

EVALUACIÓN DEL MODELO DART EN EL INFRARROJO TÉRMICO

C. Mattar (*), J. A. Sobrino (*), J. C. Jiménez-Muñoz (*), Y. Julián (*), G. Soriá (*), J. Cuenca (*),
M. Romaguera (*), V. Hidalgo (*), B. Franch (*), R. Oltra (*), J. P. Gastellu-Etchegorry (**).

(*)*Unidad de Cambio Global, Imaging Processing Laboratory, Universidad de Valencia,
P. O. Box 22085, E-46071 Valencia, España.*

(**)*Centre d'Études Spatiales de la Biosphère (CESBIO), Université Paul Sabatier,
Avenue Edouard Belin 18, 31401 Toulouse, Francia.*

RESUMEN

En el presente trabajo se evalúa la temperatura de brillo simulada por el modelo DART (Discrete Anisotropy Radiative Transfer), sobre diferentes superficies agrícolas. Con este fin se utilizaron como datos de entrada los valores de emisividad y temperatura de la superficie, LAI, altura de la vegetación, radiosondeos, etc. medidos en la campaña Sentinel-2 Fluorescence EXperiment (Sen2Flex) realizada durante los meses de junio y julio del 2005 en Barrax (Albacete).

La simulación DART se ha realizado a partir de un mapa de usos de suelo de la zona de estudio y para las 10 bandas térmicas ubicadas entre los 7,9 y 13,1 μm correspondientes al sensor AHS. Las temperaturas obtenidas mediante DART para cada banda se han comparado con las correspondientes extraídas de las imágenes AHS sobre la zona de estudio. Los resultados muestran el buen funcionamiento del modelo DART, así se obtienen diferencias medias para todos los canales del orden de 1 K en la comparación entre los datos DART y los obtenidos mediante AHS para distintas parcelas de suelo desnudo y de alfalfa, lo que muestra la utilidad de DART para realizar estudios de simulación de alta resolución en el intervalo térmico del espectro.

ABSTRACT

In the present work, the brightness temperature has been simulated by DART (Discrete Anisotropy Radiative Transfer) over different agricultural areas. In this context, emissivity, land surface temperature, LAI, vegetation height and radiosondes data have been used as input model parameters. These data were acquired during Sentinel-2 Fluorescence EXperiment (Sen2Flex) field campaign in June and July 2005 in Barrax (Albacete).

DART simulations have been realized for 10 thermal bands located between 7,9 and 13,10 μm belonging to AHS sensor using a land cover classification. DART simulated temperatures have been compared with the corresponding AHS sensor data for the study area. Results show the good behaviour of the DART model, by obtaining mean differences for all thermal channels around 1 K between DART and AHS data for alfalfa and bare soil test sites. These results show the usefulness of DART model for high spatial resolution studies in the thermal spectrum.

Palabras clave: temperatura de brillo, DART, AHS, superficies agrícolas.

INTRODUCCIÓN

Las mediciones de la temperatura superficie están propensas a tener efectos anisotrópicos direccionales relacionados con la estructura geométrica de la superficie y el balance de energía generada por esta (Lagouarde & Irvine, 2008). Una de las formas de estudiar esta anisotropía es a través de modelos de simulación los cuales pueden generar, a partir de medidas in-situ, escenas naturales en distintos intervalos del espectro electromagnético entre el visible al infrarrojo térmico.

Uno de los modelos que permite generar este tipo de escenas es el modelo DART (Discrete Anisotropy Radiative Transfer) el cual fue desarrollado para simular escenas naturales en el

espectro visible e infrarrojo cercano (Gastellu *et al.*, 1996), pero en la actualidad este modelo presenta innumerables mejoras, como la simulación en el infrarrojo térmico, ya sea de escenarios naturales o urbanos, influencia de la transferencia radiativa atmosférica sobre las escenas simuladas, entre otras (Gastellu *et al.*, 2004). El modelo DART permite simular escenas considerando cada elemento como una celda, la cual puede ser opaca o turbia, en relación a la emisión de energía. Este modelo utiliza la ecuación de Hapke (1993) para la estimación de la energía emitida de una celda, dicha ecuación corresponde a (1):

$$\frac{dI(r, \Omega)}{dr} = \int_{4\pi} \alpha(r, \Omega') \omega(r, \Omega') \frac{P(r, \Omega' \rightarrow \Omega)}{4\pi} I(r, \Omega') d\Omega' + \alpha_g(r, \Omega) B(r, T) - \alpha(r, \Omega) I(r, \Omega) \quad (1)$$

dónde I es la energía emitida a un punto r en una dirección Ω , ω y α son el albedo y el coeficiente de extinción total respectivamente, en función de en una dirección Ω' , α_B es el coeficiente de emisión, P es la función de fase normalizada y B es la función de Planck siendo T la temperatura termodinámica de la superficie a simular.

Como una evaluación del modelo DART en relación a la simulación de escenarios naturales, el objetivo principal del presente trabajo es la comparación de escenas naturales simuladas por el modelo DART, correspondientes a un cultivo de alfalfa y a una superficie de suelo desnudo, con imágenes aéreas provenientes del sensor Airborne Hyperspectral Scanner (AHS). Este sensor presenta 10 bandas en el infrarrojo térmico que varían entre los 7,7 a los 13,6 μm . Además de su resolución espectral en el infrarrojo térmico presenta imágenes con alta resolución espacial (de 3 x 3 a 6 x 6 m) por que le presenta una gran utilidad para realizar estudios de temperatura de la superficie sobre terrenos agrícolas. Finalmente, en este se trabajo se presenta un análisis de sensibilidad en relación a la temperatura de brillo simulada por DART y su variación angular para las superficies naturales simuladas.

ÁREA DE ESTUDIOS Y DATOS PARA LA SIMULACIÓN

El área de estudio correspondió al sector agrícola de Barrax (Albacete) en dónde se realizó la campaña de medida Sentinel-2 Fluorescence Experiment (Sen2Flex) llevada a cabo en Junio y Julio del año 2005. Para este trabajo se utilizaron datos correspondientes a una escena AHS (3 x 3 m de resolución espacial) del día 12 de Julio del 2005, un perfil atmosférico obtenido a partir de un radiosondeo lanzado el mismo día y datos de terreno como altura de la vegetación, LAI, entre otros. La imagen AHS fue utilizada para obtener los valores de temperatura de brillo a nivel de la superficie (para ser comparada con la simulada con DART), el método utilizado aparece bien detallado en Sobrino *et al* (2006). Por otra parte, esta imagen también fue utilizada para obtener la temperatura de superficie y de emisividad para cada banda, esto se realizó utilizando el algoritmo TES (Gillespie *et al.*, 1998). La transmisividad atmosférica, además de la radiancia ascendente y la descendente fueron calculadas a través del código de transferencia radiativa MODTRAN (Berk *et al.*, 1999). Para la simulación en DART, se construyeron dos escenarios, un cultivo alfalfa y una superficie de suelo desnudo. Como parámetros de entrada se utilizaron las emisividades correspondientes a cada

banda del sensor AHS. Estas emisividades fueron calculadas a partir del espectro de vegetación verde disponible en la ASTER Spectral Library 2.0 (Baldrige *et al.*, 2009). El espectro de emisividad del suelo fue obtenido a través de mediciones en laboratorio, las cuales se muestran en Jiménez-Muñoz & Sobrino (2007). La tabla 1 muestra los datos de entrada utilizados para simular los escenarios naturales correspondientes a los cultivos de alfalfa y suelo desnudo.

Tabla 1.- Datos de entrada en el modelo DART.

	Alfalfa	Suelo desnudo
<i>LST (K)</i>	315 ± 1	330 ± 1
<i>Emisividad</i>		
<i>Banda 71</i>	0.989	0.945
<i>Banda 72</i>	0.981	0.967
<i>Banda 73</i>	0.969	0.970
<i>Banda 74</i>	0.975	0.968
<i>Banda 75</i>	0.979	0.974
<i>Banda 76</i>	0.981	0.979
<i>Banda 77</i>	0.985	0.979
<i>Banda 78</i>	0.988	0.980
<i>Banda 79</i>	0.988	0.985
<i>Banda 80</i>	0.988	0.984
<i>Altura (m)</i>	0.5	-----
<i>LAI (Leaf Area Index)</i>	1.0 ± 0.1	-----
<i>LAD (Leaf Angle Distribution)</i>	Esférica	-----
<i>Ángulo zenital (°)</i>	150	
<i>Ángulo azimutal (°)</i>	45	
<i>Nº direcciones</i>	97	
<i>Dimensiones escena (m)</i>	90 x 90	
<i>Tamaño celda (m)</i>	2 x 2 x 0.5	

METODOLOGÍA

Para evaluar el modelo DART con medidas in-situ, se realizaron dos tipos de comparaciones, una orientada a la simulación en nadir de la temperatura de superficie para una cobertura de vegetación y suelo desnudo y otra orientada a la variación angular que presentaban estas dos coberturas. Para esto se utilizaron diferentes modos de simulación, para la cobertura de suelo desnudo se utilizaron algoritmos tanto isotrópicos (modo lambertiano) como anisotrópicos (modo lambertiano)

más una componente especular y modo Hapke más una componente especular). Para el caso de la vegetación, se simuló un cultivo con una cobertura de 100%. Estas simulaciones se realizaron para cada banda.

ANÁLISIS Y RESULTADOS

DART v/s AHS

El comportamiento espectral de la temperatura de brillo simulada por DART, tanto para el suelo como para la alfalfa se muestra en la figura 1. La temperatura de brillo proveniente del AHS, estos valores se obtuvieron seleccionando un área de 90 x 90 pixeles sobre la imagen y calculando la media y su desviación estándar. La desviación estándar entregada para los valores de temperatura simulados por DART no es significativa en relación a la media.

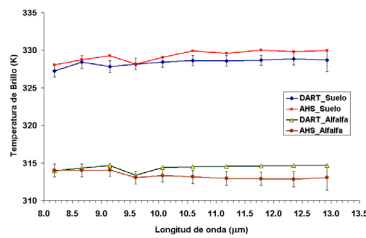


Figura 1.- Temperatura de brillo simulada por el modelo DART y la obtenida de la imagen AHS para suelo desnudo y alfalfa.

En la figura 1 se muestra importantes similitudes entre la temperatura de brillo simulada por el modelo DART y la medida por AHS, principalmente entre los 8 y 10 μm . Posteriormente, existe una diferencia promedio cercana a 1 K para el caso del suelo y de 1,5 K para el caso de la vegetación. Por otra parte, la comparación lineal entre ambas superficies naturales presenta un buen ajuste lineal y un RMSE (*Root Mean Square Error*) total cercano a 1 K (Figura 2). Utilizando diferentes modos de simulación, para el caso de la cobertura de suelo y variando los valores de LAD (Leaf Angle Distribution) es posible obtener pequeñas variaciones en el RMSE, no obstante la diferencia no es significativa.

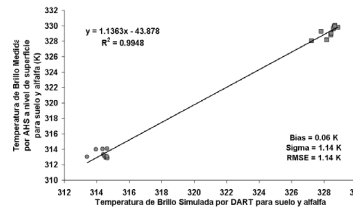


Figura 2.- Comparación lineal entre la Temperatura de brillo simulada por el modelo DART y la obtenida de la imagen AHS para suelo desnudo (cuadrados) y alfalfa (círculos).

Los resultados obtenidos para las distintas simulaciones se muestran en la tabla 2.

Tabla 2.- Errores entre las comparaciones obtenidas entre las distintas simulaciones de DART y los valores de AHS para alfalfa y suelo desnudo.

		Bias	Sigma	RMSE
Suelo Desnudo	<i>Lambertiano</i>	-1.73	0.40	1.77
	<i>Lambertiano + Specular</i>	-0.90	0.46	1.01
	<i>Hapke + Specular</i>	-3.90	1.43	4.15
	TOTAL	-2.18	0.76	2.31
Alfalfa	<i>Esférica</i>	1.03	0.68	1.23
	<i>Plagiófila</i>	0.94	0.69	1.17
	<i>Erectófila</i>	1.03	0.68	1.23
	TOTAL	1.00	0.68	1.21

Para la superficie de suelo desnudo, los errores más importantes se muestran para el modo Hapke más una componente especular. Sin embargo, esto se puede mejorar calibrando los parámetros del modelo Hapke para dicha simulación. Para la simulación lambertiana y lambertiana más una componente especular, los errores son menores a 2 K. Para el caso de la vegetación, los resultados no varían considerablemente en función del tipo de LAD, manteniéndose un RMSE cercano a la unidad.

Temperatura de brillo angular simulada por DART

Con el objetivo de estudiar el comportamiento angular de las superficies angulares, la figura 3 muestra la variación angular que experimenta la temperatura de brillo simulada por DART para el suelo desnudo, en los tres modos de simulación y para la vegetación con los tres tipos de LAD.

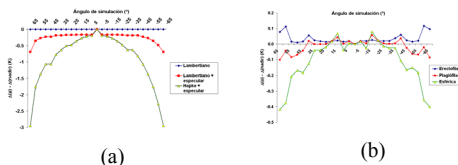


Figura 3.- Variación angular de la temperatura de la cobertura de suelo (a) y el cultivo de alfalfa (b) para la banda 75 (8,9 – 10,2 μm).

Para el suelo desnudo, el módulo de Hapke más una componente especular, presenta las mayores variaciones a partir de los 40° (entre 1 y 3 K). El modelo lambertiano, como era predecible, no presenta ninguna variación angular. Para la cobertura de vegetación, el tipo de LAD erectófila presenta valores que fueron influenciados por el tamaño de la celda, ya que no presenta variaciones significativas en función del ángulo al igual que el tipo de LAD plagiófila. Sin embargo, para el tipo de LAD esférica se muestran variaciones muy similares a las planteadas por Guillevic *et al.* (2003). No obstante, estos resultados se pueden comparar en relación al comportamiento angular de la temperatura de brillo, ya que las magnitudes varían en función de los datos de entrada ingresados al modelo.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado una evaluación de la temperatura de brillo simulada por el modelo DART y la temperatura de brillo medida por el sensor AHS. Los resultados muestran un buen comportamiento espectral de la temperatura simulada, presentando un RMSE cercano a 1 K para el caso del cultivo de alfalfa. La variación angular de la temperatura de brillo presentó importantes diferencias para ángulos superiores a 40 ° para el suelo desnudo para el caso del módulo Hapke. Esta variación es menor en la simulación de alfalfa. Finalmente, el modelo DART se muestra como una herramienta potente para la simulación de escenarios naturales en el infrarrojo térmico, cuyos resultados pueden ser comparados con imágenes remotas y datos in-situ.

BIBLIOGRAFÍA

Baldrige, A. M. & Co-Authors. 2009. The ASTER Spectral Library Version 2.0. *Rem. Sens. Env.*, doi:10.1016/j.rse.2008.11.007.

Berk, A., & co-authors. 1999. MODTRAN4 User's Manual. AFRL, AFB, MA 01731-3010.

Hapke, B. 1993. Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy, *Camb. Univ. Press.*, New York. 472 pp.

Gastellu-Etchegorry, J.P., & Co-authors. 1996. Modeling radiative transfer in heterogeneous 3D vegetation canopies. *Rem. Sens. Env.*, 58, 131-56.

Gastellu-Etchegorry, J.P. & Co-Authors. 2004. DART: a 3D model for simulating satellite images and studying surface radiation budget. *Int. J. Rem. Sens.*, 25(1), 73- 96.

Gillespie & Co-authors. 1998. A Temperature and Emissivity Separation Algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Images. *IEEE Trans. Geo.* 36(4), 1113 – 1126.

Guillevic, P. & Co-authors. 2003. Thermal infrared radiative transfer within three-dimensional vegetation covers. *J.Gephys.Res.*, 108,D8,4248,doi: 10.1029 /2002 JD002247.

Jiménez-Muñoz, J. C. & Sobrino, J. A. 2007. Emissivity spectra obtained from field and laboratory measurements using the temperature and emissivity separation algorithm. *App. Opt.*, 45(27), pp. 7104-7109.

Lagouarde, JP. & Irvine, M. 2008. Directional anisotropy in the thermal infrared measurements over Toulouse city centre during the CAPITOU measurement campaigns: first results. *Met. Atm. Phys.* DOI 10.1007/s00703.

Sobrino, J.A. & Co-authors. 2006. Land surface temperature derived from Airborne Hyperspectral scanner thermal infrared data. *Rem. Sens. Env.*, 102 (99), 99 – 115.

Sobrino, J.A. & Co-authors. 2008. Thermal remote sensing in the framework of the SEN2FLEX project: field measurements, airborne data and applications. *Int. J. Rem. Sens.* 29, (17-18), 4961 – 4991.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo en este trabajo al Ministerio de Ciencia y Tecnología (TERMASAT, proyecto ESP2005-07724-C05-04; EODIS, proyecto AYA2008-0595-C04-01) y a la Unión Europea (CEFLES2, proyecto 20801/07/1-LG; CEOP-AEGIS, proyecto FP7-ENV-2007-1 proposal No. 212921; WATCH, proyecto 036946).