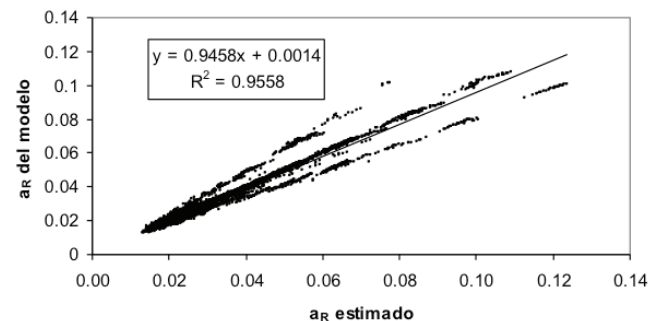


Figura 4. Resultado de la estimación de a_R , líneas del suelo.

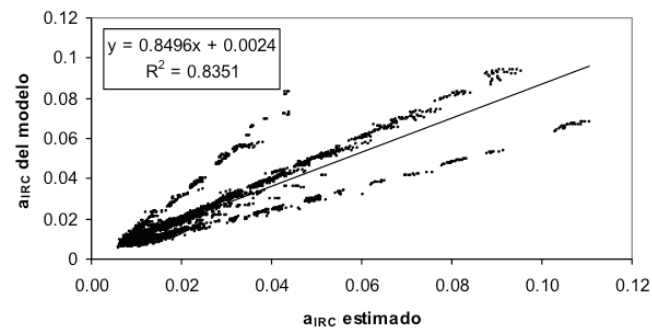


Figura 5. Resultado de la estimación de a_{IRC} , líneas del suelo.

Este problema de soluciones múltiples lo enfatizó previamente Paz (2018) para aclarar que existe un conjunto de modelos atmosféricos y aerosoles (además de visibilidades atmosféricas o espesores ópticos) que satisfacen las restricciones que se le impongan a un problema de inversión. Evidentemente, a medida que el número de restricciones es mayor, el problema de soluciones múltiples se reduce. Así, es crítico usar el máximo número de restricciones que puedan extraerse en forma directa de una imagen satelital.

El Cuadro 2 muestra los estadísticos de los errores de estimación (porcentaje en relación al del modelo) de las inversiones, con el uso de las restricciones de las líneas del suelo, donde resulta evidente que las estimaciones de b_R y b_{IRC} son aceptables (95% con errores menores a 9%). Para el caso de las estimaciones de a_R , los errores son también aceptables (90% con errores menores a 16%, aproximadamente). Para el caso de las estimaciones de a_{IRC} las estimaciones tienen un comportamiento más pobre (75% con errores menores a 21%).

Para analizar la confusión presentada en las estimaciones, con respecto a la selección correcta del modelo atmosférico y aerosol, el Cuadro 3 muestra la matriz de confusión de las estimaciones realizadas.

En la diagonal del Cuadro 3 se muestra el número de casos congruentes, con respecto a los disponibles (448) del proceso de seleccionar el modelo atmosférico y aerosol mediante el uso de la técnica de estimación o inversión propuesta.

En el Cuadro 4 se muestra la precisión de las estimaciones (porcentaje de aciertos) para el caso del binomio atmósfera-aerosol y para el caso de sólo atmósfera.

Cuadro 2. Errores de estimación (%), líneas del suelo.

Estadísticos	a_R	b_R	a_{IRC}	b_{IRC}
Mínimo	0.00	0.00	0.00	0.00
Máximo	32.37	34.08	88.99	34.08
Promedio	4.77	2.21	13.73	2.21
Desviación estándar	6.62	3.29	18.86	3.29
Percentil 0.75	6.70	2.22	20.46	2.22
Percentil 0.80	9.22	3.04	28.47	3.04
Percentil 0.85	12.28	4.56	35.60	4.56
Percentil 0.90	16.23	6.44	41.75	6.44
Percentil 0.95	20.78	8.95	61.79	8.95

Cuadro 3. Matriz de confusión de las inversiones, líneas del suelo, para atmósfera-aerosol.

(Atmósfera-aerosol)	(1-1)	(1-3)	(1-5)	(2-1)	(2-3)	(2-5)	(3-1)	(3-3)	(3-5)	(6-1)	(6-3)	(6-5)	Total
(1-1)	282	0	155	0	0	9	0	0	1	0	0	1	448
(1-3)	8	142	5	113	57	59	16	0	11	20	0	17	448
(1-5)	94	0	354	0	0	0	0	0	0	0	0	0	448
(2-1)	0	7	0	300	0	116	0	0	2	1	0	22	448
(2-3)	0	76	0	0	275	0	10	0	15	29	14	29	448
(2-5)	20	0	1	122	0	297	0	0	0	5	0	3	448
(3-1)	0	5	0	0	11	0	241	0	174	0	17	0	448
(3-3)	0	1	0	0	0	0	0	423	0	0	24	0	448
(3-5)	4	8	0	8	19	0	76	0	297	9	27	0	448
(6-1)	0	13	0	6	14	0	0	0	19	215	0	181	448
(6-3)	0	21	0	0	13	0	51	14	48	0	301	0	448
(6-5)	7	21	0	17	24	0	2	0	1	51	0	325	448
Total	415	294	515	566	413	481	396	437	568	330	383	578	5376

Se observa en el Cuadro 4 un promedio del 64.2% de precisión de las inversiones, que contrasta con los errores de estimación relativamente bajos de las estimaciones que se realizaron; a excepción de las de a_{IRC} . Esto es producto del problema de soluciones múltiples que se discutió anteriormente.

Inversiones Radiativas Asociadas a las Líneas del Suelo y de la Vegetación Densa

Si se sigue un procedimiento similar al que se discutió para las inversiones a través de las líneas del suelo, es posible analizar el uso conjunto de las restricciones que se asocian a las líneas del suelo y a la vegetación densa, relaciones 11 a 13. Para este caso, el conjunto de las relaciones de estimación, si se usan los resultados de Paz (2018), está dado por:

$$\begin{aligned}
 b_X &= \frac{b_{s2}}{b_{s1}} \\
 a_{Re} &= \frac{R_{c2} - A_2 R_{c1}}{I + B_2 R_{c1}} \\
 b_{Re} &= \frac{R_{c2} - a_{Re}}{R_{c1}} \\
 b_{IRC,e} &= b_X b_{Re} \\
 a_{IRC,e} &= A_4 + B_4 a_{Re}
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

Al igual que el caso de las líneas del suelo, las estimaciones del conjunto (18) se pueden condicionar,

adicionalmente, a otro sistema de ecuaciones de congruencia del mismo sistema global de ecuaciones disponibles:

$$\begin{aligned}
 b_{RC} &= \frac{A_1}{b_X - B_1} \\
 b_{IRC,e} &= b_X b_{Re} \\
 a_{Re} &= \frac{(a_{s2} - a_{s1} b_{IRC,e}) - A_2}{B_4 - b_{s2}} \\
 a_{IRC,e} &= a_{s2} - a_{s1} b_{IRC,e} + b_{s2} a_{Re}
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

Cuadro 4. Precisión inversiones, líneas del suelo.

Binomio	Atmósfera-Aerosol	Atmósfera
(1-1)	62.95	
(1-3)	31.70	57.89
(1-5)	79.02	
(2-1)	66.96	
(2-3)	61.38	64.88
(2-5)	66.29	
(3-1)	53.79	
(3-3)	94.42	71.5
(3-5)	66.29	
(6-1)	47.99	
(6-3)	67.19	62.57
(6-5)	72.54	

La función objetivo que se utilizó es similar al caso de las líneas del suelo, pero sin usar e_2 , b_{IRC} .

Para b_R y b_{IRC} , Figuras 6 y 7, las estimaciones son aceptables (por el diseño de las ecuaciones que se utilizaron) y para a_R y a_{IRC} , Figuras 8 y 9, los resultados son parecidos a los que se encontraron al usar solo las líneas del suelo, pero con estimaciones más precisas.

Un punto central implícito en las estimaciones que se realizaron, es que aún con un buen conocimiento de b_R y b_{IRC} , hay soluciones múltiples en las estimaciones de a_R y a_{IRC} . Así, las estrategias de mejora algorítmica deben orientarse a una mejor estimación de las constantes aditivas de la atmósfera (radiancias de trayectoria).

La mejoría en la precisión de las estimaciones que se realizaron se destaca en el Cuadro 5, donde se muestra que aun las estimaciones de a_{IRC} mejoraron a un nivel aceptable (85% con un error menor a 19%).

El Cuadro 6 muestra la matriz de confusión del binomio atmósfera-aerosol.

El Cuadro 7 muestra la precisión de la selección correcta del binomio en las estimaciones. Se observa que el promedio de la selección correcta del modelo atmosférico y el aerosol en las estimaciones fue del 82.8%, lo que resulta congruente con los valores que se estimaron de las constantes aditivas y multiplicativas asociadas a los modelos atmosféricos y aerosoles.

Los modelos de inversión radiativa atmosférica propuestos por Paz (2018) se extendieron para la consideración de las dos restricciones de búsqueda de soluciones asociadas a los patrones invariantes de las líneas del suelo y al uso conjunto de todas las restricciones disponibles asociadas a las líneas del suelo y de la vegetación densa. Si se consideran solo las restricciones de las líneas del suelo, los resultados que se obtienen del esquema de inversión o estimación, dan resultados aceptables para las constantes multiplicativas de las perturbaciones atmosféricas, pero relativamente pobres para las constantes aditivas. Al usar en forma conjunta las restricciones de las líneas del suelo y de la vegetación densa, las estimaciones mejoran substancialmente, en especial para el caso de las constantes multiplicativas.

Es importante destacar, que las soluciones óptimas de los esquemas de inversión para las dos situaciones que se analizaron están dentro de los mejores cinco

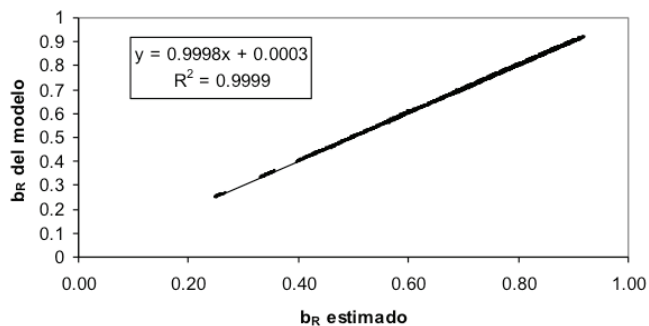


Figura 6. Resultado de la estimación de b_R , líneas del suelo y vegetación densa.

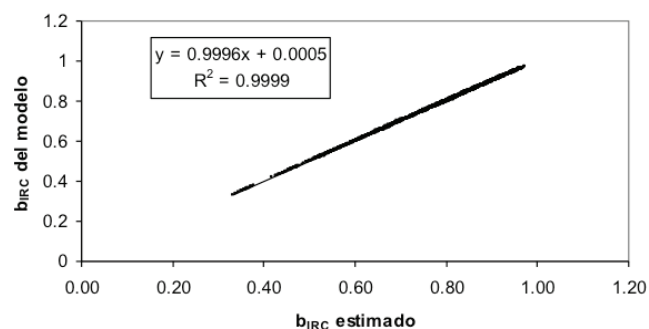


Figura 7. Resultado de la estimación de b_{IRC} , líneas del suelo y vegetación densa.

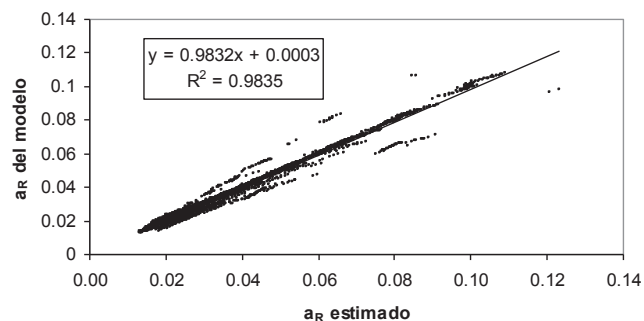


Figura 8. Resultado de la estimación de a_R , líneas del suelo y vegetación densa.

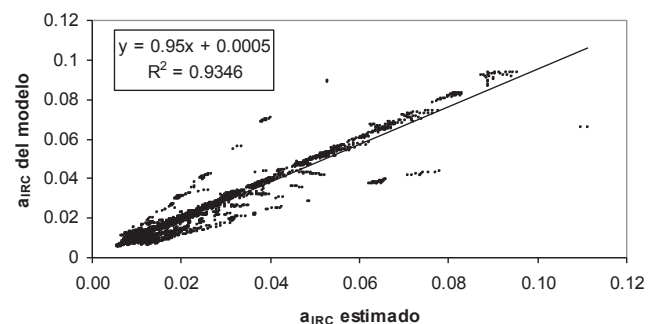


Figura 9. Resultado de la estimación de a_{IRC} , líneas del suelo y vegetación densa.

Cuadro 5. Errores de estimación (%), líneas del suelo y vegetación densa.

Estadísticos	a_R	b_R	a_{IRC}	b_{IRC}
Mínimo	0.00	0.00	0.00	0.00
Máximo	29.98	1.75	106.8	1.75
Promedio	2.93	0.07	9.16	0.07
Desviación estándar	5.10	0.14	16.05	0.14
Percentil 0.75	2.35	0.06	7.39	0.06
Percentil 0.80	3.17	0.08	9.98	0.08
Percentil 0.85	5.85	0.12	18.81	0.12
Percentil 0.90	9.26	0.21	28.49	0.21
Percentil 0.95	16.08	0.36	45.18	0.36

valores que minimizan las funciones objetivo propuestas, por lo que hay espacio para mejorar los algoritmos utilizados y las funciones objetivo o de mérito.

En particular, resulta interesante explorar el uso de relaciones funcionales de compactación de los modelos radiativos que consideren en forma simultánea tres variables, ya que la segunda restricción que se asocia a los patrones invariantes de las líneas del suelo está en función de tres variables.

Cuadro 7. Precisión inversiones, líneas del suelo y vegetación densa.

Binomio	Atmósfera-Aerosol	Atmósfera
(1-1)	83.26	86.68
(1-3)	85.71	
(1-5)	91.07	
(2-1)	83.48	82.44
(2-3)	76.79	
(2-5)	87.05	
(3-1)	81.47	83.63
(3-3)	87.72	
(3-5)	81.7	
(6-1)	82.14	78.57
(6-3)	73.88	
(6-5)	79.69	

CONCLUSIONES

- Cuando se usan las restricciones de las líneas del suelo y de la vegetación densa, de manera conjunta, las estimaciones mejoran para las constantes multiplicativas de las correcciones atmosféricas. Las soluciones óptimas de los esquemas de inversión para

Cuadro 6. Matriz de confusión de las inversiones, líneas del suelo y vegetación densa, para atmósfera-aerosol.

(Atmósfera-aerosol)	(1-1)	(1-3)	(1-5)	(2-1)	(2-3)	(2-5)	(3-1)	(3-3)	(3-5)	(6-1)	(6-3)	(6-5)	Total
(1-1)	373	4	65	0	0	5	0	0	0	0	0	1	448
(1-3)	48	384	0	2	14	0	0	0	0	0	0	0	448
(1-5)	39	0	408	1	0	0	0	0	0	0	0	0	448
(2-1)	0	0	2	374	3	59	0	0	0	2	0	8	448
(2-3)	0	35	0	48	344	0	0	0	0	0	21	0	448
(2-5)	5	1	0	43	1	390	0	0	0	7	0	1	448
(3-1)	0	0	0	0	0	0	365	0	74	4	1	4	448
(3-3)	0	0	0	0	3	0	19	393	0	0	33	0	448
(3-5)	0	0	0	0	0	0	46	10	366	5	21	0	448
(6-1)	0	0	0	5	5	3	0	0	7	368	0	60	448
(6-3)	0	3	0	0	33	0	0	30	3	48	331	0	448
(6-5)	0	0	0	5	11	2	8	0	1	56	8	357	448
Total	465	427	475	478	414	459	438	433	451	490	415	431	5376

las dos situaciones se ubican dentro de los mejores cinco valores que minimizan las funciones objetivo o de mérito propuestas, lo que plantea la posibilidad de optimizar los algoritmos y explorar el uso de relaciones funcionales de compactación de los modelos de radiación que consideren en forma simultánea tres variables, lo que se ajustaría a la segunda restricción que se asocia a los patrones invariantes de las líneas del suelo.

- En las aplicaciones de correcciones atmosféricas de imágenes de satélite, los métodos introducidos pueden ser aplicados en términos operativos en función del conocimiento de las líneas del suelo y de la vegetación densa, que pueden ser obtenidas usando clasificadores genéricos de objetos, de tal forma que los índices de vegetación, variables biofísicas, que se estimen representen la cantidad de información en la superficie terrestre y no una sobreestimación producto de los efectos atmosféricos. Por otra parte, para que el proceso de corrección atmosférica propuesto se considere en términos absolutos y no relativos, se sugiere realizar mediciones en campo con un espectroradiómetro, sobre los suelos desnudos de un área que presente esta condición en una imagen satelital, de tal modo que los parámetros que se estiman de la línea del suelo, sin atmósfera, pueden servir como base. Algo similar puede ser hecho para la vegetación densa.

LITERATURA CITADA

- Baret, F., S. Jacquemoud, and J. F. Hanocq. 1983. The soil line concept in remote sensing. *Remote Sens. Rev.* 7: 65-82. doi: 10.1080/02757259309532166.
- Fox, G. A., G. J. Sabbagh, and S. W. Searcy. 2003. Radiometric normalization of multi-temporal images based on image soil lines. *Trans. ASAE* 46: 851-859.
- Gilbert, M. A., J. González-Piqueras, F. J. García-Haro, and J. Meliá. 2002. A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sens. Environ.* 82: 303-310. doi: 10.1016/S0034-4257(02)00048-2.
- Huete, A. R. and R. D. Jackson. 1987. Suitability of spectral indices for evaluating vegetation characteristics on arid rangelands. *Remote Sens. Environ.* 23: 213-232. doi: 10.1016/0034-4257(87)90038-1.
- Huete, A. R., R. D. Jackson, and D. F. Post. 1985. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote Sens. Environ.* 17:37-53. doi: 10.1016/0034-4257(85)90111-7.
- Kaufman, Y. J. and C. Sendra, 1988. Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-IR satellite imagery. *Int. J. Remote Sens.* 9: 1357-1381. doi: 10.1080/01431168808954942.
- Kaufman, Y. J., N. Gobron, B. Pinty, J. L. Widlowski, and M. M. Verstraete. 2002. Relationship between surface reflectance in the visible and mid-IR used in MODIS aerosol algorithm - theory. *Geophys. Res. Lett.* 29: 31-1-31-4. doi: 10.1029/2001GL014492.
- Palacios, L. A., F. Paz, J. L. Oropeza, B. Figueroa, M. Martínez, C. A. Ortiz y E. García. 2006. Clasificador genérico de objetos en imágenes ETM+. *Agrociencia* 40: 613-626.
- Paz, F., E. Palacios, E. Mejía, M. Martínez y L. A. Palacios. 2005a. Análisis de los espacios espectrales de la reflectividad del follaje de los cultivos. *Agrociencia* 39: 293-301.
- Paz, F., E. Palacios, L. A. Palacios, L. Tijerina y E. Mejía. 2005b. Correcciones atmosféricas usando patrones invariantes en el espacio del rojo e infrarrojo cercano. *Rev. Latinoame. Rec. Nat.* 1: 51-64.
- Paz, F. 2018. Correcciones atmosféricas relativas de imágenes satelitales: patrones invariantes y modelos atmosféricos. *Terra Latinoamericana* 36: 1-12. doi: 10.28940/terra.v36i1.228.
- Richter, R. 1996. A spatially adaptive fast atmospheric correction algorithm. *Int. J. Remote Sens.* 17: 1201-1214. doi: 10.1080/01431169608949077.
- Tucker, C. J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.* 8: 127-150. doi: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.
- Vermote, E. F., D. Tanre, J. L. Deuze, M. Herman, and J. J. Morcrette. 1997. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 35: 675-686. doi: 10.1109/36.581987.
- Yoshioka, H., T. Miura, A. R. Huete, and B. D. Ganapol. 2000. Analysis of vegetation isolines in red-nir reflectance space. *Remote Sens. Environ.* 74: 313-326. doi: 10.1016/S0034-4257(00)00130-9.