



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**Estimación de mapas de temperatura del aire mediante imágenes
satelitales.**

TRABAJO DE TITULACIÓN.

AUTOR: Pinzón Narváez, Darwin Santiago

DIRECTOR: González Jaramillo, Víctor Hugo, Ing.

CO-DIRECTOR: Oñate Valdivieso, Fernando Rodrigo, Ph D.

LOJA – ECUADOR

2016



Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

Septiembre, 2016

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Ingeniero.

Víctor Hugo González Jaramillo
DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación: **Estimación de mapas de temperatura del aire mediante imágenes satelitales** realizado por **Darwin Santiago Pinzón Narváez**, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, noviembre de 2016

f) -----

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

“Yo **Darwin Santiago Pinzón Narváez** declaro ser autor del presente trabajo de titulación: Estimación de mapas de temperatura del aire mediante imágenes satelitales, de la Titulación de Ingeniería Civil, siendo Ing. Víctor Hugo González Jaramillo director del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales. Además certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnica y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”.

f) -----

Autor: Darwin Santiago Pinzón Narváez

Cédula: **1104965676**

DEDICATORIA

A Dios, por concederme el don de la vida, esta profesión es por y para su gloria.

A mis queridos padres: Darwin y Jaqueline, este logro es para ustedes, gracias a vuestro amor, esfuerzo y sacrificio diario, han sabido sacar adelante a la familia y me han permitido cumplir este sueño.

Mis hermanos a quienes amo: Cristian, Michelle y Steeven, me inspiran a superarme y ser mejor persona, son los mejores.

A toda mi familia, especialmente mis abuelitas: Luisa y Mélida por su amor incondicional.

Santiago.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por brindarme la posibilidad de servir a la sociedad a través de mi profesión.

A mi director de tesis Ing. Víctor González, por orientarme para culminar este proyecto.

A mi novia María José, por estar a mi lado brindándome su cariño y apoyo.

A todos mis amigos y compañeros de la gloriosa Titulación de Ingeniería Civil, por ser parte de esta aventura universitaria, principalmente a los honorables miembros del GSI.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS.....	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN.....	3
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO.....	5
1.1. Teledetección.....	6
1.1.1. Componentes de la percepción remota.....	6
1.1.2. Energía electromagnética.	7
1.1.3. Espectro electromagnético.....	7
1.2. Sensor.....	8
1.2.1. Sensor activo.	8
1.2.2. Sensor pasivo.	8
1.3. Principales satélites de Teledetección espacial.....	9
1.3.1. Satélite Landsat 5	9
1.3.2. Satélite Landsat 7	10
1.3.3. Satélite TERRA-MODIS	10
1.3.4. Satélite Landsat 8	11
1.3.5. Satélite IKNOS.....	11
1.3.6. Satélite Spot.....	12
1.3.7. Satélite NOAA.....	12
1.3.8. Satélite GOES.....	13
1.4. Imagen satelital.....	14
1.4.1. Resolución satelital	14
1.4.2. Formatos de almacenamiento de imágenes satelitales	14
1.5. Preprocesamiento de imágenes Landsat 7	15
1.5.1. Corrección geométrica.	16

1.5.2.	Corrección radiométrica.	16
1.5.2.1.	Corrección del fallo Scan Line Corrector (SLC).	16
1.5.2.2.	Corrección Topográfica	16
1.5.2.3.	Numero digital (ND) a radiancia.....	18
1.5.2.4.	Radiancia a Reflectividad aparente (TOA).....	18
1.5.2.5.	Temperatura Aparente de Brillo (TAB).....	20
1.5.2.6.	Corrección atmosférica.....	20
1.6.	Filtrado nuboso	21
1.7.	Procesamiento de imágenes Landsat 7.....	22
1.7.1.	Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).	22
1.7.2.	Emisividad (ϵ).....	22
1.7.3.	Temperatura superficial (TS).....	23
1.7.3.1.	Algoritmo monocanal de Qin, Karnieli y Berliner (2001).	23
1.7.3.2.	Algoritmo monocanal de Jiménez-Muñoz & Sobrino.....	24
1.7.3.3.	Algoritmo monocanal de Artist & Carnahan.	25
1.8.	Temperatura del aire (TA)	26
1.8.1.	Dispositivos para medir la TA.....	26
1.8.2.	Variables relacionadas a la TA.....	27
1.8.3.	Mapas de TA mediante Imágenes satelitales	27
1.8.4.	Mapas de TA mediante métodos alternativos.....	27
1.8.4.1.	Método de interpolación Kriging Ordinario.	27
1.8.4.2.	Método del Gradiente Altitudinal.	28
CAPÍTULO II: ÁREA DE ESTUDIO.....		30
2.1.	Ubicación geográfica.....	31
2.2.	División política	31
2.3.	Características orográficas.....	32
2.4.	Características climatológicas	32
CAPÍTULO III MATERIALES Y EQUIPOS		34
3.1.	Materiales	35
3.1.1	Datos de Información Geográfica.....	35
3.1.2	Datos de Teledetección.....	35

3.1.3	Datos Meteorológicos.....	35
3.2.	Software.....	36
3.2.1.	Idrisi.....	36
3.2.2.	Gvsig.....	36
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA		37
4.1.	Metodología general.....	38
4.2.	Preprocesamiento.....	38
4.2.1.	Corrección Geométrica.....	39
4.2.2.	Corrección Radiométrica.....	39
4.3.	Procesamiento.....	40
4.4.	Mapas de TA mediante imágenes de satélite.....	41
4.5.	Validación de los resultados.....	41
CAPÍTULO V: RESULTADOS Y ANÁLISIS		43
5.1.	Preprocesamiento.....	44
5.2.	Procesamiento.....	45
5.3.	Mapa de TA mediante imágenes de satélite.....	51
5.4.	Validación de resultados.....	59
5.5.	Mejoras en el modelo de la TA mediante imágenes satelitales.....	59
5.6.	Fuentes alternativas para obtener mapas de TS.....	64
5.6.1.	Mapa de TA. Método interpolación Kriging Ordinario.....	64
5.6.2.	Mapa de TA. Método Gradiente Altitudinal.....	66
CONCLUSIONES.....		68
RECOMENDACIONES.....		70
LINEA DE INVESTIGACIÓN FUTURA		71
BIBLIOGRAFÍA.....		72
ANEXOS.....		75
Anexo 1:	Análisis de Validación Cruzada.....	76
Anexo 2:	Correlación entre variables: A, TS y TA.....	82
Anexo 3:	Correlación entre A y los factores atmosféricos.....	85
Anexo 4:	Mejora en el modelo de TA mediante imágenes satelitales.....	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Sensores de satélites que trabajan en el espectro visible y térmico	9
Tabla 2: Resolución espectral y espacial del sensor ETM+	10
Tabla 3: Resolución espacial y espectral del satélite Landsat 8.....	11
Tabla 4: Resolución espacial y espectral del satélite IKNOS	11
Tabla 5: Resolución espacial y espectral del satélite Spot.....	12
Tabla 6: Características y aplicaciones del sensor AVHRR	13
Tabla 7: Resolución espacial y espectral del satélite GOES	13
Tabla 8: Métodos de Corrección Topográfica	17
Tabla 9: Factores de conversión de ND a radiancia.....	18
Tabla 10: Distancia Tierra-Sol (unidades astronómicas)	19
Tabla 11: Irradiancia espectral.....	20
Tabla 12: Filtros propuestos por el algoritmo ACCA.	21
Tabla 13: Atmosferas estándar para la Ta y To.	24
Tabla 14: Relación entre transmisividad atmosférica y el vapor de agua.	24
Tabla 15: Climas de la provincia de Loja.....	33
Tabla 16: Estaciones climatológicas. Provincia de Loja.	35
Tabla 17: Imágenes satelitales Landsat 7	44
Tabla 18: Imágenes Landsat 7 empleadas en esta investigación.	44
Tabla 19: Correlación entre TS vs TA.	59
Tabla 20: Mejoras en el modelo de la TA. Correlación entre TS vs TA.	62
Tabla 21: Correlación entre TS vs TA.	64
Tabla 22: Correlación entre A y la TA	66
Tabla 23: TA mediante imágenes de satélite. Imagen 1: 2013/04/10.	76
Tabla 24: TA mediante imágenes de satélite. Imagen 2: 2013/09/17.	77
Tabla 25: TA mediante imágenes de satélite. Imagen 3: 2012/06/10.	78
Tabla 26: TA método de Gradiente Altitudinal. Imagen 1: 2013/04/10.	79
Tabla 27: TA método de Gradiente Altitudinal. Imagen 2: 2013/09/17.	79
Tabla 28: TA método de Gradiente Altitudinal. Imagen 3: 2012/06/10.	80
Tabla 29: TA método Kriging Ordinario. Imágenes 1, 2 y 3.....	81
Tabla 30: Mejora en el modelo de la TA, validación cruzada Imágenes 1 y 2.	89
Tabla 31: Mejora en el modelo de la TA, validación cruzada Imagen 3.....	90

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1: Componentes de la percepción remota.....	6
Figura 2: Descripción de onda electromagnética	7
Figura 3: Espectro electromagnético.....	7
Figura 4: Satélite activo	8
Figura 5: Satélite pasivo	9
Figura 6: Imagen satelital.....	14
Figura 7: Cadena de Preprocesamiento estándar para imágenes Landsat	15
Figura 8: Error originado por falla en el SCL	16
Figura 9: Inversión de la TA.....	26
Figura 10: Área de estudio ubicada en la provincia de Loja.	31
Figura 11: División política de la zona de estudio en la provincia de Loja.	31
Figura 12: Orografía de la zona de estudio en la provincia de Loja.....	32
Figura 13: Climatología de la zona de estudio en la provincia de Loja.	32
Figura 14: Distribución espacial de las estaciones climatológicas.....	36
Figura 15: Metodología general aplicada al proyecto de investigación.....	38
Figura 16: Corrección radiométrica	39
Figura 17: Validación cruzada.....	41
Figura 18: Corrección SLC de la banda 6, a) antes y b) después de la corrección.	45
Figura 19: Filtro de nubes, a) antes del filtro ACA, y b) después del filtro ACA	45
Figura 20: Mapa de radiancia, banda térmica.	46
Figura 21: Mapa de TAB (°C).....	46
Figura 22: Mapa de NDVI	47
Figura 23: Mapa de Emisividad.....	47
Figura 24: Transmitancia: a) Interpolación Kriging y b) Correlación transmitancia vs altitud ..	48
Figura 25: a) Radiancia ascendente, b) radiancia descendente y c) Transmitancia.....	49
Figura 26: Mapa de TS según Artist & Carnahan.....	50
Figura 27: Imagen 1 en combinación RGB: 742.....	50
Figura 28: Mapa de TA Imagen 1 según: a) Jiménez & Sobrino y b) Artist & Carnahan.....	51
Figura 29: Mapa de TA Imagen 2 según: a) Jiménez & Sobrino y b) Artist & Carnahan.....	52
Figura 30: Mapa de TA Imagen 3 según: a) Jiménez & Sobrino y b) Artist & Carnahan.....	52
Figura 31: Mapa de TA. Ecuación de Jiménez-Muñoz & Sobrino.....	54
Figura 32: Mapa de TA. Ecuación de Artist & Carnahan.	55
Figura 33: MDE vs Mapa de variación de TA según Jiménez-Muñoz & Sobrino	57
Figura 34: Relación entre el MDE y el Mapa de variación de TA según Artist & Carnahan. .	58
Figura 35: a) Imagen RGB: 742, mapa de TS con resolución de: b) 30m y c) 120m.....	60

Figura 36: Imagen 1. Mejora en el modelo de la TA, a) antes y b) después.....	60
Figura 37: Imagen 2. Mejora en el modelo de la TA, a) antes y b) después.....	61
Figura 38: Imagen 3. Mejora en el modelo de la TA, a) antes y b) después.....	61
Figura 39: Mejoras en el modelo de la TA mediante imágenes Landsat7.	63
Figura 40: Mapa de TA. Método de Interpolación Kriging Ordinario.....	65
Figura 41: Mapa de TA. Método de Gradiente Altitudinal.....	67
Figura 42: Correlación A vs TA.....	82
Figura 43: Correlación TS vs TA.....	83
Figura 44: Correlación A vs TS.....	84
Figura 45: Correlación A vs factores atmosféricos. Imagen 1: 2013/04/10.....	85
Figura 46: Correlación A vs factores atmosféricos. Imagen 2: 2013/09/07.....	86
Figura 47: Correlación A vs factores atmosféricos. Imagen 3: 2012/06/10.....	87
Figura 48: Mejora en el modelo de la TA, correlación TS vs TA. Ec. Artist & Carnahan.....	88

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo generar Mapas de Temperatura del Aire mediante imágenes satelitales. El área de estudio se ubica en la provincia de Loja-Ecuador, para el periodo 2012-2013. La metodología consiste en correlacionar la temperatura del aire (TA), registrados de estaciones climatológicas, con la temperatura del suelo (TS) calculada de imágenes Landsat 7. Los mapas de TA obtenidos indican que en zonas bajas existe subestimación de la TA, mientras que en zonas altas se obtiene una buena precisión. La validación se realiza mediante indicador de ajuste R^2 y mediante el error de validación cruzada. Los mejores resultados se obtienen mediante la ecuación de TS de Jiménez-Muñoz & Sobrino con: $R^2 = 0.82$ y error de $\pm 1.77^\circ\text{C}$, frente a Artist & Carnahan con: $R^2 = 0.77$ y error $\pm 1.93^\circ\text{C}$, en este último, las mejoras propuestas permiten incrementar el R^2 de 0.77 a 0.88 y disminuir el error de $\pm 1.93^\circ\text{C}$ a $\pm 1.58^\circ\text{C}$.

Adicionalmente se proponen métodos alternativos para obtener mapas de TA como: Kriging Ordinario y Método de Gradiente Altitudinal.

PALABRAS CLAVE: Landsat 7, imágenes de satélite, temperatura del aire, temperatura del suelo.

ABSTRACT

This research aims to create Air Temperature Maps through satellite images. The study field is located in the province of Loja- Ecuador during 2012-2013. The methodology match the air temperature (AT), which is registered from climatological stations, with soil temperature (ST) calculating from Landsat 7 images through equations: Artist & Carnahan and Jiménez-Muñoz & Sobrino. The Air temperature maps show that the lowlands there`s an underestimation of temperature while a good accuracy is obtained in highlands. Validation is carried out through an R^2 adjustment indicator and the cross-validation error. The best results are gotten through Jiménez-Muñoz & Sobrino with $R^2 = 0.82$ and $\pm 1.77^\circ\text{C}$ of error. On the contrary to Artist & Carnahan with $R^2 = 0.77$ and $\pm 1.93^\circ\text{C}$ of error. The best proposals allow to increase 0.77 to 0.88 of R^2 and $\pm 1.93^\circ\text{C}$ to $\pm 1.58^\circ\text{C}$ of error.

Some alternative methods are proposed to get AT maps such as Ordinary Kriging and Altitudinal Gradient Model.

KEY WORDS: Landsat 7, satellite images, air temperature, soil temperature.

INTRODUCCIÓN

La temperatura del aire (TA) y las precipitaciones son las variables meteorológicas más solicitadas ya que se requieren PARA varios estudios sobre el medio ambiente. (Recondo & Pérez-Morandeira, 2002). La TA es un factor importante dentro del clima de una determinada región, está involucrado en variedad de procesos agrícolas, ganaderos, distribución de especies de flora y fauna e incluso actividades humanas como turismo, recreación, salud, etc.(Rosselló, Casals, Fernández, & Montferrer, 2010). Así mismo la TA es un factor importante a tomar en cuenta para la descripción de procesos ambientales como evapotranspiración y radiación (Cristóbal, Ninyerola, & Pons, 2005). Todos estos factores recalcan en la importancia de tener un mapa de TA para una región.

La provincia de Loja cuenta con 11 estaciones climatológicas, las cuales proporcionan un registro diario de temperatura, pero se encuentran distribuidas de manera heterogénea a lo largo del territorio, existiendo grandes zonas que carecen de estos instrumentos. Una de las soluciones más comunes para obtener mapas de TA es la interpolación y extrapolación de los valores registrados en las estaciones más cercanas, un proceso que no considera la variación de la orografía, algo que es importante en la provincia de Loja ya que es parcialmente atravesada por la cordillera de los Andes. Una solución más precisa es emplear un Modelo de Elevación Digital (MDE) y mediante una correlación entre la altura (A) y la TA, generar un mapa de TA. Sin embargo todos estos modelos no consideran factores importantes que influyen en la TA como son: radiación solar, latitud, cercanía al mar, etc.(Rosselló et al., 2010). Una interesante alternativa consiste en emplear datos de teledetección para moldear la TA, específicamente mediante el uso de imágenes de satélite. Estas imágenes se componen de bandas que miden la radiación electromagnética, medidas que son representaciones realistas del entorno de estudio.

Para modelar la TA, se ha seleccionado el satélite Landsat 7, el cual forma parte del proyecto Landsat, el mismo que ha sido catalogado como uno de los más fructíferos en materia de teledetección, resaltando su buena resolución espacial, temporal y su carácter global (Chuvienco, 1995). Los sensores de Landsat son extensamente aplicados en estudios agrícolas, forestales, hidrológicos, geológicos y medioambientales, además constituyen una de las mayores series históricas, con registros desde el año 1972 (Fernandez & Herrero, 2001). Las imágenes Landsat 7 están disponibles para la fecha de estudio, son de acceso gratuito y poseen una resolución espacial de 30x30 m.

El objetivo principal que persigue la presente investigación es generar mapas de TA empleando imágenes de satélite Landsat 7, para la región geográfica ubicada en la provincia de Loja-Ecuador, dentro de las coordenadas: Xmin: 613575, Ymin: 9518185, XMAX: 707745

y YMAX: 9565405; durante el periodo 2012-2013. La metodología planteada consiste en un modelo de regresión simple, que correlaciona la temperatura del suelo (TS), medido en la imagen del satélite y la TA medida por la estación climatológica. El mapa de TS se obtiene a partir de ecuaciones monocanal descritas por Jiménez-Muñoz & Sobrino (2003) y Artis & Carnahan (1982). Los datos de temperatura media del aire, coincidentes con la fecha de obtención de las imágenes satelitales, han sido facilitados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). La validación de los resultados se ha realizado mediante el método de Validación Cruzada, esto debido al escaso número de estaciones. Los resultados de la correlación se han validado en función del indicador de ajuste R^2 .

Finalmente se presentan dos metodologías alternativas para la obtención de TA como son: método de interpolación Kriging Ordinario y método de Gradiente Altitudinal, en donde el que se estudiará la ventaja de este último para zonas de montaña.

El estudio se ha dividido en cinco capítulos. Capítulo I: Marco teórico, presenta una descripción del estado del arte que rodea la Teledetección, TS y TA. El Capítulo II: Área de estudio, se presenta una breve descripción geográfica, política, orografía y climatología de la provincia de Loja. El Capítulo III: Materiales y equipos, describe el software y recursos empleados para modelar la TA. En el Capítulo IV: Metodología, se describe los criterios, procedimientos y formulas aplicadas al cálculo de la TS y TA. Finalmente el Capítulo V: Resultados y Análisis, muestra los resultados obtenidos luego de generar los mapas de TA, valores que serán analizados para generar las conclusiones del estudio.

**CAPÍTULO I:
MARCO TEÓRICO**

1.1. Teledetección

De acuerdo a Chuvieco (1995) la teledetección se define como la ciencia que permite estudiar la superficie de la Tierra a distancia. Las imágenes miden la energía captada por el sensor, esta energía puede ser emitida por el mismo instrumento o por otro cuerpo ajeno a él como es el Sol.

1.1.1. Componentes de la percepción remota.

Según explica Chuvieco (1995), el proceso de teledetección incluye varios componentes los cuales son: flujo de energía, cuerpo observado, sensor, receptor, interprete y usuario final. Los componentes de la percepción remota se ilustran en la Figura 1.

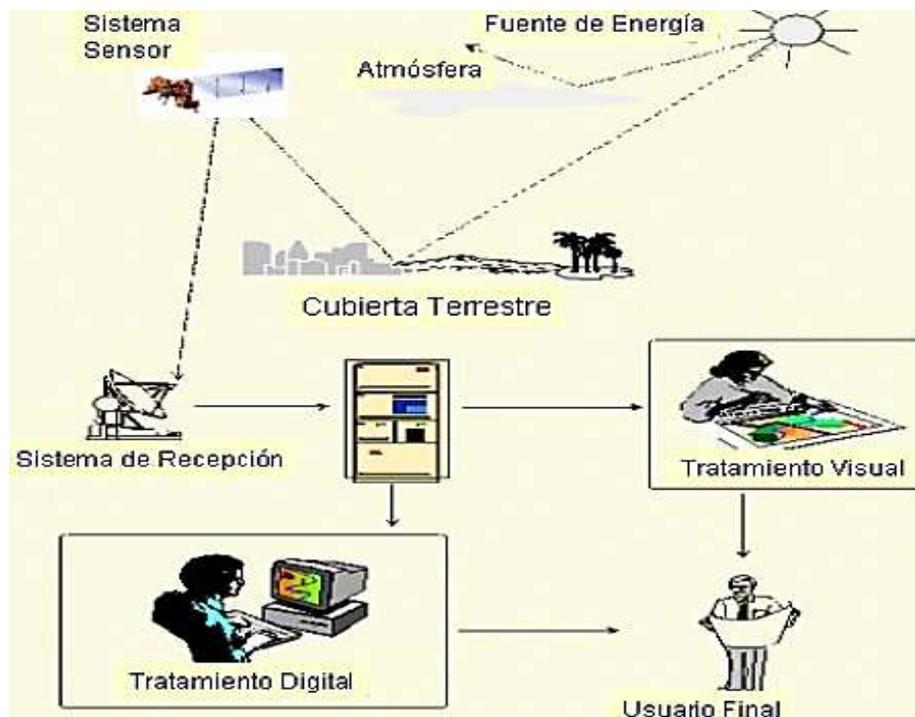


Figura 1: Componentes de la percepción remota.

Fuente: (Chuvieco Salina, 2002)

Elaboración: (Chuvieco Salina, 2002)

- Flujo de energía:** La energía puede ser emitida por el propio sensor o por un cuerpo externo como el Sol.
- Cuerpo observado:** La superficie terrestre recibe y refleja la energía.
- Sensor:** El sensor capta la energía de la superficie, luego la almacena o la envía a una estación receptora.
- Receptor:** Recibe la información del sensor, luego la transforma a un formato adecuado y finalmente la corrige.
- Interprete:** Analiza la información.
- Usuario final:** Es quien usa la información

1.1.2. Energía electromagnética.

La energía electromagnética viaja a la velocidad de la luz y posee propiedades eléctricas y magnéticas. El flujo electromagnético posee longitud y frecuencia. La longitud de onda es la distancia entre los picos de ondas sucesivas. La frecuencia es el número de ciclos que pasan por un punto, a un tiempo dado. Un ciclo es el número de crestas que pasan por un punto, en un segundo (Chuvieco, 1995). La Figura 2 ilustra los conceptos mencionados sobre onda electromagnética.

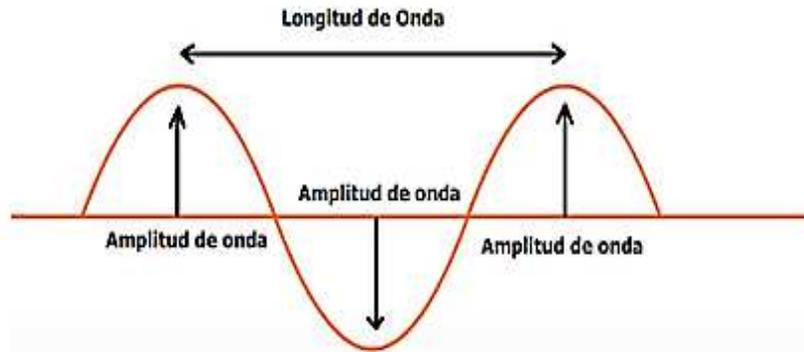


Figura 2: Descripción de onda electromagnética
Fuente: El Autor.
Elaboración: El Autor.

1.1.3. Espectro electromagnético.

Es la organización de longitudes de onda con comportamiento electromagnético similar. Las ondas están agrupadas desde las más cortas (como los rayos gama), a las más largas (como las ondas de radio) según Chuvieco (1995). La Figura 3 muestra los rangos que poseen las principales ondas electromagnéticas.

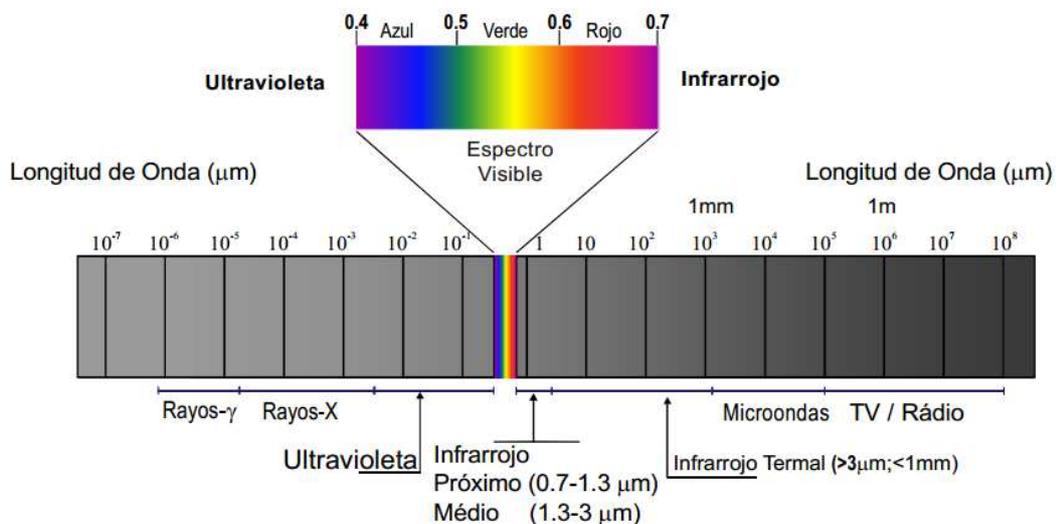


Figura 3: Espectro electromagnético
Fuente: (Perez, 2007)
Elaboración: El Autor.

De acuerdo a Chuvieco (1995), las bandas espectrales más usadas son 5. La organización y amplitud de las bandas se muestra a continuación:

1. **Espectro visible:** (0,4 a 0,7 μm), Se pueden distinguir con los ojos, son: Azul (0,4 a 0,5 μm), verde (0,5 a 0,6 μm) y rojo (0,6 a 0,7 μm).
2. **Infrarrojo próximo:** (0,7 a 1,3 μm), permite discriminar masas vegetales y humedad.
3. **Infrarrojo medio:** (1,3 a 8 μm), se combinan procesos de reflexión de la luz solar y emisión de la superficie de la Tierra.
4. **Infrarrojo lejano o térmico:** (8 a 14 μm), contiene la parte emisiva del espectro de la Tierra
5. **Micro ondas:** (a partir de 1 mm), poseen energía transparente a la cubierta nubosa.

1.2. Sensor

Se denomina sensor al instrumento capaz de medir la radiación electromagnética, esta energía es procedente de distintas coberturas en la superficie terrestre (Chuvieco, 1995). Existen dos tipos de sensores: activos y pasivos, los cuales se muestra en las Figuras 4 y 5.

1.2.1. Sensor activo.

Poseen su propia fuente de radiación, la cual es irradiada a la superficie terrestre. El sensor envía una faja espectral que interactúa con la superficie terrestre y la parte reflejada es captada por el sensor (Perez, 2007). Los principales sistemas de Teledetección activos son Radar y Lidar (Chuvieco, 1995). La Figura 4 ilustra el concepto de sensor activo.

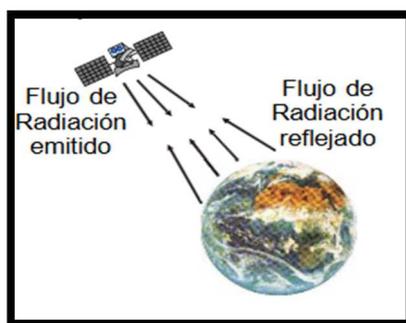


Figura 4: Satélite activo
Fuente: (Perez, 2007)
Elaboración: (Perez, 2007)

1.2.2. Sensor pasivo.

Los sensores pasivos no poseen radiación propia, miden la radiación electromagnética proveniente de una fuente externa al mismo. La radiación es reflejada por la superficie terrestre y luego captada por el sensor, tal como se muestra en la Figura 5 (Perez, 2007). La mayor aplicación de los sensores pasivos consiste en la evaluación de recursos naturales (Martinez, 2005).

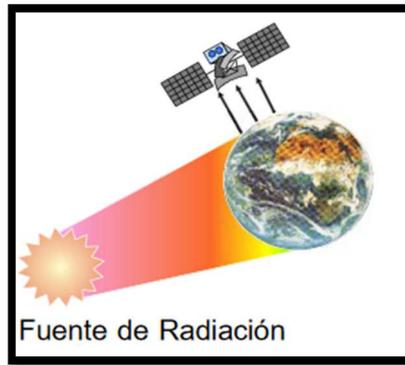


Figura 5: Satélite pasivo
Fuente: (Perez, 2007)
Elaboración: (Perez, 2007)

1.3. Principales satélites de Teledetección espacial

En Teledetección se denomina satélite a la plataforma que se coloca en órbita para realizar mediciones de la Tierra, mediante instrumentos denominados sensores (Perez, 2007). La Tabla 1 muestra algunos sensores de satélites que trabajan en el espectro visible y térmico.

Tabla 1: Sensores de satélites que trabajan en el espectro visible y térmico

Plataforma	Sensor	Intervalo Espectral VIS/IRC (μm)	Resolución VIS/IRC (m)	Intervalo Espectral TIR(μm)	Resolución TIR (m)	Tiempo de Revisita (días)
Landsat 5	TM	0.45-2.35	30	10.4-12.5	120	Archivo
Landsat 7	ETM +	0.45-2.35	30	10.4-12.5	60	16
Landsat 8	LDCM	0.45-2.30	30	10.4-12.5	100	16
Terra	ASTER	0.52-2.43	15	8.12-11.65	90	Pedido
SAC-D	NIRST	3.8	350	10.85-11.85	350	7
EOS	MODIS	0.45-2.15	250/1000	8.4-14.38	1000	1-2
NOAA	AVHRR	0.58-3.9	1000	10.3-12.5	1000	2
ENVISAT	AATSR	0.86-3.93	1000	10.4-12.5	1000	35
GOES	GOES	0.53-7.33	1000-4000	10.21-12.47	4000	15 min

Fuente: (Bayala, 2014).
Elaboración: (Bayala, 2014).

1.3.1. Satélite Landsat 5

El programa Landsat, fue desarrollado por la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), son satélites de órbita polar, para el monitoreo de la superficie terrestre. El programa fue inicialmente denominado *Earth Resources Technology Satellite* (ERTS) y realizó el primer lanzamiento en 1972, a partir del cual fue renombrado como Landsat por sus siglas: Land para Suelo y Sat para Satélite (INEGI, 1999). Landsat 5 fue lanzado en 01/03/1984 y se

encuentra actualmente operativo, con su sensor *Thematic Mapper* (TM) el satélite posee una resolución de 30x30 m en el espectro infrarrojo refractivo y visible, así como una resolución de 120x120 m en el infrarrojo térmico. El tiempo de revista es de 16 días.

1.3.2. Satélite Landsat 7

El satélite Landsat 7, lanzado en 1999, es un satélite de mediana-alta resolución (15, 30 y 60 m) que orbita a 705 km y cuyas imágenes son obtenidas por el sensor *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+), el cual permite estudiar 8 bandas dentro del espectro electromagnético. El satélite Landsat 7 tiene una resolución temporal de 16 días (INEGI, 1999). La Tabla 2 muestra la resolución espectral y espacial del satélite (Ariza Alexander, 2013).

Tabla 2: Resolución espectral y espacial del sensor ETM+

Bandas	Longitud del espectro	Resolución espacial	Descripción
1	0.45 – 0.52 μm	30 m	Azul visible
2	0.52 – 0.60 μm	30 m	Verde visible
3	0.63 – 0.69 μm	30 m	Rojo visible
4	0.76 – 0.90 μm	30 m	Infrarrojo cercano
5	1.55 – 1.75 μm	30 m	Infrarrojo
6	10.40 – 12.50 μm	60 m	Infrarrojo térmico
7	2.08 – 2.35 μm	30 m	Infrarrojo
8	0.52 – 0.90 μm	15 m	Pancromático

Fuente: (Rodríguez, 2009)
Elaboración: El Autor.

1.3.3. Satélite TERRA-MODIS

El satélite TERRA registra fenómenos ambientales de la superficie y atmósfera Terrestre. Esta plataforma tiene varios sensores, uno de los cuales es el sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS). Este sensor es un radiómetro encargado de monitoreo de la temperatura superficial y oceánica, cambios de cobertura, cambio climático, etc. El sensor posee 36 bandas, una resolución espacial de 250 m y una resolución temporal de 1 día (Perez, 2007).

1.3.4. Satélite Landsat 8

La plataforma Landsat 8 fue lanzada el 11 de Febrero del 2013 y corresponde al último lanzamiento del programa Landsat. Este satélite posee dos sensores: *Operational Land Imager* (OLI) y el sensor térmico *Thermal Infrared Sensor* (TIRS), los cuales poseen mejor resolución radiométrica que los anteriores instrumentos Landsat ya que dispone de 9 bandas con una resolución de 15, 30 y 100 m, como se muestra en la Tabla 3. El tamaño aproximado de cada escena es de 170 Km. (Ariza Alexander, 2013).

Tabla 3: Resolución espacial y espectral del satélite Landsat 8

Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS) February 11, 2013	Bandas	longitud de onda (micrómetros)	Resolución (metros)
	Banda 1 - Aerosol costero	0.43 - 0.45	30
	Banda 2 - Azul	0.45 - 0.51	30
	Banda 3 - Verde	0.53 - 0.59	30
	Banda 4 - Rojo	0.64 - 0.67	30
	Banda 5 - Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 - 0.88	30
	Banda 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
	Banda 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
	Banda 8 - Pancromático	0.50 - 0.68	15
	Banda 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
	*Banda 10 - Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
*Banda 11 - Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100	

Fuente: (Ariza Alexander, 2013)

Elaboración: (Ariza Alexander, 2013)

1.3.5. Satélite IKONOS

Es el primer satélite de uso comercial que posee una resolución de 1m. Su nombre IKONOS significa "imagen". Fue lanzado en 24/09/1999 y posee una altitud de 681 Km, con una inclinación de 98.1° así como un tiempo de revista de 1 a 3 días. IKONOS recoge información de un área aproximada de 20 000 Km. Las principales aplicaciones de este satélite son: agrícolas, medioambientales, urbanísticos y geológicos (Martinez, 2005). La Tabla 4 muestra la resolución espacial y espectral del satélite IKONOS.

Tabla 4: Resolución espacial y espectral del satélite IKONOS

SENSORES	ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	TAMAÑOS DE PÍXEL	RANGO ESPECTRAL
IKONOS	Pancromático	1.0 m	0.45 – 0.90 μm
	Azul	4.0 m	0.45 – 0.52 μm
	Verde	4.0 m	0.52 – 0.60 μm
	Rojo	4.0 m	0.63 – 0.69 μm
	Infrarrojo próximo	4.0 m	0.76 – 0.90 μm

Fuente: (Martinez, 2005)

Elaboración: El Autor.

1.3.6. Satélite Spot

Diseñado en Francia por *Centre National D'Études Spatiales* (CNES), con la participación de Bélgica y Suecia. La plataforma Spot ha lanzado 5 satélites desde 1986. Spot 1: 22/Febrero/1986, Spot 2: 22/Enero/1990, Spot 3: 26/Septiembre/1993, Spot 4: 24/Marzo/1998 y Spot 5: 5/Mayo/2002. La constelación Spot permite obtener imágenes diarias en cualquier ubicación de la Tierra, posee una inclinación de 98.7 ° en el ecuador, con un periodo de 101.4 min y una altitud de 822 Km. Las imágenes de los productos Spot son empleados en estudios ambientales, cartográficos, geología, ingeniería civil, etc. (Martinez, 2005). La Tabla 5 muestra la resolución espacial y espectral de la plataforma Spot.

Tabla 5: Resolución espacial y espectral del satélite Spot

SENSORES	ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	TAMAÑOS DE PÍXEL	RANGO ESPECTRAL
Spot 5	Pancromático B1: verde B2: rojo B3: infrarrojo cercano B4: infrarrojo medio (MIR)	2,5 m y 5 m 10 m 10 m 10 m 20 m	0.48 - 0.71 μm 0.50 - 0.59 μm 0.61 - 0.68 μm 0.78 - 0.89 μm 1.58 - 1.75 μm
Spot 4	Monoespectral B1: verde B2: rojo B3: infrarrojo cercano B4: infrarrojo medio (MIR)	10 m 20 m 20 m 20 m 20 m	0.61 - 0.68 μm 0.50 - 0.59 μm 0.61 - 0.68 μm 0.78 - 0.89 μm 1.58 - 1.75 μm
Spot 3 Spot 2 Spot 1	Pancromático B1: verde B2: rojo B3: infrarrojo cercano	10 m 20 m 20 m 20 m	0.50 - 0.73 μm 0.50 - 0.59 μm 0.61 - 0.68 μm 0.78 - 0.89 μm

Fuente: (Martinez, 2005)
Elaboración: El Autor.

1.3.7. Satélite NOAA

El programa satelital de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) fue desarrollado por la NASA, conjuntamente con *National Environmental Satellite Data and Information* (NESDIS). Los satélites NOAA son satélites de órbita polar y se encargan del monitoreo de la atmosfera continental y Oceánica (Perez, 2007). El sensor *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR), es un sensor multiespectral, con resolución espacial de 1.1 Km, resolución temporal de 12 horas y una altitud de 844 Km (Chuvieco, 1995). El sensor AVHRR tiene 5 bandas, los principales usos se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6: Características y aplicaciones del sensor AVHRR

Canal	Amplitud (um)	Región Espectral	Aplicación
1	0.58 -0.68	Rojo	Mapeo hielo y nieve
2	0.72 -1.10	Infr. cercano	Evaluaciones de masas de agua, vegetación y agricultura
3	3.55 - 3.93	Infr. medio	Mapeo nocturno de nubes, temperatura superficie del mar, detección de incendios
4	10.30 - 11.30	Infr. térmico	Mapeo diurno y nocturno de nubes, temperatura del mar y humedad
5	11.50 -12.50	Infr. térmico	Temperatura der mar y humedad de suelos

Fuente: (Perez, 2007)
Elaboración: El Autor.

1.3.8. Satélite GOES

La plataforma *Geostacionary Opertational Enviromental Satellite* (GOES), es una constelación de satélites meteorológicos de órbita polar. El primer satélite fue lanzado en 1975 denominado GOES-1. Los satélites GOES tienen la capacidad de captar imágenes sobre fenómenos meteorológicos con una buena resolución espacial y temporal gracias al uso conjunto de dos satélites geoestacionarios, ubicados a 75° de longitud oeste y a 135° de longitud oeste. Las bandas del canal visible, en su mayoría ofrecen la mejor resolución espacial (Martinez, 2005). La banda de infrarrojo térmico está ubicada a una longitud de onda de 10-12,5 um, por lo que es transparente a la radiación emitida por la superficie del planeta. La Tabla 7 muestra la resolución espacial y espectral del satélite GOES.

Tabla 7: Resolución espacial y espectral del satélite GOES

CANALES	ESPECTRO, ELECTROMAGNETICO	TAMAÑO PIXEL	RANGO ESPECTRAL
Canal 1	Visible	1.1 Km.	0.65 μm
Canal 2	Infrarrojo medio	4.0 Km.	3.90 μm
Canal 3	Infrarrojo medio	8.0 Km.	6.75 μm
Canal 4	Infrarrojo térmico	4.0 Km.	10.70 μm
Canal 5	Infrarrojo térmico	4.0 Km.	12.00 μm

Fuente: (Martinez, 2005)
Elaboración: El Autor.

1.4. Imagen satelital

Según Perez (2007), las imágenes satelitales son una representación digital de los objetos que componen la superficie terrestre. Las imágenes están compuestas por un raster o grilla, cada celda se denomina pixel. Un pixel posee un nivel de gris, denominado Número Digital (ND) y representa la intensidad electromagnética de una determinada área de superficie terrestre. La Figura 6 ilustra el concepto de imagen satelital: escala de grises (izquierda), pixeles (centro) y número digital (derecha).

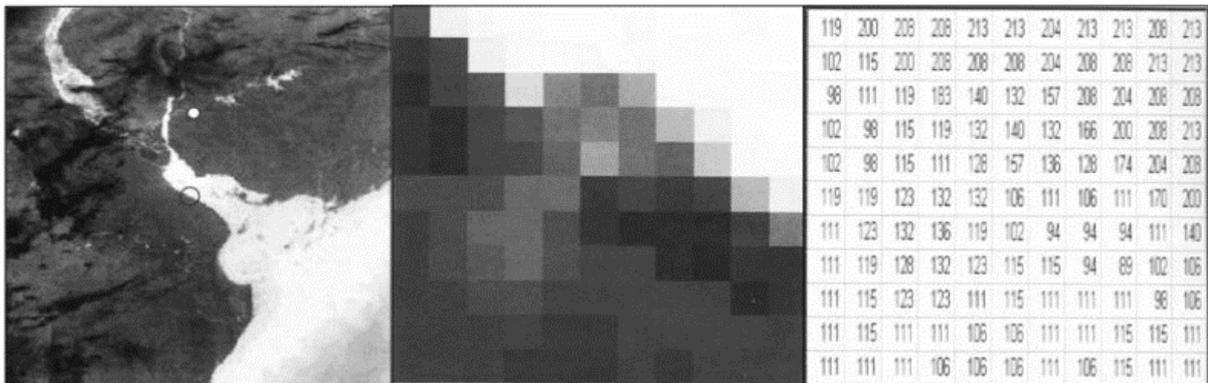


Figura 6: Imagen satelital.

Fuente: (Perez, 2007)

Elaboración: El Autor.

1.4.1. Resolución satelital

La resolución que posee un sensor es la habilidad para captar la información a detalle. Las imágenes de satélite, poseen diferentes clases de resolución, las cuales pueden ser de 4 tipos: espacial, espectral, radiométrica y temporal. Según Perez (2007) son:

- **Resolución Espacial:** Es la capacidad para distinguir los distintos objetos sobre la superficie terrestre. Esta capacidad varía según el número de bandas que el sensor puede registrar y por los intervalos de longitud de onda de estas.
- **Resolución Espectral:** Indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor.
- **Resolución Radiométrica:** Representa el número de niveles grises que pueden ser captados por cada sensor, es decir la sensibilidad que tiene el sensor.
- **Resolución Temporal:** Es la frecuencia de observación del satélite para una determinada área o cada que tiempo el sensor proporciona datos.

1.4.2. Formatos de almacenamiento de imágenes satelitales

Las imágenes satelitales poseen diferentes tipos de formatos, según la manera en que se organizan los ND. Los principales formatos de acuerdo a Perez (2007) son :

- **Bandas secuenciales (BSQ):** Los ND de cada banda se encuentran uno a continuación del otro hasta completar la banda.
- **Bandas intercaladas por líneas (BIL):** Los ND están ordenados por líneas, se graba una línea en todas las bandas sucesivamente.
- **Bandas intercaladas por pixel (BIP):** Se alternan los ND en todas las bandas antes de continuar al siguiente pixel.

En cuanto a las imágenes Landsat se encuentran dentro de un fichero de formato *Tagged Image File Format* (TIFF), el cual permite guardar las imágenes obtenidas por el sensor, en blanco y negro. Las imágenes Landsat 7 tienen un total de 8 bandas espectrales las cuales se muestran en la Tabla 2 (Ariza Alexander, 2013). El formato GeoTIFF es el archivo donde se almacena cada una de las bandas, este tipo de formato permite que la información georreferenciada sea adecuada a un archivo de formato TIFF (Rodríguez, 2009). Este formato contiene toda la información para que la imagen pueda ser automáticamente ubicada en un sistema de referencia.

1.5. Preprocesamiento de imágenes Landsat 7

La información obtenida de las imágenes de satélites está sometida a un conjunto de interferencias. Las interferencias hacen que los valores de ND estén perturbados debido a factores como: fallos del sensor, movimiento del satélite, interferencia de la atmósfera, etc. (Universidad de Murcia, 2003). La Figura 7 muestra el preprocesamiento de imágenes Landsat.

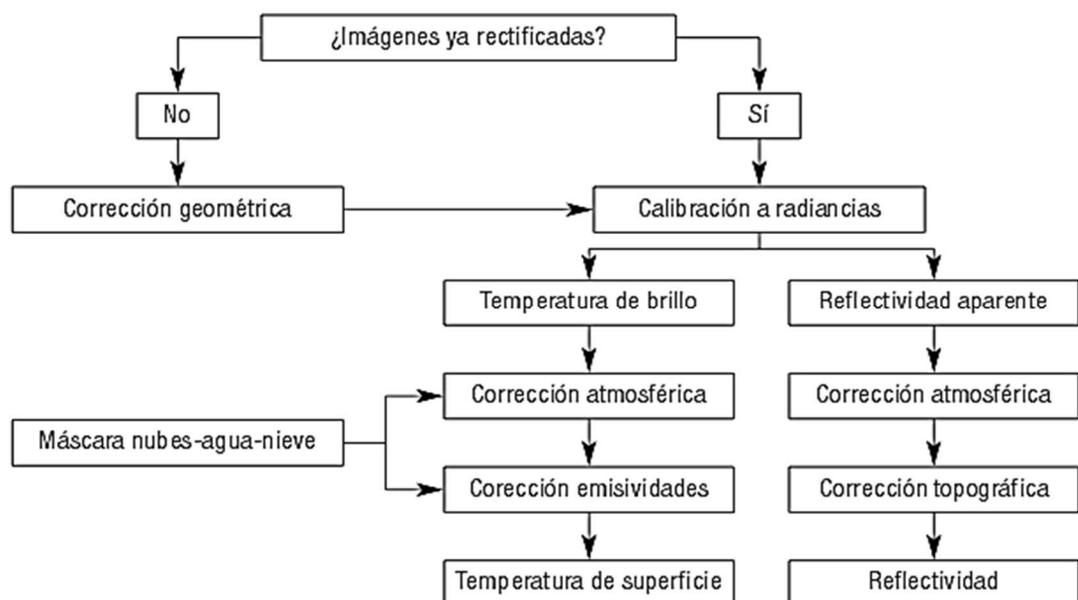


Figura 7: Cadena de Preprocesamiento estándar para imágenes Landsat
 Fuente: (Hantson et al., 2011)
 Elaboración: (Hantson et al., 2011)

1.5.1. Corrección geométrica.

El primer paso antes de utilizar la información de las imágenes satelitales, es su georreferenciación o también denominada corrección geométrica. Según Hantson et al., (2011) la corrección geométrica consiste en asignar a cada pixel su ubicación en el espacio, acorde a un sistema de coordenadas específico.

1.5.2. Corrección radiométrica.

Corrección radiométrica es toda operación que modifica los valores de ND, para corregir errores que influyen en el valor de radiación de un pixel. Los errores pueden ser causados por deficiencias del sensor: como bandeo y pérdida de pixeles o alteraciones en los valores de radiancia producidas por efectos atmosféricos (Hantson et al., 2011).

1.5.2.1. Corrección del fallo Scan Line Corrector (SLC).

Según Rodríguez (2009), en mayo del 2003 el sensor ETM+ empezó a presentar fallas en el *Scan Line Corrector* (SCL) o Corrector de Escaneo Lineal, lo cual hace que se muestren franjas negras, con un valor de pixel igual a cero. Las franjas tienen un ancho de hasta 15 pixeles en los bordes y van disminuyendo hacia el centro de la imagen hasta desaparecer. Este error produce una pérdida de hasta el 22% de la información (Rodríguez, 2009). La Figura 8 ilustra las “franjas negras” producidas el fallo de SCL en una imagen. Existen técnicas para la corrección de esta falla que van desde métodos geo-estadísticos, mediante interpolación de pixeles vecinos, hasta Kriging Ordinario (Rodríguez, 2009).

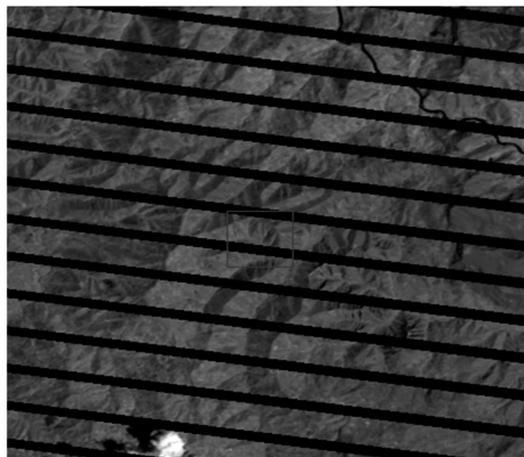


Figura 8: Error originado por falla en el SCL
Fuente: Autor.
Elaboración: El Autor.

1.5.2.2. Corrección Topográfica

La corrección topográfica consiste en corregir los efectos de iluminación causados por relieve topográfico y el ángulo de orientación solar, al momento de toma de la imagen,

mediante este tipo de corrección se recuperar la reflectancia original del pixel, permitiendo así una mejor discriminación de los cuerpo que se encuentran en la superficie terrestre.

La corrección topográfica se realiza a partir de un modelo de iluminación (Ec.1) y del ángulo solar al momento de toma de la imagen. Una vez que se tiene el modelo de iluminación existen diversas metodologías para corrección topográfica las cuales se muestra en la Tabla 8.

$$\text{Cos}(i) = \text{Cos} \theta_s \times \text{Sen} \theta_n \times \text{Cos}(\phi_s - \phi_n) + \text{Sen} \theta_s \times \text{Cos} \theta_n \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

$\text{Cos}(i)$ - Modelo de iluminación

θ_s - Angulo de Elevación solar

θ_n - Pendiente de la superficie

ϕ_s - Azimut solar

ϕ_n - Orientación de la superficie

Tabla 8: Métodos de Corrección Topográfica

METODO	FORMULA MATEMATICA
COSENO	$L_H = L_T \frac{\cos(Z)}{\cos(i)}$
MINNAERT	$L_H = L_T \times \frac{\cos^{1-k}(e)}{\cos^k(i)}$
ESTADISTICO	$L_H = L_T - \cos(i)m - b + \overline{L_T}$
FACTOR C	$L_H = L_T \times \frac{\cos(Z) + C}{\cos(i) + C}$

Fuente: (Centro Internacional de Agricultura Tropical, n.d.)
Elaboración: El Autor.

Donde:

L_H - Reflectancia de una superficie horizontal

L_T - Reflectancia observada

i - Angulo solar

Z - Angulo cenital solar

E - Angulo de la pendiente

m, b - Pendiente de la línea de regresión.

C - Factor "C", definido como: b/m

1.5.2.3. Numero digital (ND) a radiancia.

El primer paso de la corrección radiométrica consiste en transformar los valores de ND a valores de radiancia (Hantson et al., 2011), para ello se usa la (Ec.2) y los coeficientes mostrados en la Tabla 9, dependiendo del número y ganancia de cada banda.

$$L = \text{Grescale} \times \text{Qcal} + \text{Brescale} \quad (\text{Ec. 2})$$

Dónde:

L - Radiancia espectral ($W / (m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$)

Qcal - Valor del pixel en ND

Grescale y Brescale - Constantes de calibración, dependen de la ganancia de la banda.

Tabla 9: Factores de conversión de ND a radiancia

L7 ETM+ Sensor ($Q_{calmin} = 1$ and $Q_{calmax} = 255$)							
Band	Spectral range	Center wavelength	LMIN _λ	LMAX _λ	G _{rescale}	B _{rescale}	ESUN _λ
Units	μm		W/(m ² sr μm)		(W/m ² sr μm)/DN	W/(m ² sr μm)	W/(m ² μm)
<i>Low gain (LPGS)</i>							
1	0.452-0.514	0.483	-6.2	293.7	1.180709	-7.38	1997
2	0.519-0.601	0.560	-6.4	300.9	1.209843	-7.61	1812
3	0.631-0.692	0.662	-5.0	234.4	0.942520	-5.94	1533
4	0.772-0.898	0.835	-5.1	241.1	0.969291	-6.07	1039
5	1.547-1.748	1.648	-1.0	47.57	0.191220	-1.19	230.8
6	10.31-12.36	11.335	0.0	17.04	0.067087	-0.07	N/A
7	2.065-2.346	2.206	-0.35	16.54	0.066496	-0.42	84.90
PAN	0.515-0.896	0.706	-4.7	243.1	0.975591	-5.68	1362

Fuente: (Chander, Markham, Helder, & Ali, 2009)

Elaboración: (Chander et al., 2009)

Las correcciones se realizan en función de las condiciones de iluminación, al momento de la toma de la imagen, las bandas poseen alta (HG) y baja ganancia (LG). Cuando las condiciones de iluminación son bajas, se trabaja con HG y si la iluminación es alta, se trabaja con LG. La ganancia para cada banda se especifica en el archivo metadato (Pons, Cristóbal, & Serra, 2003). Para la banda 6 lo recomendable es trabajar con baja ganancia (Ormeño-Villajos, 2006)

1.5.2.4. Radiancia a Reflectividad aparente (TOA).

Para las bandas no térmicas, una vez que se tiene la radiancia, es posible calcular la reflectividad aparente TOA, o radiancia en el techo de la atmosfera (Hantson et al., 2011).

Para ello se aplica la ecuación (Ec.3).

$$\rho_{TOA} = \frac{\pi \times L \times D^2}{E_{0\lambda} \times \cos\theta_z} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

ρ_{TOA} - Reflectividad TOA

L - Radiancia espectral ($W / (m^2 \text{ sr } \mu m)$)

$E_{0,\lambda}$ – Radiancia espectral exoatmosférica solar.

θ_z - Ángulo cenital solar.

D - Distancia Tierra-Sol, al momento de la toma de la imagen, expresado en unidades astronómicas (ua).

La distancia Tierra-Sol, puede ser calculada empleando la Tabla 10 o mediante la ecuación (Ec.4):

$$D = 1 + 0.01674(\text{sen}2\pi x (J - 93.5) / J_m) \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

D - Distancia Tierra-Sol (ua).

J - Día en el calendario juliano.

J_m - Número de días del año, el seno se toma en radianes.

Tabla 10: Distancia Tierra-Sol (unidades astronómicas)

Table 11.4 Earth-Sun Distance in Astronomical Units									
Day of Year	Distance	Day of Year	Distance	Day of Year	Distance	Day of Year	Distance	Day of Year	Distance
1	.98331	74	.99446	152	1.01403	227	1.01281	305	.99253
15	.98365	91	.99926	166	1.01577	242	1.00969	319	.98916
32	.98536	106	1.00353	182	1.01667	258	1.00566	335	.98608
46	.98774	121	1.00756	196	1.01646	274	1.00119	349	.98426
60	.99084	135	1.01087	213	1.01497	288	.99718	365	.98333

Fuente: (NASA, n.d.)

Elaboración: (NASA, n.d.)

El ángulo cenital se calcula a partir la (Ec.5), mediante el ángulo de elevación del sol, cuyo valor se encuentra en el archivo de metadato.

$$\theta_z = 90 - \theta_s \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

θ_z - Ángulo cenital solar.(°)

θ_s - Ángulo de elevación del sol. (°)

El valor de la irradiancia espectral se puede extraer del archivo metadato o empleando la Tabla: 11.

Tabla 11: Irradiancia espectral

Table 11.3 ETM+ Solar Spectral Irradiances (generated using the ChKur* solar spectrum)	
Band	watts/(meter squared * μm)
1	1970
2	1842
3	1547
4	1044
5	225.7
7	82.06
8	1369

Fuente: (NASA, n.d.)

Elaboración: (NASA, n.d.)

1.5.2.5. *Temperatura Aparente de Brillo (TAB).*

Para la banda térmica, se calcula la Temperatura Aparente de Brillo (TAB) mediante la (Ec.6), en función de la radiancia de la banda térmica (Banda et al., 2009). El valor obtenido se presenta en grados kelvin (°K), por lo que es necesario restar 273.16 para obtener en grados centígrados:

$$TAB = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L} + 1\right)} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

TAB - Temperatura de brillo en el techo de la atmosfera (°K)

K1- Constante 1 de calibración, 666.09 (m² sr μm)

K2 - Constante 2 de calibración, 1282.71 (°K)

L - Radiancia espectral en la temperatura del sensor (W /(m² sr μm))

1.5.2.6. *Corrección atmosférica.*

Para las bandas no térmicas, una vez que se tiene la reflectividad aparente (TOA), se calcula la reflectividad en la superficie terrestre, mediante la (Ec.7), lo cual se denomina corrección atmosférica. La corrección atmosférica consiste en obtener la radiancia original de la superficie, la misma que fue distorsionada durante el viaje desde la superficie hacia el sensor (Hantson et al., 2011). La atmosfera posee composición química y aerosoles que absorben o dispersan la radiación, afectando a los valores originales de radiancia (Universidad de Murcia, 2003).

$$\rho = \frac{\pi \times [L - L_a] \times d^2}{\cos\theta \times E_0 \times \tau_1 \times \tau_2} \quad (\text{Ec. 7})$$

Dónde:

ρ - Reflectividad.

E₀ - Irradiancia exoatmosferica solar (W m⁻² um⁻¹)

τ_1 - Coeficiente de trasmisión atmosférica en el camino Sol-Tierra.

τ_2 - Coeficiente de trasmisión atmosférica en el camino Tierra-sensor.

L_a - Radiancia recibida por el sensor.

L - Radiancia del píxel a corregir ($W / (m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$)

θ - Ángulo cenital solar y la distancia Tierra-Sol.

1.6. Filtrado nuboso

Una de las principales limitaciones de las imágenes Landsat 7, para el cálculo de valores en la superficie, es la detección de nubes. A continuación se presenta una metodología que permite crear un filtro de nubes a la imagen de satélite, basada en el algoritmo del *Automatic Cloud Cover Assessment (ACCA)* los cuales se muestran en la Tabla 12 según Irish (2000).

Tabla 12: Filtros propuestos por el algoritmo ACCA.

1	Umbral de brillo $B_3 > 0.08$	Elimina zonas oscuras
2	Índice de nieve normalizado (NDSI) $NDSI = \frac{B_2 - B_3}{B_2 + B_3} < 0.7$	Elimina distintos tipos de nieve
3	Umbral de temperatura $B_6 < 300K$	Elimina zonas calientes
4	Compuesto bandas 5/6 $(1 - B_5)B_6 < 225$	Elimina distintas superficies incluyendo hielo
5	Ratio bandas 4/3 $\frac{B_4}{B_3} < 2$	Elimina vegetación y suelo altamente reflectante
6	Ratio bandas 4/2 $\frac{B_4}{B_2} < 2$	Elimina elementos ambiguos
7	Ratio bandas 4/5 $\frac{B_4}{B_5} > 1$	Elimina piedras y zonas desérticas
8	Compuesto bandas 5/6 $(1 - B_5)B_6 > 210 \rightarrow \text{warm clouds}$ $(1 - B_5)B_6 < 210 \rightarrow \text{cold clouds}$	Distingue entre nubes frías y calientes

Fuente: (Contell, 2009)

Elaboración: El Autor.

Luego de aplicar las ecuaciones propuestas por el algoritmo ACCA, se presentan algunas recomendaciones (Contell, 2009):

- Expandir los puntos de nube, para eliminar las sombras que rodean las nubes y píxeles contiguos, pues estos también sufren el efecto de vapor de agua.
- Eliminar los puntos sueltos, es decir, todos los puntos catalogados como nube que con $N=3$ píxeles o menos son marcados como terreno. El valor de N está a criterio del usuario, pues debe reconocer que píxeles se ha marcado erróneamente como nube.

1.7. Procesamiento de imágenes Landsat 7.

1.7.1. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

El *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) o Índice de vegetación de diferencia normalizada permite estimar el vigor de vegetación, en función de la reflectividad en el rojo y el infrarrojo cercano (Chuvieco Salina, 2002). Para las bandas de Landsat 7, el NDVI quedaría expresado como la (Ec.8):

$$NDVI = \frac{(Re\ B4 - Re\ B3)}{(Re\ B4 + Re\ B3)} \quad (Ec. 8)$$

Donde:

NDVI - Índice de Vegetación Normalizada

Re B3 - Refelctividad de la banda 3

Re B4 - Refelctividad de la banda 4

La presencia de vegetación según el NDVI, puede ser identificada mediante los siguientes rangos (Schirmbeck & Rivas, 2007):

- $0 < NDVI < 0.3$, corresponde a suelo desnudo
- $0.3 < NDVI < 0.6$, es una combinación de suelo y vegetación
- $NDV > 0.6$, se considera vegetación
- Para nubes y cuerpos de agua los valores de NDVI son cercanos a cero y negativos.

1.7.2. Emisividad (ϵ).

La emisividad es la capacidad que tiene una superficie para convertir la energía calorífica en energía radiante fuera de la misma (Jiménez, 2005). La emisividad se calcula por el método propuesto por Sobrino et al. (2008), calculado de acuerdo a los rangos del NDVI y del valor de Proporción de Cubierta Vegetal (P_v) en la (Ec. 9, 10, 11 y 12)

$$NDVI < 0.2 \quad \epsilon = 0.979 - 0.035 \times TM3 \quad (Ec. 9)$$

$$0.2 \leq NDVI \leq 0.5 \quad \epsilon = 0.986 + 0.004 \times P_v \quad (Ec. 10)$$

$$NDVI > 0.5 \quad \epsilon = 0.99 \times P_v \quad (Ec. 11)$$

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \right)^2 \quad (Ec. 12)$$

Dónde:

ϵ - Emisividad

NDVI- Índice de Vegetación Normalizada

P_v - Proporción de la cubierta vegetal.

$NDVI_v$ y $NDVI_s$ - Constantes, su valor es de 0.5 y 0.2 respectivamente.

1.7.3. Temperatura superficial (TS).

De acuerdo a Jiménez (2005), existen algunos tipos de algoritmos para el cálculo de la TS: monocanal, bicanal, biangular multicanal. Los algoritmos monocanal usan una sola banda térmica. Los algoritmos bicanal o Split-Window usan dos bandas térmicas. Los algoritmos biangulares usan un canal pero con dos ángulos de observación distintos. Finalmente, los algoritmos multicanal los cuales usan más de tres canales. Dado que Landsat 7 dispone únicamente de una banda térmica y un ángulo de observación, se debe hacer uso de algoritmos monocanal.

Cabe mencionar que Landsat 8 posee dos canales en la banda térmica, lo cual permitiría el uso de algoritmos split-window, pero lamentablemente, este satélite fue lanzado el 11 de febrero de 2013 (Ariza Alexander, 2013), lo cual no concuerda con los datos de TA disponibles y además los algoritmos split-window están igualmente condicionados por el uso de parámetros atmosféricos, relacionados con el vapor de agua, en la ecuación de TS (Yu, Guo, & Wu, 2014).

1.7.3.1. Algoritmo monocanal de Qin, Karnieli y Berliner (2001).

Desarrollado inicialmente para la banda 6 de Landsat 5. El método establece relaciones lineales entre la temperatura atmosférica y la TA cercano a la superficie, así como entre la transmisividad y el vapor de agua atmosférico (Jiménez, 2005) y puede ser calculado mediante la (Ec.13, 14 y 15), la relacion entre la Ta y To se presenta en la Tabla 13, mientras que la Tabla 14 muestra la relacion entre τ y W.

$$TS = 1/C_6 \{a_6 (1 - C_6 - D_6) + [b_6 (1 - C_6 - D_6) + C_6 + D_6] TAB - D_6 \times Ta\} \quad (\text{Ec. 13})$$

$$D_6 = (1 - \tau_6)[1 + (1 - \varepsilon) \times \tau_6] \quad (\text{Ec. 14})$$

$$C_6 = \varepsilon \times \tau_6 \quad (\text{Ec. 15})$$

Donde:

TS - Temperatura superficial

T_a - Temperatura atmosférica.

T_o - Temperatura del aire cercana a la superficie.

TAB - Temperatura aparente de brillo

τ_6 - Transmisividad atmosférica.

ε - Emisividad.

W - Contenido en vapor de agua atmosférico.

a₆ y b₆ - Constantes, 67.355351 y 0.458606 respectivamente.

D₆ y C₆ - Factores de temperatura.

Tabla 13: Atmosferas estándar para la Ta y To.

Tropical:	$T_a = 17.9769 + 0.91715 T_0$
Latitudes Medias Verano:	$T_a = 16.0110 + 0.92621 T_0$
Latitudes Medias Invierno:	$T_a = 19.2704 + 0.91118 T_0$

Fuente: (Jiménez, 2005)
Elaboración: (Jiménez, 2005)

Tabla 14: Relación entre transmisividad atmosférica y el vapor de agua.

Valores altos de temperatura del aire	
$\tau_6 = 0.974290 - 0.08007 w$	para $w \in [0.4-1.6] \text{ g/cm}^2$
$\tau_6 = 1.031412 - 0.11536 w$	para $w \in [1.6-3.0] \text{ g/cm}^2$
Valores bajos de temperatura del aire	
$\tau_6 = 0.982007 - 0.09611 w$	para $w \in [0.4-1.6] \text{ g/cm}^2$

Fuente: (Jiménez, 2005)
Elaboración: (Jiménez, 2005)

1.7.3.2. Algoritmo monocanal de Jiménez-Muñoz & Sobrino.

El algoritmo monocanal de Jiménez-Muñoz & Sobrino (2003) se muestra en la (Ec.16) y se basa en la ecuación de transferencia radiativa. La ecuación consta de funciones atmosféricas como transmitancia, radiancia ascendente y radiancia descendente (J. Sobrino, Cristóbal, Sòria, Ninyerola, & Pons, 2010). Los parámetros del algoritmo monacal corresponden a las (Ec.17, 18,19, 20 y 21) y se describen a continuación:

$$TS = \gamma \times [\varepsilon^{-1} (\Psi_1 \times L + \Psi_2) + \Psi_3] + \delta \quad (\text{Ec. 16})$$

$$\gamma = \left\{ \frac{c_2 \times L}{TAB^2} \left[\frac{\lambda^4 \times L}{c_1} + \frac{1}{\lambda} \right] \right\}^{-1} \quad (\text{Ec. 17})$$

$$\delta = -\gamma \times L + TAB \quad (\text{Ec. 18})$$

$$\Psi_1 = \frac{1}{\tau} \quad (\text{Ec. 19})$$

$$\Psi_2 = -L \downarrow - \frac{L \uparrow}{\tau} \quad (\text{Ec. 20})$$

$$\Psi_2 = -L \downarrow \quad (\text{Ec. 21})$$

Dónde:

TS - Temperatura superficial

L - Radiancia térmica, banda 6 en ($\text{w m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ um}^{-1}$)

TAB - Temperatura de resplandor o de brillo (°K).

ϵ - Emisividad.

γ - Parámetro de Plankc 1.

δ - Parámetro de Plankc 2.

C_1 - Constante $1.19104 \cdot 10^8 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ } \mu\text{m}^{-1}$

C_2 - Constante $14327.7 \text{ } \mu\text{m K}$.

λ - longitud de onda efectiva, $11.5 \text{ } \mu\text{m}$ para Landsat 7.

Ψ_1, Ψ_2 y Ψ_3 – Parámetros atmosféricos de TS

$L \downarrow$ - Radiancia ascendente ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$)

$L \uparrow$ - Radiancia descendente ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$)

τ - Transmitancia

En general, una de las principales dificultades en el uso de imágenes Landsat, para el cálculo de la TS, es el empleo de perfiles atmosféricos con el fin de obtener valores de: transmitancia, radiancia ascendente y radiancia descendente. Una solución alternativa es el empleo de códigos de transferencia radiativa y valores de vapor de agua atmosférico, obtenido mediante otro tipo de imágenes satelitales como sensor de MODIS (Coll et al. 2009).

Con el objetivo de viabilizar el uso de imágenes Landsat 7 (Barsi, Schott, Palluconi, & Hook, 2005), han desarrollado una herramienta web: <http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>, la cual facilita la obtención de los parámetros atmosféricos, de forma gratuita y para un sitio puntual. La herramienta está basada en perfiles atmosféricos obtenidos del *National Center for Environmental Prediction* (NCEP). Los factores han sido interpolados a las coordenadas, fecha y hora del día especificados en los datos de entrada de la herramienta (Barsi et al., 2005). Los datos de entrada son: fecha, hora de paso del satélite, latitud, longitud, altura, presión atmosférica, temperatura y humedad relativa.

1.7.3.3. Algoritmo monocanal de Artist & Carnahan.

La ecuación fue propuesta por Artis & Carnahan (1982), es de fácil aplicación ya que combina únicamente la TAB y la emisividad de la superficie tal como se muestra en la (Ec.22).

$$TS = \frac{TAB}{1 + (\lambda \times TAB) \times \text{Ln}(\epsilon)} \quad (\text{Ec. 22})$$

Donde:

TS - Temperatura superficial

TAB - Temperatura de resplandor o de brillo (°K).

λ - Longitud de onda efectiva, $11.5 \text{ } \mu\text{m}$ para Landsat 7.

ϵ - Emisividad.

1.8. Temperatura del aire (TA)

A lo largo del día la radiación solar viaja a través de la atmosfera sin calentarla, ya que el aire seco y limpio es transparente a la radiación de onda corta. Cuando la radiación llega al suelo empieza a calentarlo y provoca el calentamiento de las capas de aire próximas al suelo. Las capas inferiores al poseer mayor temperatura y menor densidad, producen movimientos verticales responsables del transporte de aire, este proceso se denomina convección (Facultad de Ciencias Agrarias - UNCUYO, 2015). La Figura 9 muestra como el aire se irá calentando hasta una determinada altitud, llegado a este punto denominado techo de inversión, su valor empieza a decrecer con la altitud.

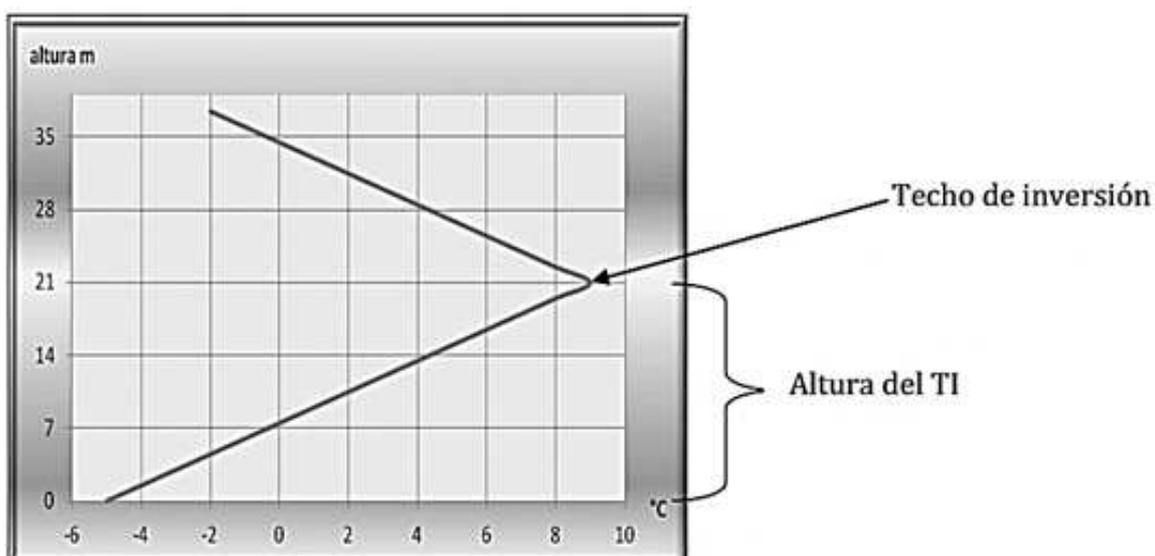


Figura 9: Inversión de la TA

Fuente: (Facultad de Ciencias Agrarias - UNCUYO, 2015)

Elaboración: (Facultad de Ciencias Agrarias - UNCUYO, 2015)

1.8.1. Dispositivos para medir la TA.

La TA corresponde al valor indicado en un termómetro expuesto al aire y protegido de la radiación solar directa. La TA se mide en decimas de grados centígrados desde una altura de 2 m de sobre el suelo (INAMHI, 2015) por medio de los siguientes dispositivos:

- **Termómetro seco:** Termómetro cuyo depósito está seco. Este termómetro mide la TA por diferencia de dilatación entre el mercurio y el vidrio. La temperatura media diaria corresponde al promedio de 3 observaciones del termómetro seco (INAMHI, 2015).
- **Termómetro de mínima:** Indicador de la temperatura mínima de un intervalo dado. La columna de alcohol posee un índice, a medida que la temperatura disminuye, el alcohol va reduciendo su tamaño y arrastra al índice. Al incrementar la temperatura, el índice deja pasar el alcohol pero queda en la posición de temperatura mínima (INAMHI, 2015).

- **Termómetro de máxima:** Indicador de la temperatura máxima de un intervalo dado. Este termómetro tiene una estrangulación que permite el paso de la columna de mercurio, pero impide el regreso, con lo cual queda marcada la temperatura máxima alcanzada (INAMHI, 2015).

-

1.8.2. Variables relacionadas a la TA.

Según el estudio realizado por Rosselló, Casals, Fernández, & Montferrer (2010) existen distintos predictores que están relacionados con la TA, los cuales son geográficos y de teledetección. De acuerdo a este estudio los predictores geográficos más representativos, en orden de importancia, son: altitud, continentalidad y latitud. Los predictores de teledetección más representativos son: TS, albedo y NDVI respectivamente.

1.8.3. Mapas de TA mediante Imágenes satelitales

Para obtener los mapas de TA mediante el empleo de imágenes satelitales se puede realizar una correlación entre la TS y la TA. La TS es calculada mediante la imagen de satélite y la TA es la temperatura media diaria captada por la estación meteorológica (Recondo & Pérez-Morandeira, 2002). La correlación entre la TS y la TA permite generar una ecuación lineal de forma: $y = mx + b$, que para nuestro caso de estudio quedaría expresado como se muestra en la (Ec.23):

$$TA = m \times TS + C \quad (\text{Ec. 23})$$

Dónde:

TA - Temperatura del aire, variable dependiente

m - Pendiente de la recta de tendencia

TS - Temperatura superficial, variable independiente

C - Constante

1.8.4. Mapas de TA mediante métodos alternativos

Se proponen dos metodologías alternativas al uso de imágenes de satélite, que de acuerdo a los datos disponibles, permiten modelar la TA. Las metodologías propuestas son: interpolación mediante Kriging Ordinario y uso del Gradiente Altitudinal.

1.8.4.1. Método de interpolación Kriging Ordinario.

El método de interpolación espacial, mediante Kriging Ordinario, es un método estadístico, en el cual solo un subconjunto de datos, los más cercanos, son empleados para estimar el valor de dicho punto (Leguizamón, 2003). El método Kriging Ordinario se basa en que la variación

que experimenta una variable (en este caso la TA) es continua en el espacio, por lo tanto los valores más cercanos tienen valores más parejos que los se encuentran más distantes (Bustamante, 2003). Las ecuaciones que intervienen en la interpolación Kriging Ordinario se muestran como (Ec.24, 25 y 26):

$$\sum_{i=1}^n * \lambda_i \gamma[d(S_i S_j)] + m = \gamma[\delta(S_i S_j)] \quad (\text{Ec. 24})$$

$$\sum_{i=1}^n * \lambda_i = 1 \quad (\text{Ec. 25})$$

$$\gamma[d(S_i, S_o)] = \text{var}[Z(S_j) - Z(S_o)] \quad (\text{Ec. 26})$$

Dónde:

n - Número de observaciones

m - Multiplicador de Lagrange

λ_i - Peso de las observaciones

S - Medición efectuada

$[d(S_i, S_o)]$ – Distancia entre las (S_i, S_o)

i, j - Puntos muestreados

1.8.4.2. Método del Gradiente Altitudinal.

El método de Gradiente Altitudinal se basa en correlacionar la TA con la altitud, como se indica en la (Ec.27), de esta manera se obtiene una pendiente que relaciona la temperatura con la altura. El primer paso consiste en emplear el gradiente altitudinal para llevar las temperaturas, medidas a distinta elevación, a una altura en común según la (Ec.27) y posteriormente realizar una interpolación Kriging.

$$\text{DET} = M + G \times (H_{\text{DET}} - H_i) \quad (\text{Ec. 27})$$

Dónde:

DET- Valor medido a una altura H_{DET}

H_{DET} - Altura a la que se desea realizar la interpolación

H_i - Altura de la estación

G - Gradiente

M - Magnitud de estudio

Una vez realizada la interpolación de Kriging, se emplea el gradiente altitudinal y un MDE para obtener el valor de temperatura a la altura de cada uno de los pixeles del MDE, para ello aplicamos la ecuación (Ec.28):

$$M_C = DET + G \times (H_i - H_{DET}) \quad (\text{Ec. 28})$$

Dónde:

Mc - Magnitud de estudio, calculada a la altura del pixel.

DET- Valor medido a una altura H_{DET}

G - Gradiente

Hi - Altura del pixel

H_{DET} - Altura de partida

**CAPÍTULO II:
ÁREA DE ESTUDIO**

2.1. Ubicación geográfica

El área de estudio, mostrado en la Figura 10, se definió en función de los datos disponibles. Las estaciones están ubicadas en distintos puntos de la provincia de Loja, delimitado por las coordenadas UTM 17S las cuales son: Xmin: 613575, Ymin: 9518185, XMAX: 707745 y YMAX: 9565405.

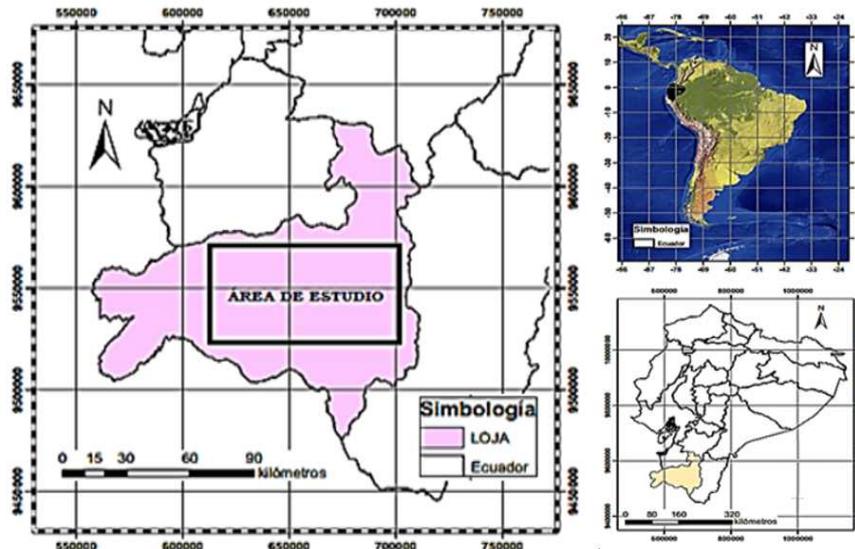


Figura 10: Área de estudio ubicada en la provincia de Loja.

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor.

2.2. División política

El área de estudio se encuentra ubicada dentro de la provincia de Loja, la división política del área de estudio se muestra en la Figura 11 y corresponde a los siguientes cantones: Loja, Catamayo, Gonzanama, Quilanga, Calvas, Paltas, Olmedo, Sozoranga, Macará y Celica.

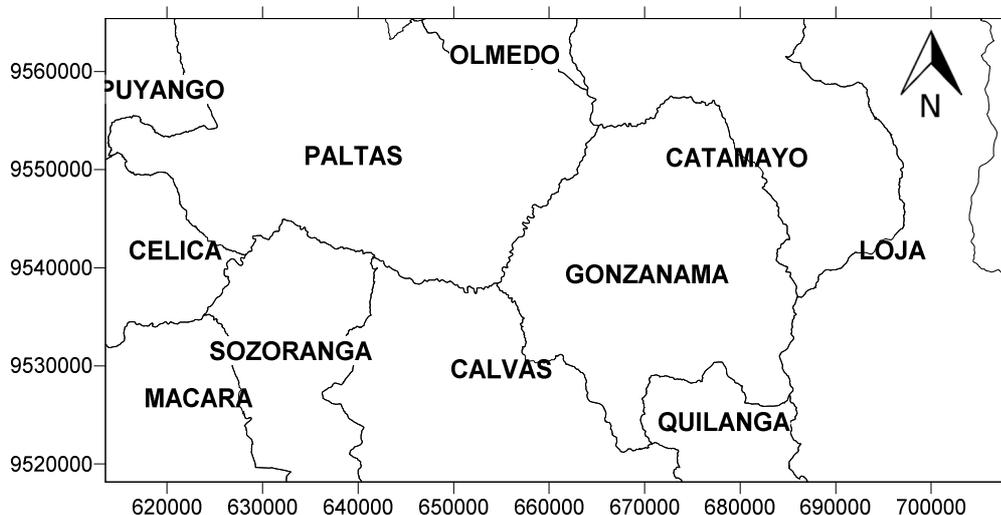


Figura 11: División política de la zona de estudio en la provincia de Loja.

Fuente: (Maldonado, 2014)

Elaboración: El Autor.

2.3. Características orográficas

La provincia de Loja, se encuentra atravesado por la cordillera de Los Andes, por lo que su orografía decrece de Este a Oeste, donde la irregularidad de su relieve produce cordilleras horizontales, valles y llanuras (Philo, 1998). Las alturas van desde 500 msnm en cantones como Macará, Celica, Puyango y Sozoranga, a elevaciones cercanas a los 3400 msnm en el cantón Loja, tal como se muestra en la Figura 12.

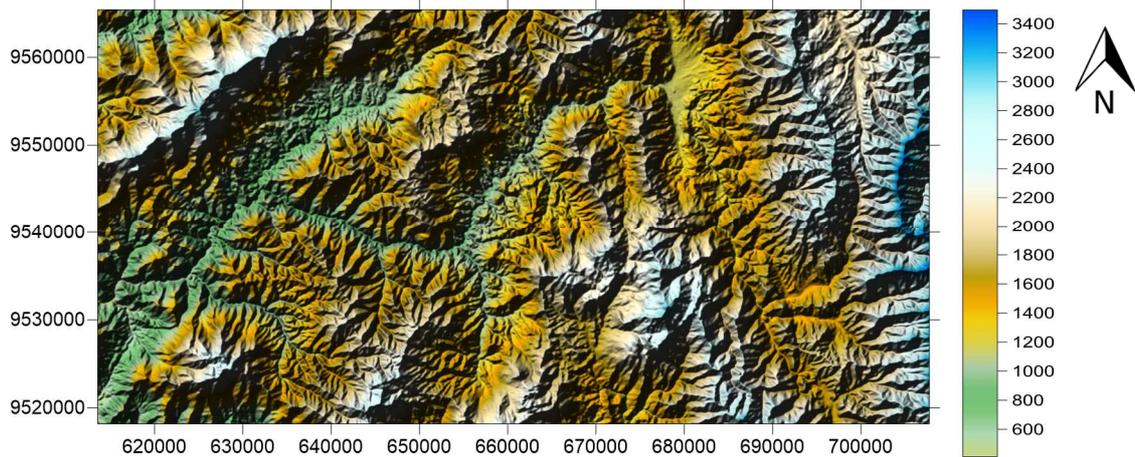


Figura 12: Orografía de la zona de estudio en la provincia de Loja.
Fuente: (Maldonado, 2014)
Elaboración: El Autor.

2.4. Características climatológicas

Las características climatológicas de la provincia de Loja están condicionadas por la caótica orografía, dando lugar a diversos microclimas (Philo, 1998). El gradiente altitudinal calculado por medio de datos del INAMHI y la UTPL, para los años 2012-2013 es de 6.5°C por cada 1000 m. Según se muestra en la Figura 13, la provincia de Loja está constituida por los climas: tropical, templado y sub tropical, estos climas varían de acuerdo a la altura. El clima tropical: bajo la cota 1200 msnm, clima subtropical: entre los 1200 a 1900 msnm y clima templado: entre 1900 y 2800 msnm aproximadamente (Philo, 1998) .

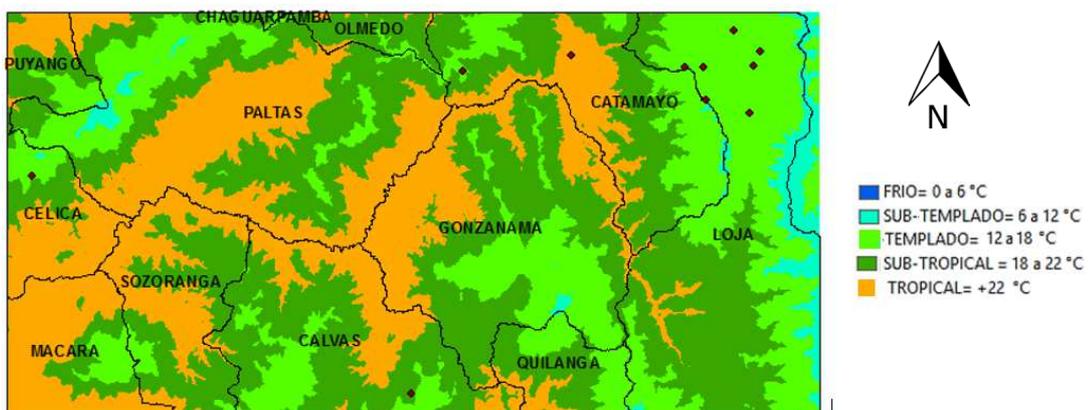


Figura 13: Climatología de la zona de estudio en la provincia de Loja.
Fuente: (Maldonado, 2014)
Elaboración: El Autor.

La Tabla 15 muestra un resumen de los pisos térmicos de la provincia de Loja.

Tabla 15: Climas de la provincia de Loja.

Clima	Rango tèrmico (TA °C)	Elevación (msnm)
Frío	0 a 6	> 3000
Subtemplado	6 a 12	2700 - 3000
Templado	12 a 18	2000 - 2700
Subtropical	18 a 22	1400 - 2000
Tropical	> 22	< 1400

Fuente: (Philo, 1998) .

Elaboración: El Autor.

CAPÍTULO III
MATERIALES Y EQUIPOS

3.1. Materiales

3.1.1 Datos de Información Geográfica

Para obtener los mapas de TA se emplea un MDE del área de estudio, el mismo que posee una resolución espacial de 30m. El MDE se encuentra georreferenciado al datum UTM 17S y está delimitado por las coordenadas: Xmin: 613575, Ymin: 9518185, XMAX: 707745 y YMAX: 9565405.

3.1.2 Datos de Teledetección

El satélite Landsat 7 con su sensor ETM+ proporciona un registro histórico de imágenes para el área de estudio seleccionada en el periodo 2012 y 2013, en el área de estudio seleccionado. Los datos de teledetección, correspondientes a las imágenes Landsat 7 fueron obtenidos gratuitamente mediante la plataforma web del *United States Geological Survey* (USGS) o Servicio Geológico de los Estados Unidos: <http://earthexplorer.usgs.gov/>.

3.1.3 Datos Meteorológicos

Los datos meteorológicos se han obtenidos por medio de estaciones climatológicas, administradas por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), así como por la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), con un total de 11 estaciones meteorológicas, ubicadas dentro del área de estudio según la Figura 14 y las cuales se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16: Estaciones climatológicas. Provincia de Loja.

	Estación	Institución
1	Finca Jipiro Alto	UTPL
2	Malca	UTPL
3	Colegio Militar	UTPL
4	San Pedro	UTPL
5	Finca Colegio Técnico	UTPL
6	Estación UTPL	UTPL
7	Cerro Ventanas	UTPL
8	Cerro Villonaco	UTPL
9	Cariamanga	INAMHI
10	Celica	INAMHI
11	La Argelia	INAMHI

Fuente: El autor

Elaboración: El Autor.

Estas instituciones nos han suministrado gratuitamente los datos de contenido de humedad (CH) y temperatura media diaria del aire (TA), para el periodo 2012 y 2013, en las fechas en

que se dispone imágenes de satélite. La distribución espacial de las estaciones climatológicas dentro del área de estudio se muestra en la Figura 14.

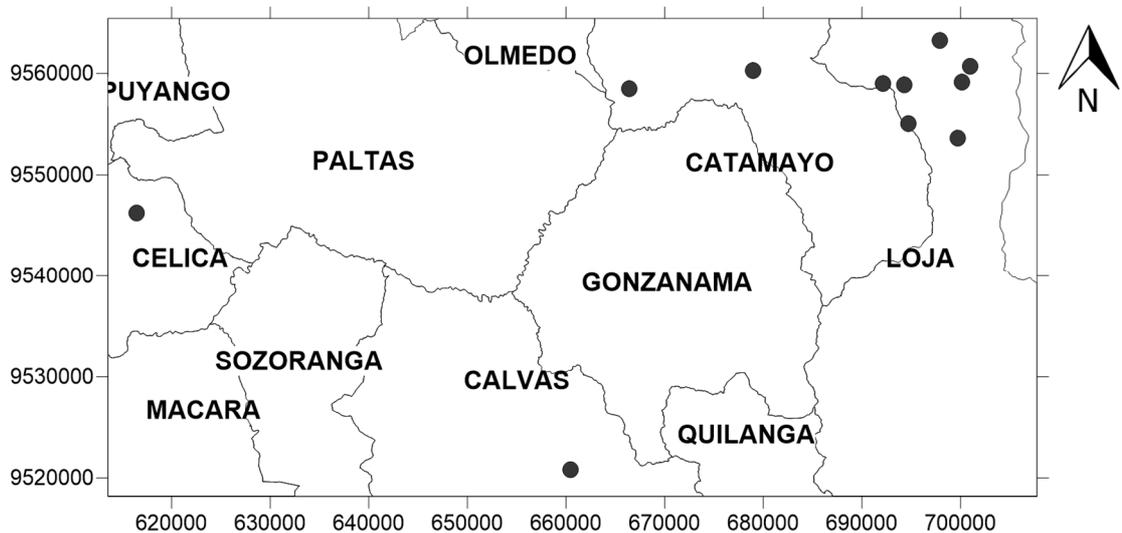


Figura 14: Distribución espacial de las estaciones climatológicas.
Fuente: El autor
Elaboración: El Autor.

3.2. Software

Para procesar las imágenes de satélite, así como para el manejo de variables geográficas, se hace uso de software especializado como: Idrisi y Gvsig los cuales se describen a continuación.

3.2.1. Idrisi.

IDRISI es un software diseñado para el tratamiento de imágenes de teledetección en formato digital (raster) y datos vectoriales. Posee numerosos módulos para el análisis y presentación de información digital especial. (Rial & Gonzalez, 1999).

3.2.2. Gvsig.

El software de adquisición libre Gvsig, el cual es un Sistema de Información Geográfica (SIG) destinado al manejo, análisis y gestión de información territorial (gvSIG Asociación, 2015).

**CAPÍTULO IV:
METODOLOGÍA**

4.1. Metodología general.

La metodología para generar mapas de TA mediante imágenes satelitales se encuentra resumida en la Figura 15 y está dividida en cuatro etapas: Preprocesamiento, Procesamiento, Correlación TS vs TA y Validación de resultados.

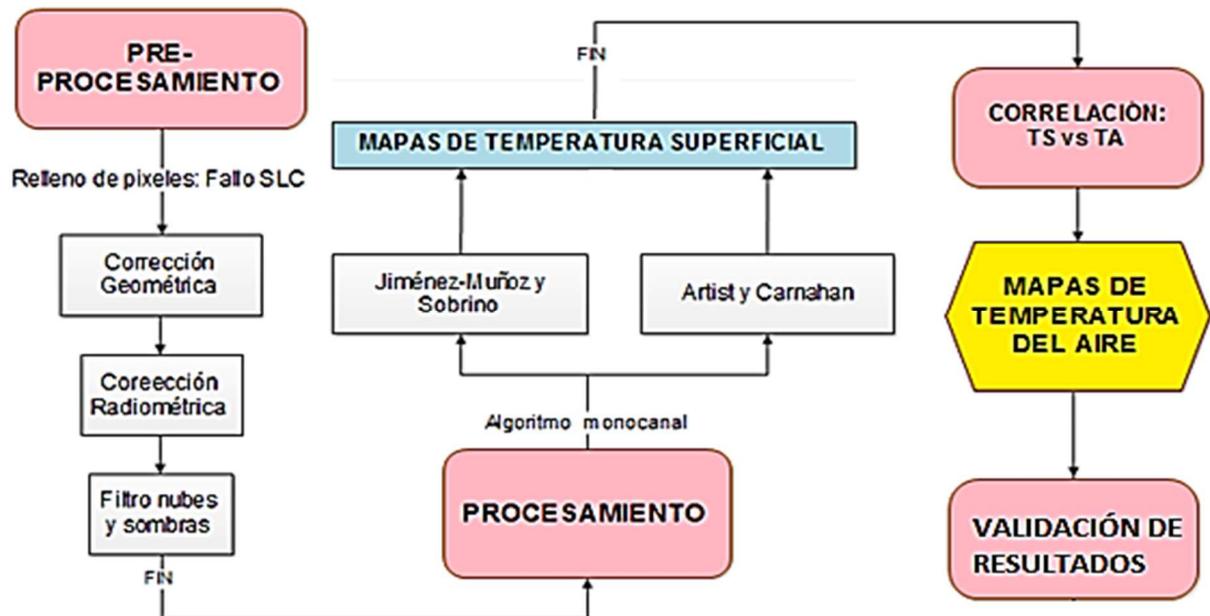


Figura 15: Metodología general aplicada al proyecto de investigación.
Fuente: El Autor.
Elaboración: El Autor.

La etapa de Preprocesamiento consiste en preparar las imágenes de satélite para que puedan ser utilizadas en el cálculo de la TS, aplicando las correcciones geométrica y radiométrica, así como filtro de nubes y sombras que estas producen (Hantson et al., 2011). La etapa de Procesamiento está encaminada a obtener cada una de las variables que intervienen en el cálculo de la TS. Las ecuaciones monocanal desarrolladas por: Jiménez-Muñoz & Sobrino (2003) y Artis & Carnahan (1982) serán aplicadas a la imagen de satélite para obtener mapas de TS. La tercera etapa denominada Correlación hace referencia a la metodología para establecer una ecuación que permita generar un mapa de TA, la cual consiste en un análisis de correlación lineal entre las variables de TS y TA. Finalmente la etapa denominada Validación de Resultados tiene como fin validar los mapas de TA, para este objetivo se emplea el indicador de ajuste R^2 y como medida de error se emplea Validación Cruzada.

4.2. Preprocesamiento.

Antes de iniciar con la etapa de Preprocesamiento se debe realizar la descarga de las imágenes Landsat 7, empleadas en la obtención de mapas de TA, las imágenes satelitales se han descargado de forma gratuita desde el sitio web: <http://earthexplorer.usgs.gov>, los datos

de entrada para realizar la búsqueda de imágenes son: periodo de estudio, ubicación geográfica y tipo de sensor. Una vez descargadas las imágenes, cada imagen viene en un archivo comprimido, el cual contiene archivos de extensión .Tiff referentes a las 8 bandas de las cuales dispone una imagen Landsat 7, de las cuales siete bandas son multiespectral y una pancromática. El archivo comprimido posee un archivo .txt el cual es el metadato, donde se encuentra información específica de la imagen (Rodríguez, 2009).

4.2.1. Corrección Geométrica.

Las imágenes Landsat 7 se encuentran georreferenciado, en este caso al datum UTM: 17 Sur. Se debe comprobar que las imágenes descargadas no tengan desplazamientos.

4.2.2. Corrección Radiométrica.

La metodología empleada para la corrección radiométrica se resume en la Figura 16 y tiene como fin modificar los valores de ND, para corregir errores, causados por deficiencias del sensor o por efectos atmosféricos (Hantson et al., 2011), que influyen en el valor de radiación de un pixel.



Figura 16: Corrección radiométrica
Fuente: El Autor.
Elaboración: El Autor.

La corrección radiométrica se realiza en la siguiente secuencia:

1. El primer paso es corregir el fallo *Scan Line Corrector* (SLC), para ello se dispone de una herramienta desarrollada por Bustillos (2012), denominada *Gap Fill*, la cual rellena los pixeles perdidos mediante interpolación de los vecinos más cercanos.
2. Todas las bandas: B1 a B7, se transforman de ND a Radiancia aplicando la (Ec: 2). Los factores de conversión de ND a Radiancia se muestran en la Tabla 9. Para la banda B6 se debe tomar "Low Gain".

3. Las bandas no térmicas: B1 a B5 y B7, se transforman de Radiancia a Reflectancia TOAA aplicando la (Ec: 3). Los resultados servirán para realizar el filtro de nubes. Los valores como el ángulo cenital solar y la distancia Tierra-Sol, están indicados en el archivo metadato.
4. El filtrado nuboso se realiza aplicando las ecuaciones propuestas en la metodología ACCA mostradas en la Tabla 12, luego se debe expandir los pixeles catalogados como nube y luego eliminar los pixeles sueltos o aislados (Contell, 2009).
5. Las bandas: B3 y B4 se transforman de radiancia a reflectancia aplicando la (Ec: 7).
6. La banda térmica B6, se transforma de radiancia a TAB aplicando la (Ec: 6).

4.3. Procesamiento.

El Procesamiento tiene como fin obtener mapas de TS que serán empleados en el cálculo de la TA. Para calcular la TS se debe emplear algoritmos monocanal dado que Landsat 7 posee una banda térmica. El tipo de ecuación se selecciona en función de los datos disponibles como son: emisividad, radiancia y reflectancia, las cuales pueden ser calculadas mediante las bandas que posee el sensor. Las ecuaciones que permitirán obtener mapas de TS han sido propuestas por: Jiménez-Muñoz & Sobrino (2003) y Artis & Carnahan (1982).

Para generar mapas de TS de acuerdo al Algoritmo de Jiménez & Sobrino, el procedimiento es:

1. Calcular el NDVI aplicando la (Ec: 8)
2. Calcular de la Emisividad aplicando las ecuaciones: (Ec: 9,10, 11 y 12), según el rango del NDVI.
3. Los parámetros de Planks se obtienen aplicando la (Ec: 17) y (Ec: 18)
4. Obtener los factores atmosféricos de la página web: <http://atmcorr.gsfc.nasa.gov>
5. Los factores atmosféricos se correlacionan con la altura y mediante un MDE se genera un mapa para cada uno de los factores.
6. Aplicar la ecuación de TS de Jiménez-Muñoz & Sobrino (Ec: 16)

Para generar mapas de TS de acuerdo al algoritmo de Artist & Carnahan, el procedimiento es:

1. Calcular el NDVI aplicando la (Ec: 8)
2. Calcular de la Emisividad aplicando las ecuaciones: (Ec: 9, 10, 11 y 12), según el rango del NDVI.
3. Aplicar la ecuación de TS de Artist & Carnahan (Ec: 22)

4.4. Mapas de TA mediante imágenes de satélite.

De acuerdo a la metodología explicada en investigaciones realizadas por Recondo & Pérez-Morandeira (2002), para obtener mapas de TA mediante imágenes de satélite, se debe disponer de un mapa de TS en el cual se precede ubicar las coordenadas de las estaciones meteorológicas para realizar una lectura de la TS en ese punto, luego se registra el valor de la TS del pixel y su correspondiente valor de TA, temperatura que es medida por la estación climatológica el día de la toma de la imagen. Este proceso se realiza para todas las estaciones, sin tomar en cuenta las estaciones que se encuentren sobre pixeles catalogados como nube o sombra. Los valores puntuales de TS y TA, son ubicados en un sistema coordinado donde: TS es la variable independiente y TA es la variable dependiente, con esto se puede crear una nube de puntos. Esta nube me permite generar una línea de tendencia que será expresada como una ecuación de TA. La ecuación será aplicada a todos los pixeles de la imagen, creando así, un mapa de TA (una superficie continua en vez de datos puntuales).

4.5. Validación de los resultados.

Al disponer de pocas estaciones climatológicas, no se puede excluir un cierto número de la muestra para la validar los resultados, en estos casos se aplica el método de Validación Cruzada dejando uno fuera, el cual consiste en agrupar todos los datos que se dispone (datos de entrenamiento) y dejar un único dato fuera (dato de prueba), para predecir su magnitud, el número de interacciones depende del número (N) de datos disponibles (Cawley, 2006) según se muestra en la Figura 17. El error de Validación Cruzada es la media de los errores acorde a (Ec. 29). Para medir el ajuste de los puntos a la línea de tendencia se emplea el indicador de ajuste R^2 .

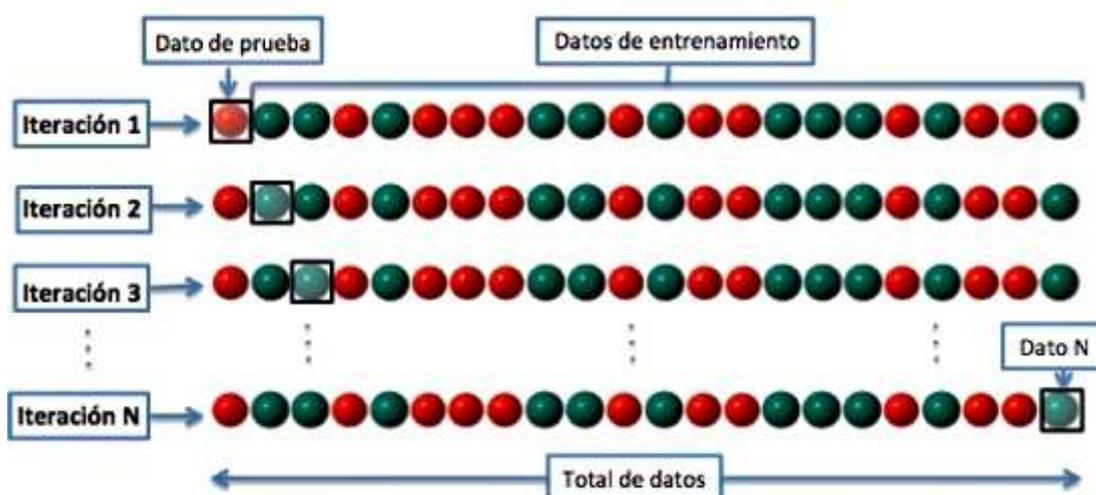


Figura 17: Validación cruzada
Fuente: El Autor.
Elaboración: El Autor.

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i \quad (\text{Ec. 29})$$

Donde:

E - Error de Validación Cruzada.

E_i - Error de Validación Cruzada, interacción i

N - Numero de Datos

i - Dato de prueba

**CAPÍTULO V:
RESULTADOS Y ANÁLISIS**

5.1. Preprocesamiento

Los resultados obtenidos en la etapa de Preprocesamiento inician con la descarga de imágenes de satélite Landsat 7, la provincia de Loja se encuentra cubierta de nubes la mayor parte del año y según los resultados obtenidos no fue posible disponer de imágenes libres de nubes. El satélite Landsat 7 posee un ciclo de 18 días, lo cual representa un total de 38 imágenes en el periodo de 2012 y 2013, donde solo 17 poseen una cobertura nubosa menor al 60% y de las cuales se seleccionó 9 imágenes que se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17: Imágenes satelitales Landsat 7

Landsat 7		
Imagen	Fecha	% Nubosidad
A	10/04/2013	22
B	22/12/2013	35
C	06/12/2013	38
D	04/11/2013	32
E	17/09/2013	23
F	17/11/2012	38
G	12/07/2012	26
H	10/06/2012	55
I	07/04/2012	41

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

De las 9 imágenes inicialmente escogidas, 3 de ellas fueron seleccionadas por tener el menor porcentaje de nubosidad sobre el área de estudio. Las imágenes seleccionadas se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18: Imágenes Landsat 7 empleadas en esta investigación.

Landsat 7	
Imagen	Fecha
1	10/04/2013
2	17/09/2013
3	10/06/2012

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

El relleno de pixeles producidos por la falla en el Corrector de Escaneo Lineal, se muestra en la Figura 18 y pertenece a la banda 6 de la Imagen 1, donde se puede observar las “franjas” de color negro, producidas error de escaneo lineal (SLC) en el satélite Landsat 7, se puede apreciar como el método de corrección radiométrica permite eliminar las franjas negras que posee la banda 6 (Figura 18 b) antes de realizar esta corrección (Figura 18 a). El mismo proceso se realiza para todas las bandas de las imágenes 1, 2 y 3.

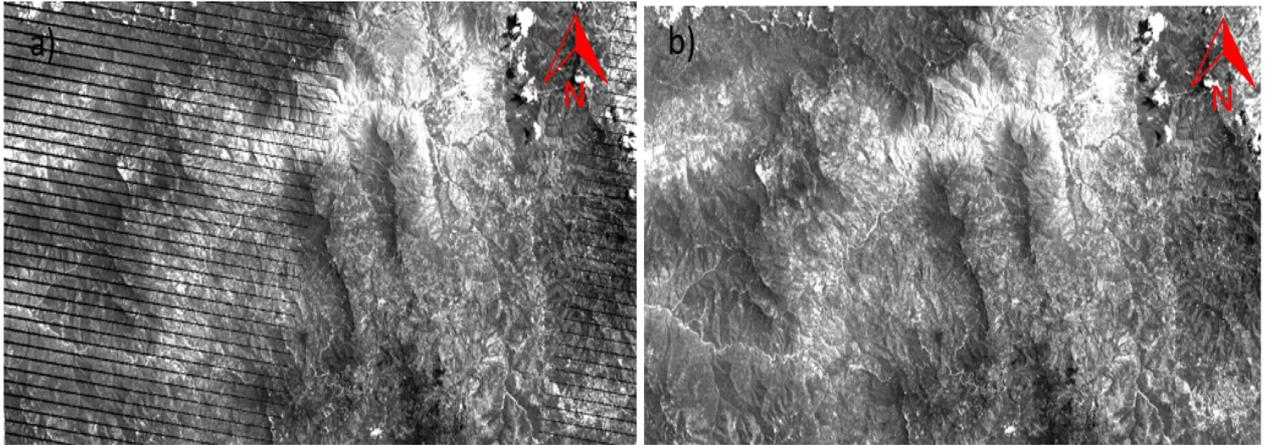


Figura 18: Imagen 1: Corrección SLC de la banda 6, a) antes de corrección y b) después de la corrección.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

EL filtro de nubes y sombras no es un proceso automático en su totalidad y a pesar de aplicar las recomendaciones propuestas por el algoritmo ACCA se generan gran cantidad de falsos positivos, por lo que el usuario debe invertir gran cantidad de tiempo en eliminar manualmente este tipo de pixeles (Contell, 2009). Hay que destacar que para la provincia no fue posible encontrar imágenes libres de nubes, por lo que las tres imágenes seleccionadas pasaron por un proceso de filtro de nubes y sombras. En la Figura 19 muestra la Imagen 1 en combinación Rojo Verde Azul (RGB): 742, los espacios dejados por nubes y sombras se muestran como “manchas” de color negro, lo cual hace que se pierda gran cantidad de información de la superficie.

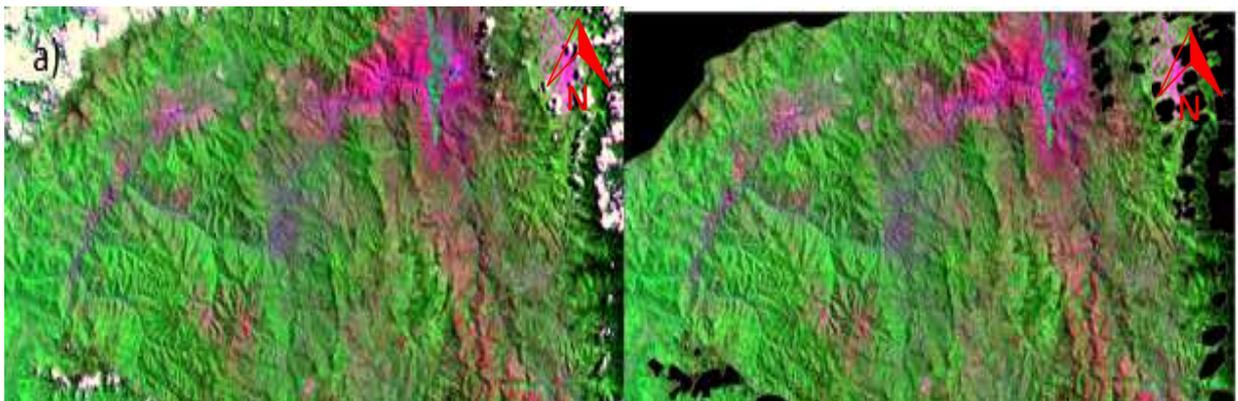


Figura 19: Filtro de nubes, a) antes del filtro ACA y b) después del filtro ACA

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

5.2. Procesamiento

EL mapa de radiancia térmica para banda 6 se muestra en la Figura 20 y se ha calculado mediante la (Ec. 2), la distribución e intensidad de la radiancia se relaciona con distribución la TS, es así que en las regiones donde se posee mayores valores de radiancia, se obtendrán

los mayores valores de TS, esto debido a que la radiancia describe la energía térmica medida por el sensor.

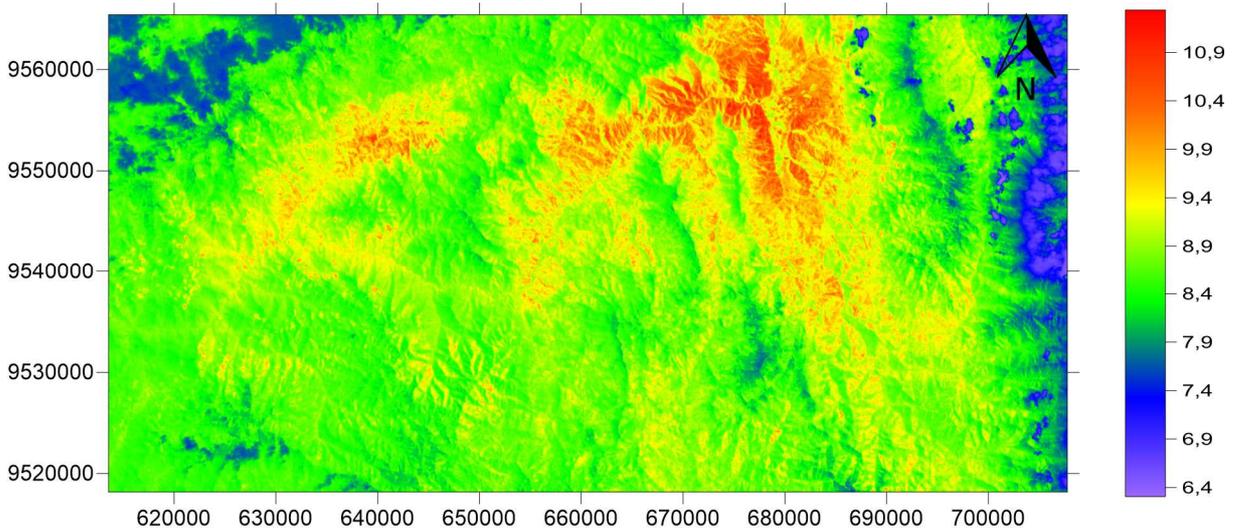


Figura 20: Mapa de radiancia, banda térmica.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

El mapa de Temperatura Aparente de Brillo (TAB), calculado a partir de los valores de radiancia mediante la (Ec. 6), se muestra en la Figura 21, posee la misma distribución de radiancia térmica, la TAB representa los valores de reflectancia térmica en el techo de la atmosfera, es decir sin tomar en cuenta los efectos de la atmosfera, de acuerdo a la gráfica los valores más altos de TAB se encuentran en el cantón Catamayo, las temperaturas más bajas se muestran en color azul y representan las nubes.

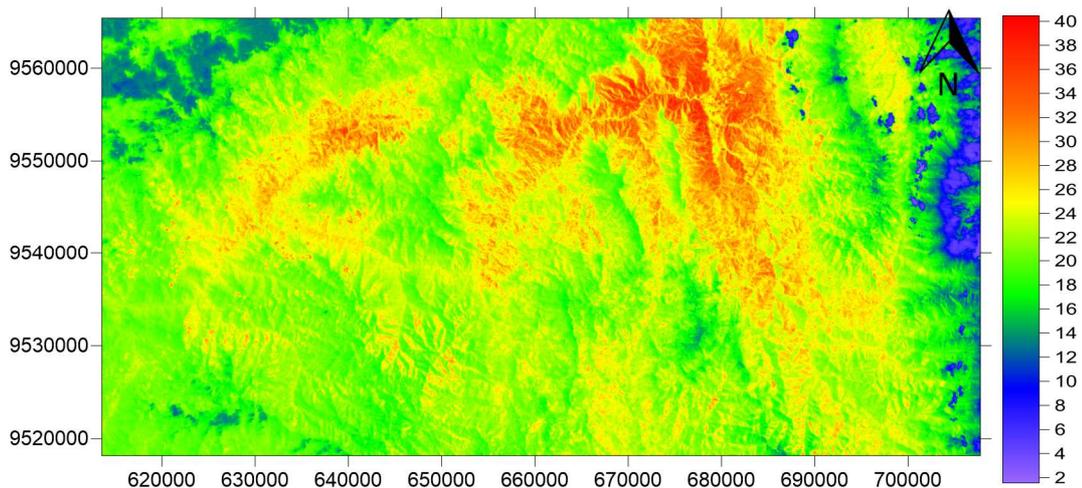


Figura 21: Mapa de TAB (°C).

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

EL mapa de NDVI de la Figura 22, representa la vigorosidad de la vegetación y se ha calculado con la (Ec. 8), los valores cercanos a 1 muestran vegetación saludable, la cual mayormente

se encuentra en la región Sur-Este del área de estudio, en los cantones: Macará, Sozoranga y Celica. Las áreas con menor NDVI cercanos a 0 representan suelos con poca o nula vegetación o afloramientos rocosos como ciertas áreas del cantón Catamayo, los valores de NDVI menores a cero representan pixeles catalogados como nube o cuerpos de agua.

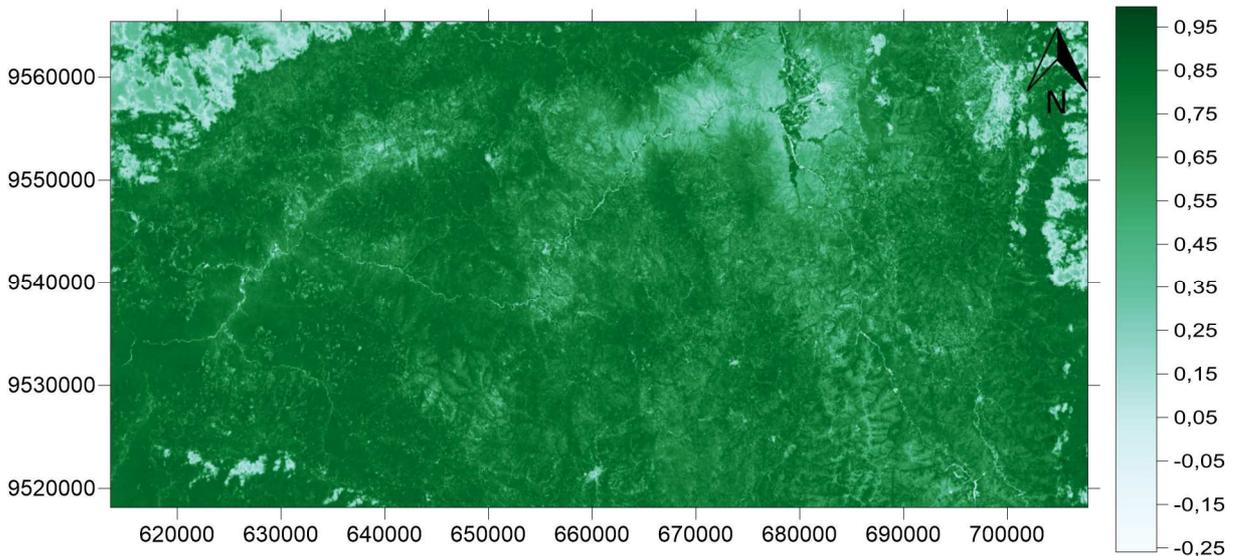


Figura 22: Mapa de NDVI
 Fuente: El Autor.
 Elaboración: El Autor.

El mapa de emisividad mostrado en la Figura 23, calculado por medio de las ecuaciones: Ec. 9, 10 y 11, según el rango del NDVI, representa la capacidad de un cuerpo para emitir radiación en comparación con un cuerpo negro, los pixeles con menor emisividad presentes en el área de estudio corresponde a pixeles relacionados a: suelo desnudo en el cantón Catamayo, nubes sobre las regiones de Loja o Puyango y cuerpos de agua a lo largo como la ribera del río Catamayo, etc. Los valores de emisividad más altos corresponden a vegetación.

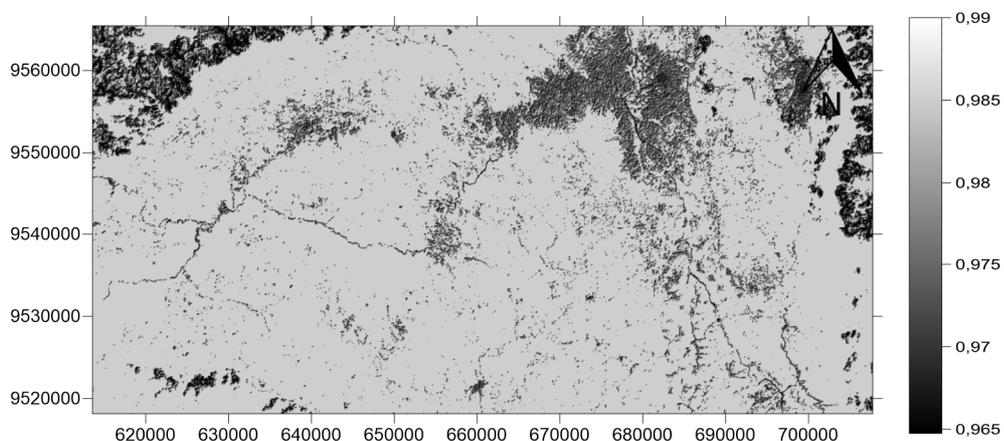


Figura 23: Mapa de Emisividad
 Fuente: El Autor.
 Elaboración: El Autor.

Para el cálculo de la TS se requiere de factores atmosféricos los cuales son: transmitancia, radiancia ascendente y radiancia descendente, obtenidos mediante la herramienta online <http://atmcorr.gsfc.nasa.gov>, estos factores son valores puntuales, calculados en cada sitio donde se posee una estación meteorológica, para que estos factores puedan ser aplicables a grandes zonas de estudio, es necesario representar su variación espacial, una solución es realizar una interpolación Kriging de cada uno de estos factores, la Figura 24 a) muestra la interpolación Kriging Ordinario para la transmitancia, sin embargo, la interpolación no considera la posible variación de este parámetro con la altura, lo cual es muy importante, sobre todo con la marcada orografía que se presenta en el área de estudio. Uno de los aportes de esta investigación, al uso de imágenes Landsat 7, consiste en correlacionar los factores atmosféricos con la altitud, tal como se demuestra en el Anexo 3, para de esta forma representar de mejor manera la variación espacial de cada uno de estos factores considerando la topografía del área de estudio, tal como se muestra en la Figura 24 b)

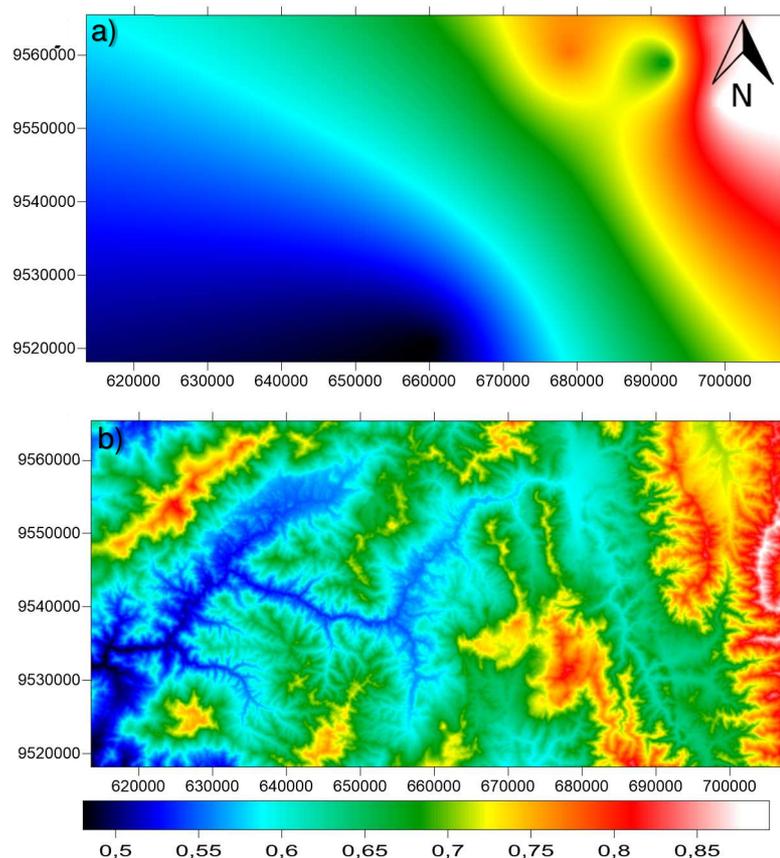


Figura 24: a) Interpolación Kriging de la Transmitancia. b) Correlación de la Transmitancia con la altitud
Fuente: El Autor.
Elaboración: El Autor.

Para obtener los mapas de cada factor atmosférico, se procede de la siguiente manera:

1. Correlacionar los valores de transmitancia, radiancia ascendente y radiancia descendente (obtenidos anteriormente mediante la herramienta web) con la altura.

2. Considerando que los factores se midieron en distintas elevaciones, se usa el gradiente calculado en el paso anterior, para idealizar la magnitud que cada factor tendría a la altura que se desea realizar la interpolación. En esta investigación se consideró una elevación 1000 msnm, se aplica la (Ec: 27).
3. Mediante el MDE y el gradiente que correlaciona los factores atmosféricos con la altura, se aplica la (Ec: 28) y se genera un mapa que representa la variación espacial de cada factor atmosférico para la zona de estudio.

Los resultados de la correlación de los factores atmosféricos se presenta en la Figura 25, aquí se puede apreciar que la radiancia ascendente (Figura 25 a) es menor que la radiancia descendente (Figura 25 b), pues esta última representa la energía que es recibida por el sensor luego de atravesar la atmosfera, la transmitancia (Figura 25 a) es menor en las partes más bajas del modelo, lo cual es algo lógico, ya que la transmitancia es la porción de radiación que puede ser transmitida a través de la atmosfera, luego de ser reflejada o absorbida.

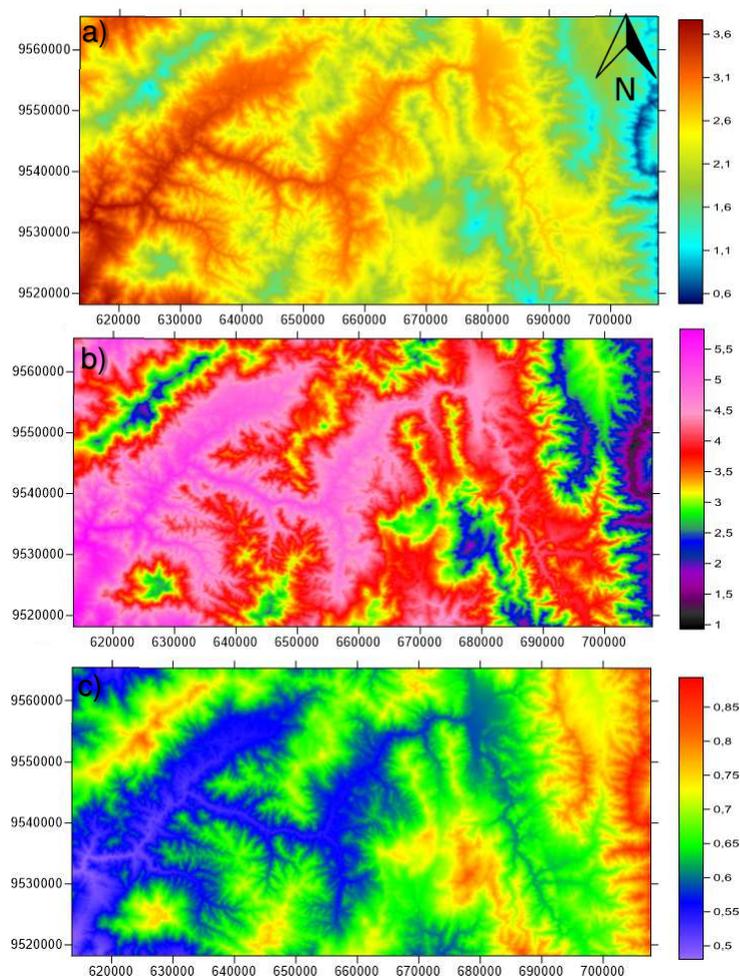


Figura 25: Mapa de factores atmosféricos: a) radiancia ascendente, b) radiancia descendente y c) Transmitancia
Fuente: El Autor.
Elaboración: El Autor.

Los mapas de TS obtenido mediante imágenes de satélite presentan una distribución de temperatura marcada, definida según el tipo de superficie que se represente en cada pixel. Si analizamos la Figura 26, podremos determinar que las temperaturas más elevadas (color naranja) se encuentran en superficies con poca o nula vegetación, las cuales se pueden identificar de color magenta, de acuerdo a la combinación RGB: 742 mostrada en la Figura 26, por otro lado las superficies con presencia de vegetación y que poseen temperatura superficial más baja, se muestran de color verde. En general la distribución de la TS condiciona la distribución de la TA.

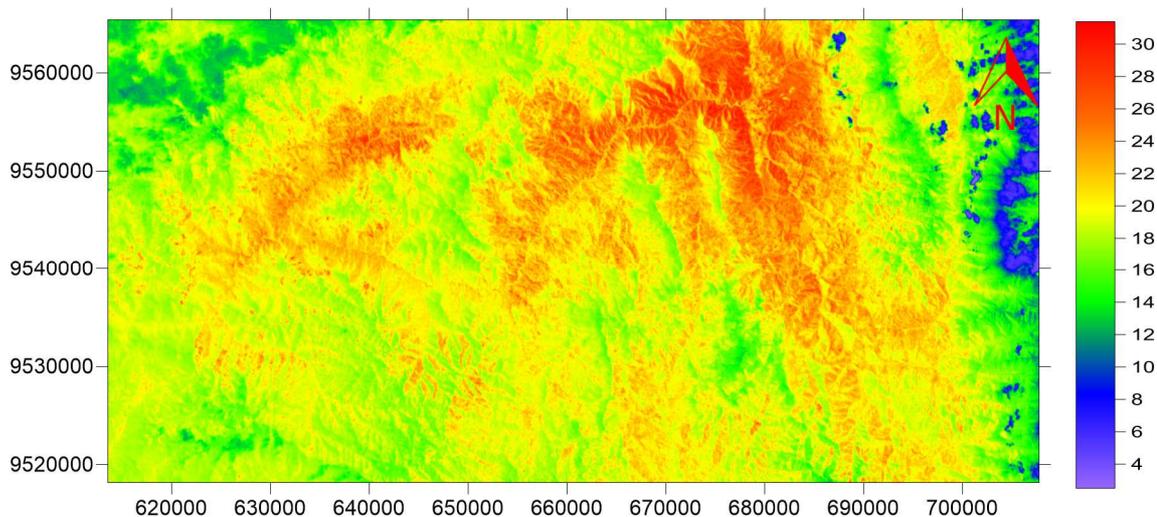


Figura 26: Mapa de TS según Artist & Carnahan

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

La Figura 27 muestra la combinación Rojo Verde Azul (RGB) 742, la cual muestra áreas urbanas y suelos desnudos en tonos rosados a magenta y praderas o pastos en color verde claro.



Figura 27: Imagen 1 en combinación RGB: 742.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

5.3. Mapa de TA mediante imágenes de satélite

Los mapas de TA obtenidos mediante imágenes de satélite, por medio de las ecuaciones de TS de Jiménez-Muñoz & Sobrino y Artist & Carnahan, se encuentran en las Figuras: 31 y 32 respectivamente, estos mapas se presentan en una escala de TA de 0 a 32°C para que puedan ser comparados entre sí.

El primer paso en el análisis de los resultados de los mapas de TA mediante imágenes satelitales, es la inspección visual de los mapas obtenidos y la comparación entre los dos algoritmos con los que se obtuvo los mapas de TS: Jiménez-Muñoz (izquierda) y Artist & Carnahan (derecha). El primer aspecto a destacar cuando se trabaja con imágenes de satélite, según se observa en la Figura 28, es las regiones “No Data” dejados por nubes, las cuales al ser eliminadas, produce que se pierda gran cantidad de información de la superficie terrestre, formándose “figuras de color negro” que representan regiones sin datos de TA, esta es una de las principales limitaciones de las imágenes satelitales para obtener una cartografía completa de la TA.

El mapa de TA según la TS de Jiménez-Muñoz, mostrada en la (Figura 28 a), presenta una mejor distribución de la temperatura respecto al de Artist & Carnahan (Figura 28 b), sin embargo en ambos modelos de TA se aprecia una subestimación de la temperatura en la partes bajas del área de estudio, perteneciente a los cantones: Celica, Sozoranga y Macará. Las regionales pertenecientes a los cantones Catamayo y Gonzanamá tienen las TA más elevadas mientras que las TA más bajas se presentan en el límite provincial entre Loja y Zamora así como en las partes más elevadas de los cantones: Gonzanamá, Platas y Calvas.

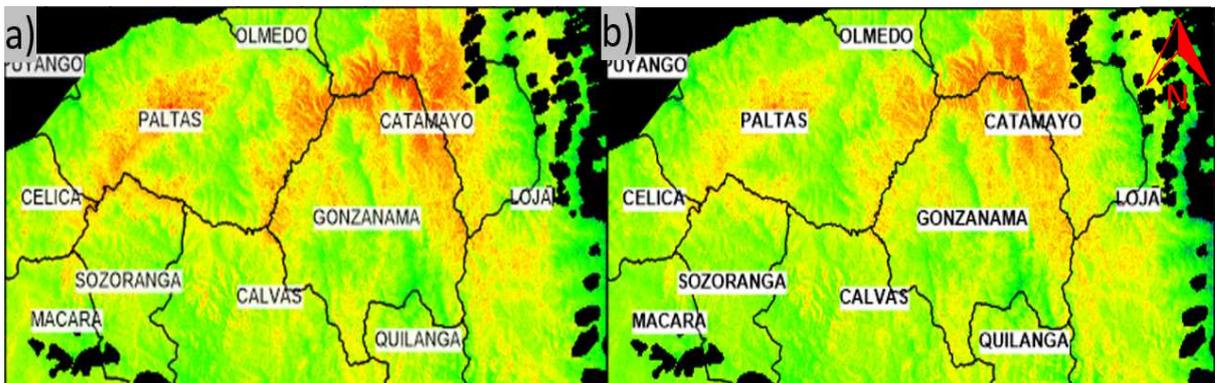


Figura 28: Mapa de TA mediante imagen de satélite. Imagen 1: 2013/04/10, según: a) Jiménez-Muñoz & Sobrino y b) Artist & Carnahan.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

Los mapas de TA de la Figura 29 muestran que la Ec. de Jiménez-Muñoz & Sobrino (Figura 29 a) permite obtener una mejor distribución de la TA, principalmente hacia las partes bajas de los cantones: Gonzanama, Paltas y Calvas, a lo largo de la trayectoria del río Catamayo, estas variaciones de TA no se encuentran bien marcadas en el mapa de Artist & Carnahan (Figura 29 b). Los mapas de TA presentan una subestimación de la TA en los cantones: Celica, Sozoranga y Macará. La zona perteneciente al cantón Catamayo visualmente presenta las mayores TA, mientras que las partes elevadas del cantón Loja presentan las menores temperaturas. En esta imagen se ha removido gran cantidad de cubierta nubosa.

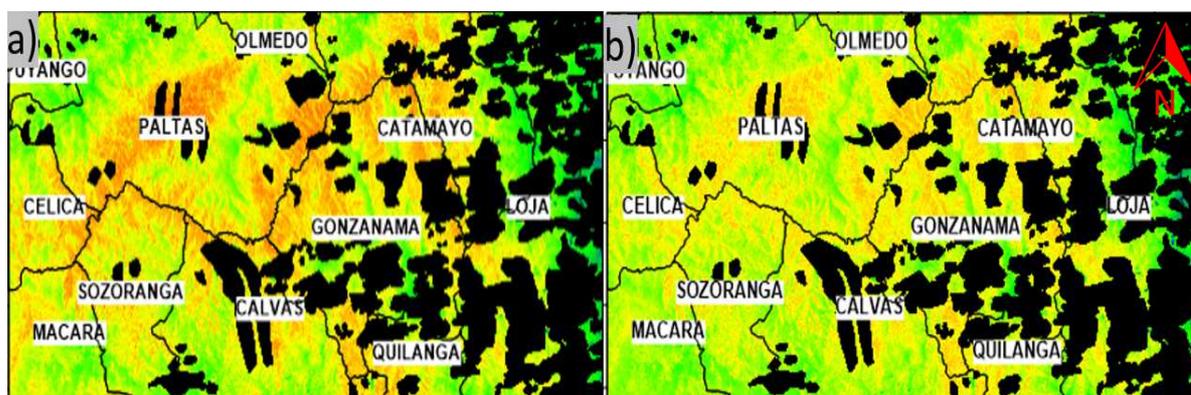


Figura 29: Mapa de TA mediante imagen de satélite. Imagen 2: 2013/9/17 según: a) Jiménez-Muñoz & Sobrino y b) Artist & Carnahan.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

Los mapas de TA de la Figura 30 permiten apreciar que la Ec. de Jiménez-Muñoz & Sobrino (Figura 30 a) claramente permite obtener una distribución de TA más marcada hacia las partes menos elevadas, respecto al mapa de Artist & Carnahan (Figura 30 b). Según la inspección visual, las partes bajas de los cantones: Paltas, Sozoranga y Calvas poseen temperaturas más elevadas, las TA más bajas se encuentran en las regiones más altas de la provincia de Loja, a lo largo del límite provincia entre Loja y Zamora.

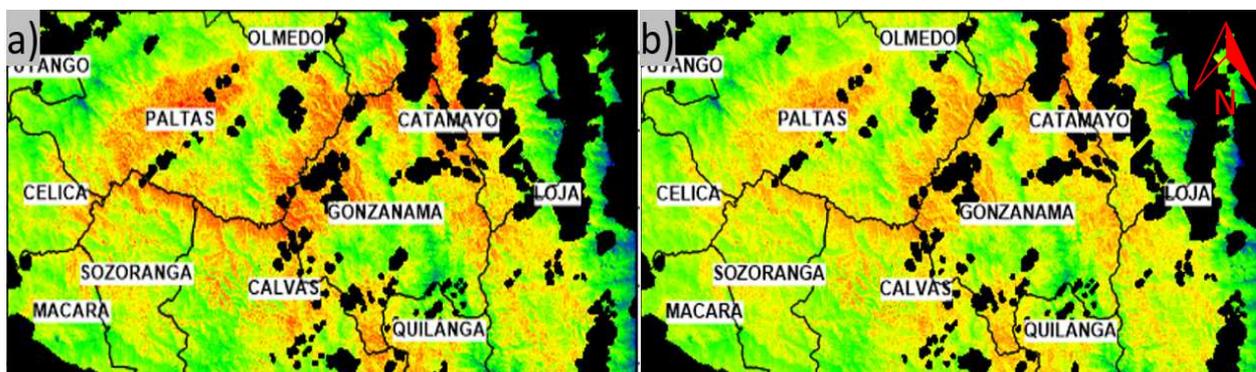


Figura 30: Mapa de TA mediante imagen de satélite. Imagen 3: 2012/6/10 según: a) Jiménez-Muñoz & Sobrino y b) Artist & Carnahan.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

De acuerdo al análisis visual realizado a los mapas de TA obtenidos mediante imágenes de satélite, la Ec. Jiménez-Muñoz & Sobrino presenta mejores resultados para modelar la TA, esto se debe a que el algoritmo de TS requiere de factores atmosféricos como: transmitancia, radiancia ascendente y radiancia descendente, las cuales pretenden modelar la contribución de la atmosférica en la radiación medida por el sensor. En forma general, la distribución de la TA es buena hacia las partes más elevadas del área de estudio, abarcando los cantones: Loja, Catamayo, Gonzanama y Quilanga. En las zonas más bajas del área de estudio, como los cantones: Paltas, Celica, Calvas, Sozoranga y Macará, existe una subestimación de la TA, debido a que se obtienen temperaturas inferiores a las esperadas de acuerdo al modelo de TA según el método de Gradiente Altitudinal, el cual se abordará más adelante.

La subestimación de la TA podría estar relacionado con el efecto de la absorción atmosférica en la radiación térmica (Jiménez, 2005), efecto que representa una de las limitaciones de los satélites Landsat, debido a que para realizar una óptima corrección atmosférica de la banda térmica, se requiere como dato de entrada valores de radiosondeos coincidentes a la hora de paso del satélite, para mediante códigos de transferencia radiativa (J. Sobrino et al., 2010), permita la obtención de parámetros atmosféricos con los que corregir los efectos de la atmosfera.



IMAGEN 1: 2013/04/10

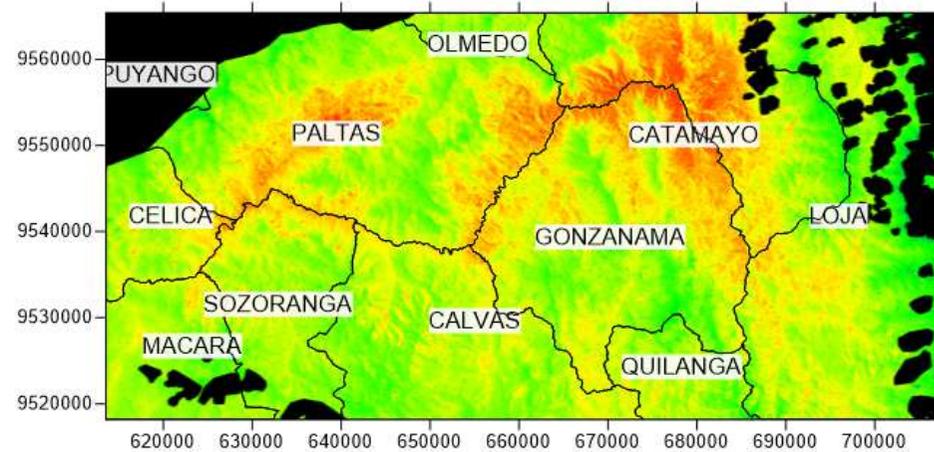


IMAGEN 2 : 2013/9/17

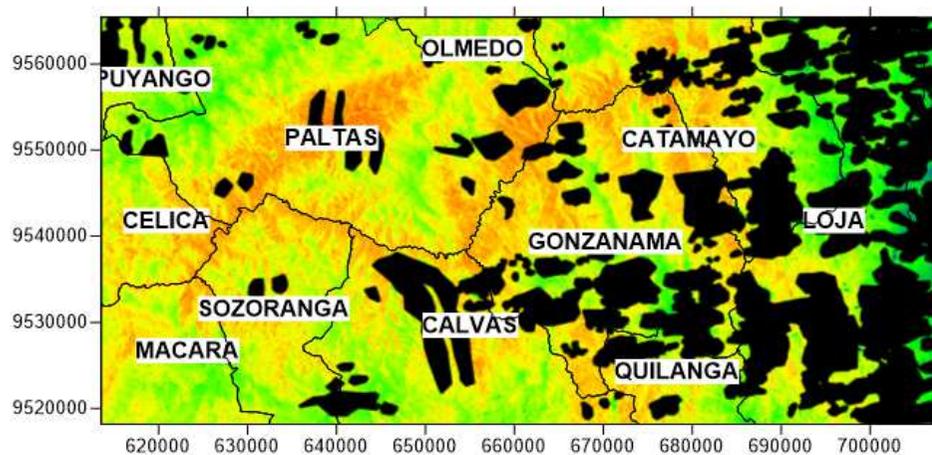


IMAGEN 3 : 2012/6/10

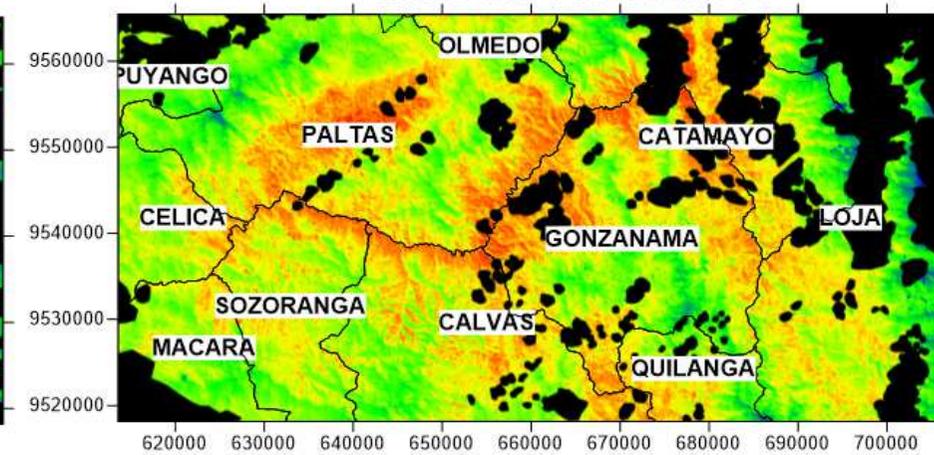


Figura 31: Mapa de TA. Ecuación de Jiménez-Muñoz & Sobrino.
 Fuente: El Autor.
 Elaboración: El Autor

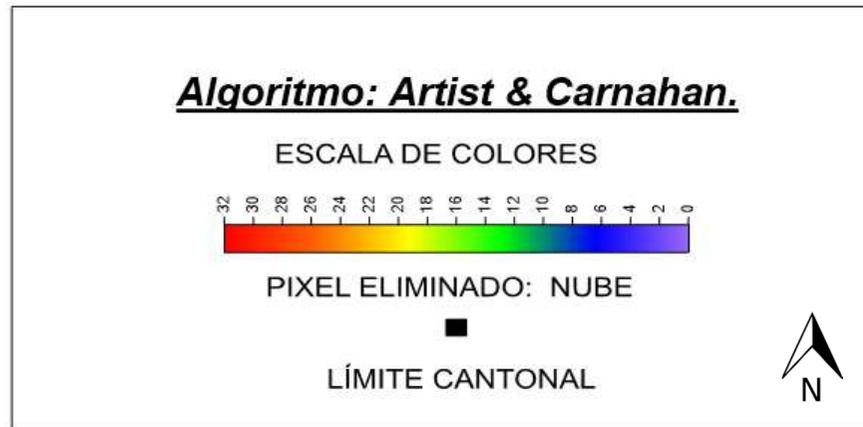


IMAGEN 1: 2013/04/10

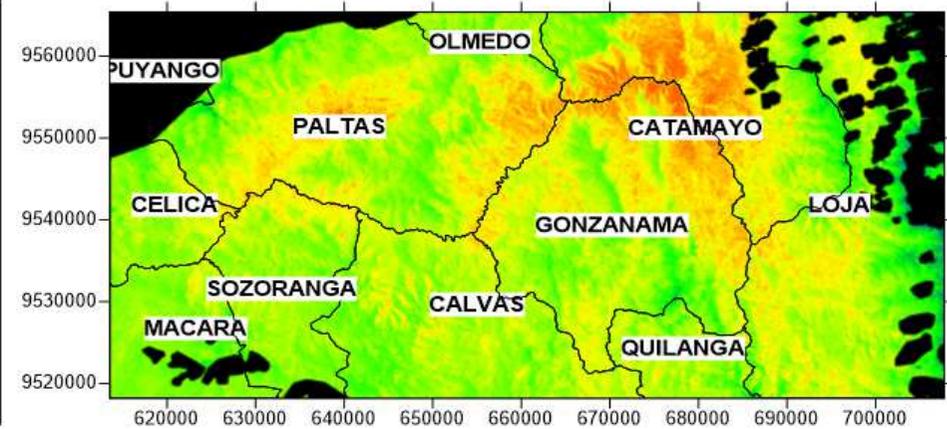


IMAGEN 2 : 2013/9/17

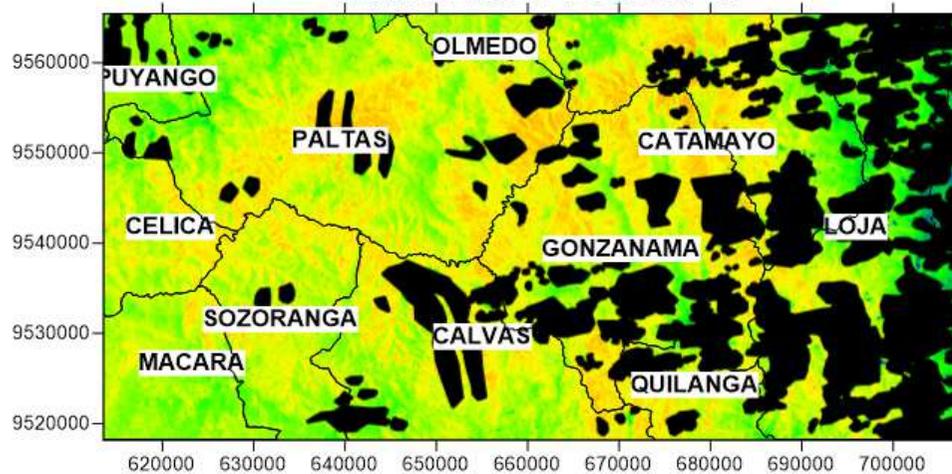


IMAGEN 3 : 2012/6/10

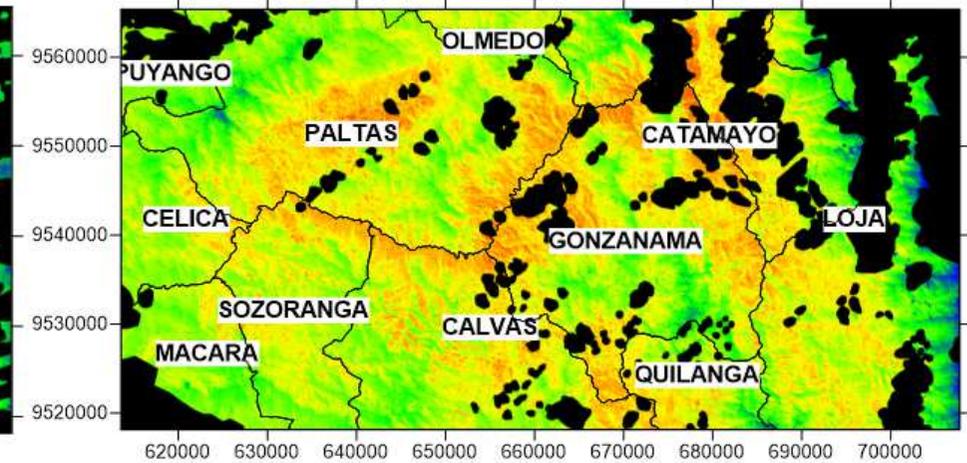


Figura 32: Mapa de TA. Ecuación de Artist & Carnahan.
Fuente: El Autor.
Elaboración: El Autor.

Los mapas de TA obtenidos mediante imágenes de satélite, pueden ser estudiados al medir la variación de la TA respecto al modelo que presente mejor ajuste, en este caso, el método de Gradiente Altitudinal. La variación calculada entre los dos modelos se denominará mapa de variación de TA. El mapa de variación no representa una medida del error en la estimación de la TA, simplemente es una comparación entre dos modelos de TA, calculados por metodologías distintas, la estimación del error se debe realizar en base a mediciones de la TA realizadas en campo. El fin que persigue el mapa de variación es examinar con mejor detalle en que zonas se tiene los mejores resultados, de acuerdo a la metodología aquí propuesta y en qué zonas no se tiene los mejores resultados, para posteriormente plantear alternativas que me permitan mejorar estos resultados en futuras investigaciones.

Los Mapas de variación de TA mostrados en las Figuras 33 y 34 muestra que la variación en la estimación de la TA poseen cierta relación con la altura, se observa como esta variación se incrementa hacia las partes más bajas del área de estudio, en cantones como: Celica, Sozoranga y Macará y partes de Paltas y Calvas, donde existe una subestimación de la TA por parte de las imágenes de satélite, mientras que a partir una altura aproximada a los 1500 msnm, el mapa de variación de TA en su mayoría está dentro del rango cercano $\pm 2^{\circ}\text{C}$, existiendo sobrestimaciones de TA solo en puntos específicos donde la TS es elevada, en general las regiones con alturas superiores a 1500 msnm tienen resultados cercanos a los $\pm 2^{\circ}\text{C}$, similares a estudios realizados con imágenes NOAA-AVHRR y MODIS, los cuales son los que presentan mejores resultados en el modelo de la TA (Cristóbal et al., 2005) ya que dada su menor resolución espacial, obtienen variaciones de TA aproximadas a $\pm 2.2^{\circ}\text{C}$ (Recondo & Pérez-Morandeira, 2002), por lo que la investigación realizada constituye un gran avance para la obtención de TA mediante imágenes de satélite de alta resolución como Landsat.

La relación entre la altura y la variación de TA (Figuras 33 y 34) permite inferir que el fenómeno de la subestimación de la TA en las imágenes de satélite, puede ser explicado considerando el efecto que tiene la atmosfera sobre la radiación electromagnética. La atmosfera interactúa con la radiación: absorbiéndola, dispersándola y reflejándola (Jiménez, 2005), es por esto que la radiación solar se incrementa con la altura, dado que a mayor altura, menor es la capa de atmosfera que la radiación tiene que atravesar, y por tanto, menor radiación es absorbida. Este efecto se puede apreciar en las Figura 26 y 27, mientras más cercano este el suelo al nivel del mar, mayor será la distancia que tiene que recorrer la radiación, desde la superficie terrestre hasta llegar al sensor del satélite y por lo tanto, mayor será la incertidumbre para que el sensor pueda estimar la radiación real emitida por el suelo y con ello la temperatura.

MAPA DE VARAIACIÓN



IMAGEN 1: 2013/04/10

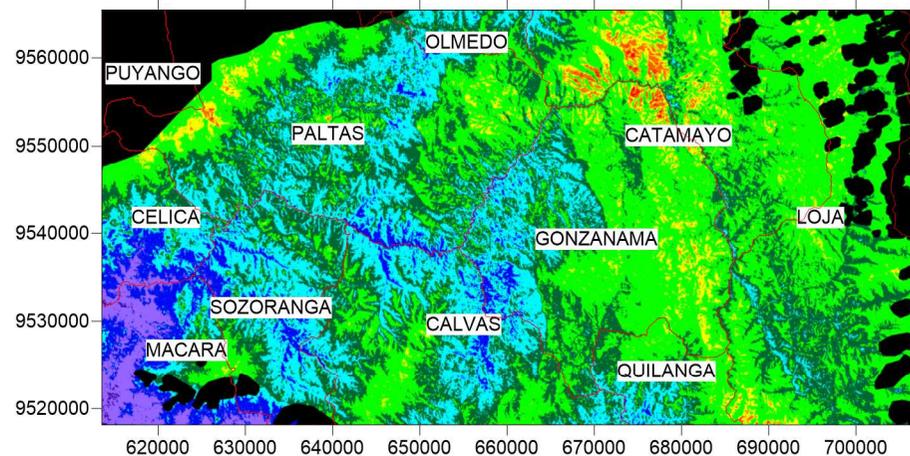


IMAGEN 2 : 2013/9/17

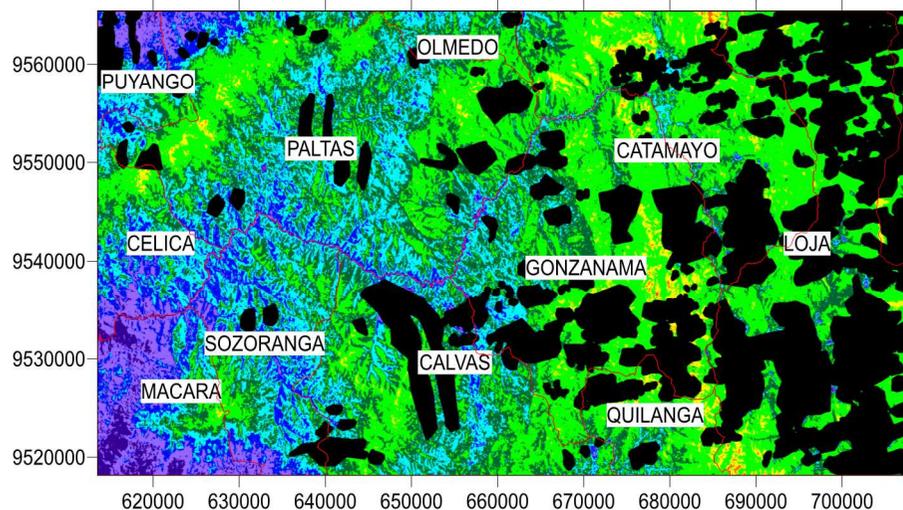


IMAGEN 3 : 2012/6/10

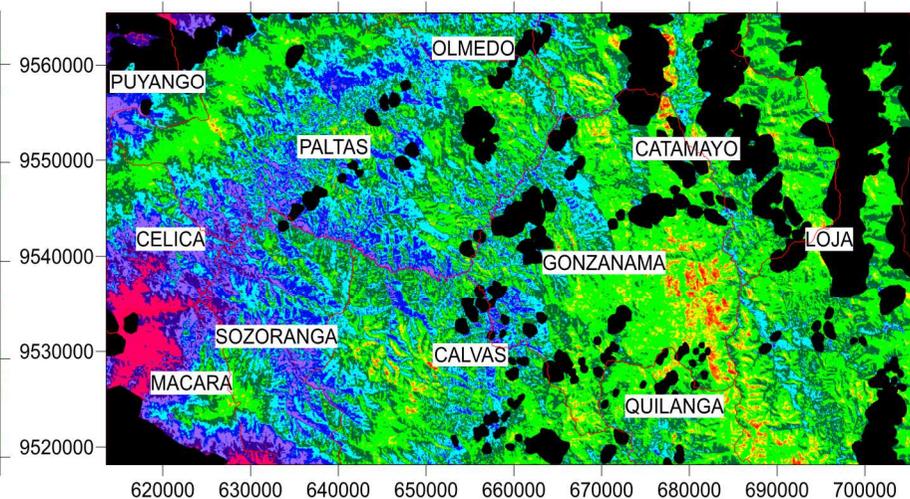


Figura 33: MDE vs Mapa de variación de TA según Jiménez-Muñoz & Sobrino

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

MAPA DE VARIACIÓN

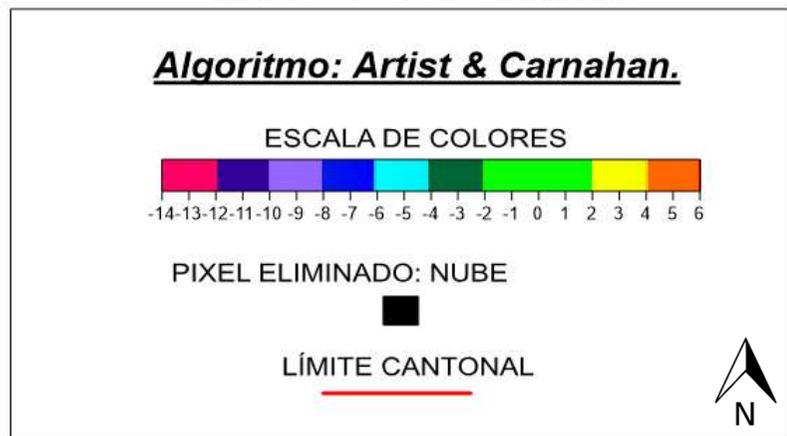


IMAGEN 2 : 2013/9/17

IMAGEN 1: 2013/04/10

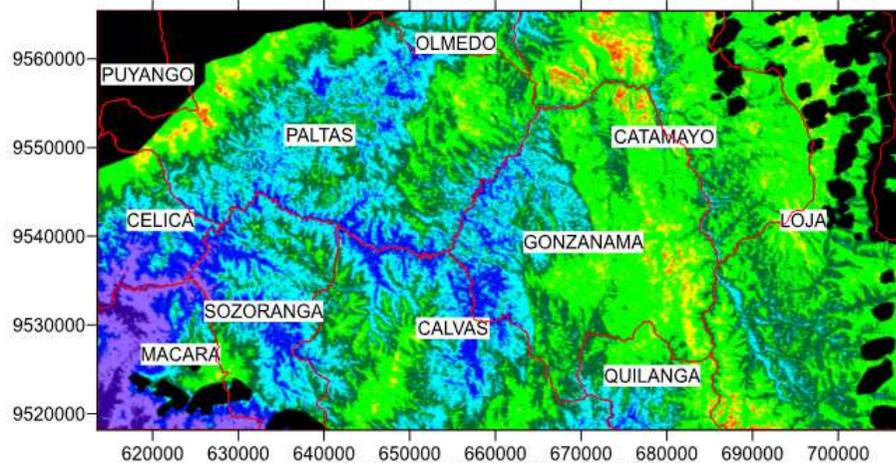


IMAGEN 3 : 2012/6/10

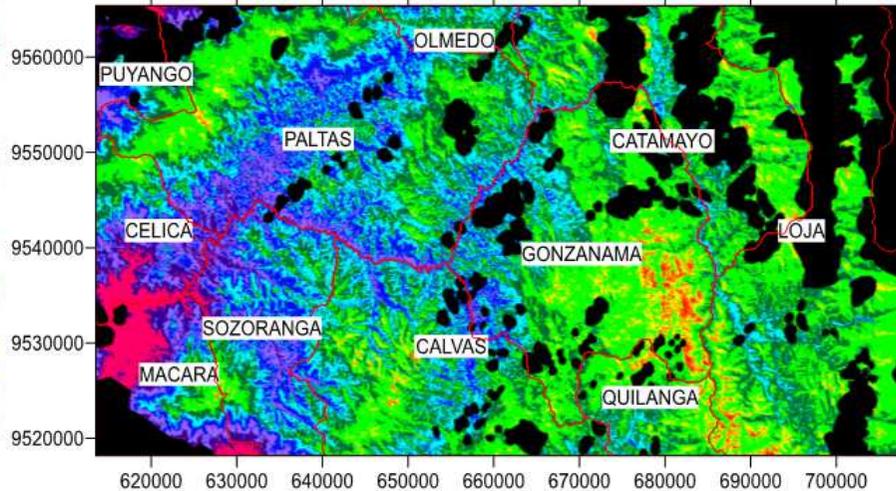
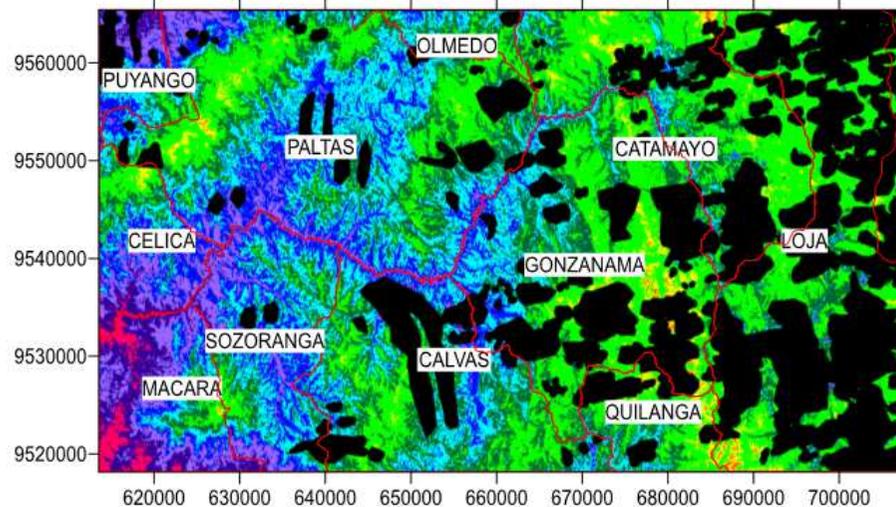


Figura 34: Relación entre el MDE y el Mapa de variación de TA según Artist & Carnahan.
Fuente: El Autor.
Elaboración: El Autor.

5.4. Validación de resultados

Una de las limitantes de la presente investigación en cuanto a la estimación del error de la TA es que las estaciones climatológicas están distribuidas de forma irregular en el área de estudio, por lo que existen grandes zonas en las que no se dispone de información, principalmente en las partes más bajas del área de estudio, ya que las estaciones están ubicadas en alturas mayores a los 1200 msnm y las áreas más bajas del terreno llegan hasta los 500 msnm, donde existe una subestimación de la TA. La correlación obtenida entre la TS y TA es satisfactoria, en la Tabla 19 se puede identificar que la Ec. Jiménez-Muñoz & Sobrino presenta un $R^2=0.82$ frente a Ec. de Artist & Carnahan $R^2=0.77$, el error de Validación Cruzada es de $\pm 1.77^\circ\text{C}$ y $\pm 1.93^\circ\text{C}$ respectivamente. Un resumen más detallado se encuentra en el Anexo 1, Tablas: 23, 24 y 25

Tabla 19: Correlación entre TS vs TA.

Imagen	Fecha	R ² (TS vs TA)		Error VC (°C)	
		Ec. Sobrino	Ec. Artist	Ec. Sobrino	Ec. Artist
1	2013/04/10	0.83	0.73	± 1.25	± 1.64
2	2013/9/17	0.81	0.8	± 1.76	± 1.73
3	2012/6/10	0.83	0.78	± 2.3	± 2.42
Promedio		0.82	0.77	± 1.77	± 1.93

Fuente: El Autor.
Elaboración: El Autor.

5.5. Mejoras en el modelo de la TA mediante imágenes satelitales.

Uno de los aportes al modelo de la TA mediante imágenes Landsat 7, generados en esta investigación, se basa en que las imágenes satelitales de gran resolución, en este caso 30x30m (Figura 35,a), la TS obtenida es muy variable a lo largo de la superficie (Figura 35, b), por lo que al correlacionar la TS de un pixel específico con la TA de una zona, se está obviando el hecho de que la TA de una zona es producida por el efecto conjunto de los pixeles de TS de dicho sector, es así que en esta tesis se propone una nueva metodología para el cálculo de la TA, la cual permite mejorar la precisión de los mapas de TA mediante imágenes satelitales de alta resolución (Landsat 7). La mejora propuesta se basa en generar dos mapas de TS: uno con resolución de 30x30m y otro de 120x120m, este último se obtiene promediando los pixeles de TS, tal como se muestra en la Figura 35 c) y servirá para generar la ecuación de TA, finalmente aplicamos esta ecuación de TA al mapa de TS que posee una resolución de 30x30m. Lo que ganamos con esto es que creamos una ecuación de TA mediante una TS más representativas de una región y lo más importante es que no perdemos la resolución inicial de 30m.

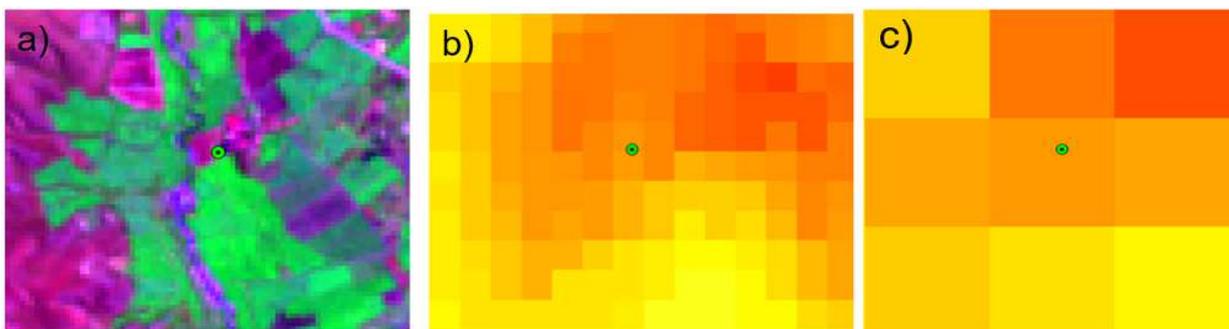


Figura 35: a) Imagen RGB: 742, mapa de TS con resolución de: b) 30m y c) 120m.
Fuente: El Autor.
Elaboración: El Autor.

Las mejoras en el modelo de la TA mediante imágenes de satélite propuestas en el este apartado, se han aplicado a las 3 imágenes Landsat 7 disponibles, empleando el algoritmo de Artist & Carnahan para el cálculo de la TS. Como paso previo a realizar la validación de los resultados obtenidos mediante la metodología propuesta, se procede a realizar un análisis visual de los mapas obtenidos con esta metodología. Para apreciar mejor las variaciones de TA antes y después de aplicadas las mejoras, se han eliminado temporalmente las etiquetas y límites cantonales de los mapas de TA.

La Figura 36 b) muestra que se ha acentuado la distribución de la TA en la región correspondiente al cantón Paltas y la región sur del cantón Gonzanama, en general las temperaturas presentan un patrón más definido al mapa de TA mostrado en la Figura 36 a).

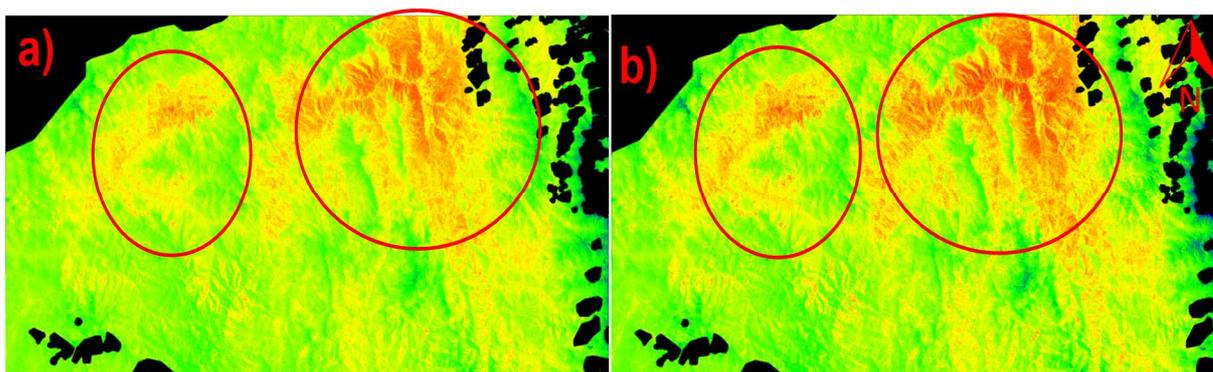


Figura 36: Imagen 1. Mejora en el modelo de la TA, a) antes y b) después.
Fuente: El Autor.
Elaboración: El Autor.

En la Figura 37 b) se parecía que se ha mejorado la distribución de la TA en las partes menos elevadas del modelo, con lo que existe un mejor contraste de temperaturas en todo el mapa, principalmente en el cantón Catamayo y la parte baja comprendida entre los cantones: Paltas, Celica y Sozoranga, estos patrones de TA son más realistas acorde a la topografía del terreno y no son apreciablemente visibles en la Figura 37 a).

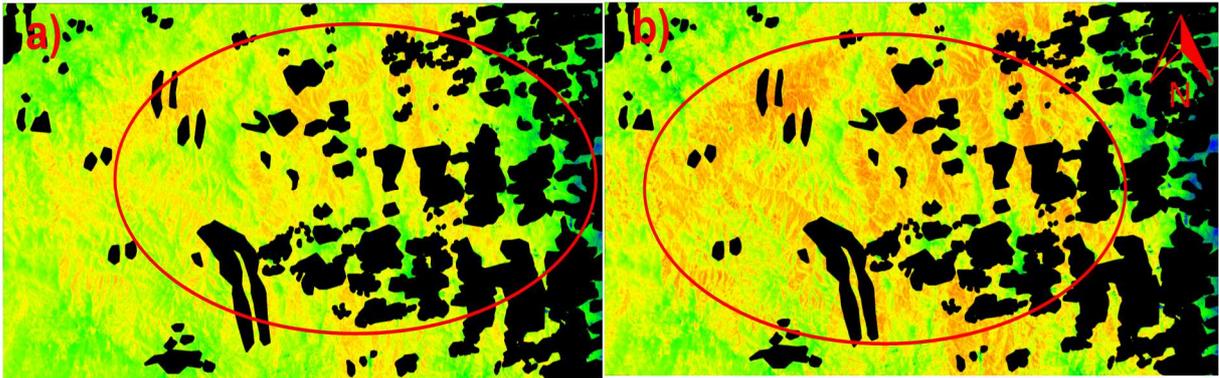


Figura 37: Imagen 2. Mejora en el modelo de la TA, a) antes y b) después.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

El mapa de TA mostrado en la Figura 38 b) se aprecia una clara mejoría en la distribución espacial de la TA, se puede visualizar que aparecen zonas con temperaturas más acentuadas que no se mostraban en el modelo inicial (Figura 38 a), principalmente hacia las partes más bajas del área de estudio, a lo largo de la trayectoria del río Catamayo, donde se esperarían temperaturas más altas.

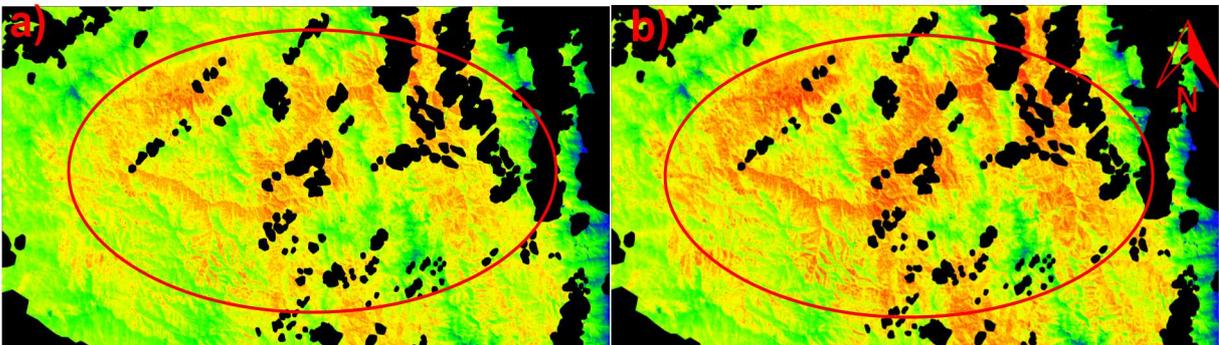


Figura 38: Imagen 3. Mejora en el modelo de la TA, a) antes y b) después.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

Para cuantificar matemáticamente la mejora obtenida en los mapas de TA mediante imágenes satelitales, se aplicó el método de validación cruzada, los resultados indican que la metodología propuesta permite incrementar el R^2 de un promedio de 0.77 a 0.88, con lo que el error de validación cruzada en la TA se redujo de un promedio de $\pm 1.93^\circ\text{C}$ a $\pm 1.58^\circ\text{C}$, tal como se puede apreciar en la Tabla 20. El cálculo detallado de la correlación R^2 y validación cruzada para cada imagen se puede encontrar en el Anexo 4.

Tabla 20: Mejoras en el modelo de la TA. Correlación entre TS vs TA.

		Artist & Carnahan			
		R² (TS vs TA)		Error TA (°C)	
Imagen	Fecha	TS:30m	TS:120m	TS: 30m	TS:120m
1	2013/04/10	0.73	0.86	±1.64	±1.17
2	2013/9/17	0.80	0.90	±1.73	±1.47
3	2012/6/10	0.78	0.87	± 2.42	±2.11
Promedio		0.77	0.88	±1.93	±1.58

Fuente: El Autor.
Elaboración: El Autor.

Finalmente la Figura 39 muestra los mapas de TA obtenidos acorde a la metodología propuesta al inicio de este apartado y como se ha podido demostrar, representa una alternativa para mejorar la precisión de los mapas de TA mediante imágenes de satélite Landsat 7.

IMAGEN: MEJORAS EN EL MODELO DE LA T.A.



IMAGEN 1: 2013/04/10

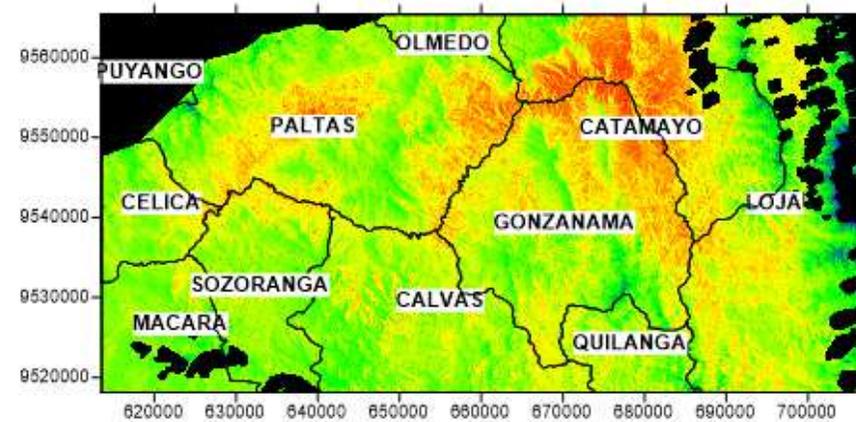


IMAGEN 2 : 2013/9/17

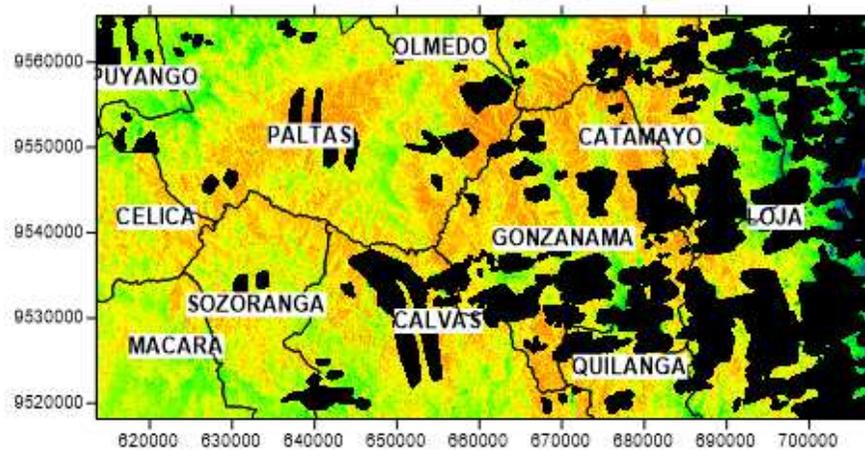


IMAGEN 3 : 2012/6/10

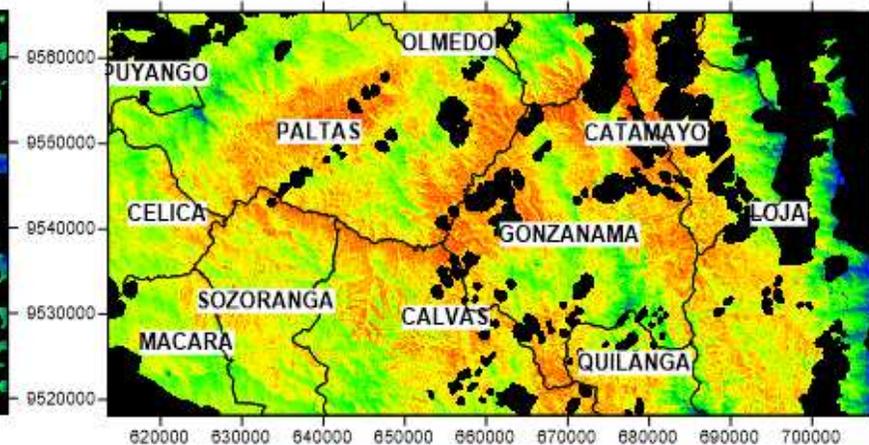


Figura 39: Mejoras en el modelo de la TA mediante imágenes Landsat7.
Fuente: El Autor.
Elaboración: El Autor.

5.6. Fuentes alternativas para obtener mapas de TS

Uno de los objetivos que persigue esta investigación es proponer metodologías alternativas al uso de imágenes de satélite para obtener mapas de TA, los cuales de acuerdo a los datos disponibles se propone las siguientes metodologías: interpolación espacial Kriging Ordinario y método de Gradiente Altitudinal, metodologías que han sido abordadas en el Capítulo I.

5.6.1. Mapa de TA. Método interpolación Kriging Ordinario.

El método de interpolación mediante Kriging Ordinario mostrado en la Figura 40 muestra la variación espacial de la TA, donde se puede apreciar que el cambio de la TA es progresivo y está sujeta a la distribución espacial de los datos, obteniendo mayor detalle donde los puntos están más agrupados y generando incertidumbre en espacios donde se dispone de uno o ningún valor (Bustamante, 2003) por lo que no se puede apreciar la distribución de los diferentes pisos climáticos que posee la provincia de Loja, los cuales están definidos en función de la topografía.

La validación del método de interpolación Kriging Ordinario se encuentra detallado en el Anexo 1, Tabla 29 y se resume en la Tabla 21, donde el error promedio calculado a partir de las estaciones climatológicas es de $\pm 3.59^{\circ}\text{C}$, por lo que el modelo de interpolación es poco realista para el área de estudio ya que la topografía del terreno es muy accidentada y la altitud es un factor de peso que no se está considerado en este modelo.

Tabla 21: Correlación entre TS vs TA.

Método Kriging Ordinario VALIDACION CRUZADA		
Imagen	Fecha	Error TA (TA °C)
1	2013/04/10	± 2.90
2	2013/9/17	± 3.60
3	2012/6/10	± 4.27
Promedio		± 3.59

Fuente: El Autor.
Elaboración: El Autor.



IMAGEN 1: 2013/04/10

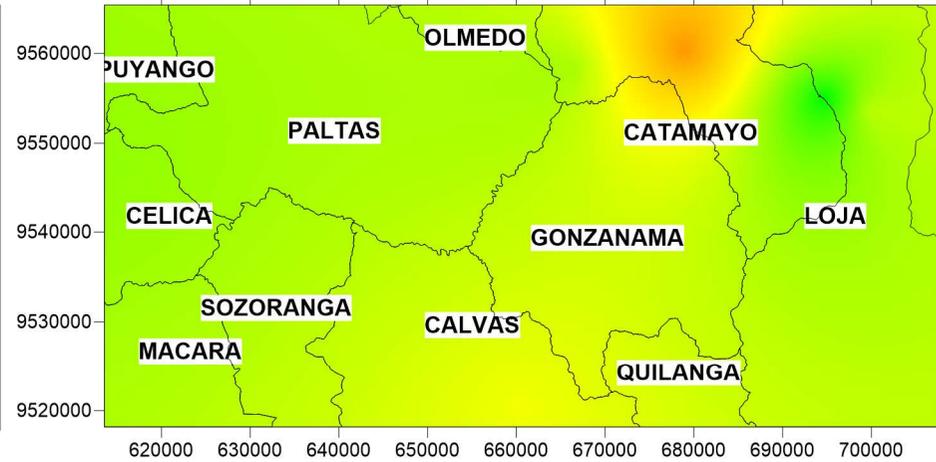


IMAGEN 2 : 2013/9/17

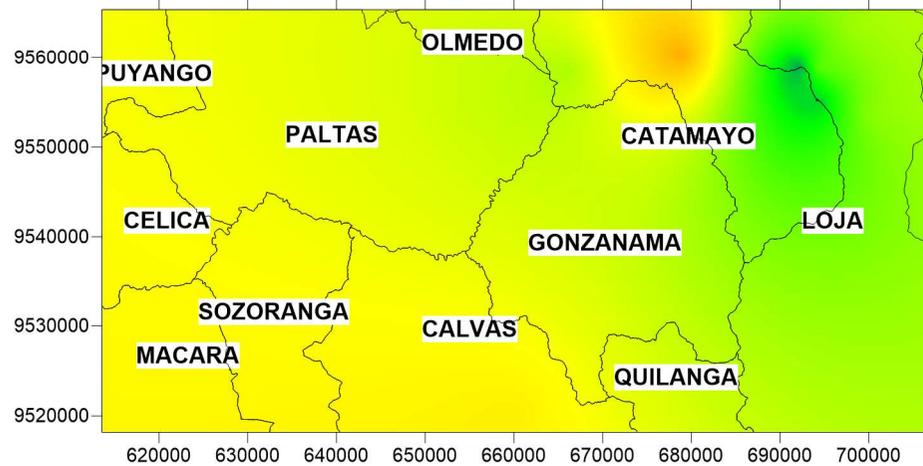


IMAGEN 3 : 2012/6/10

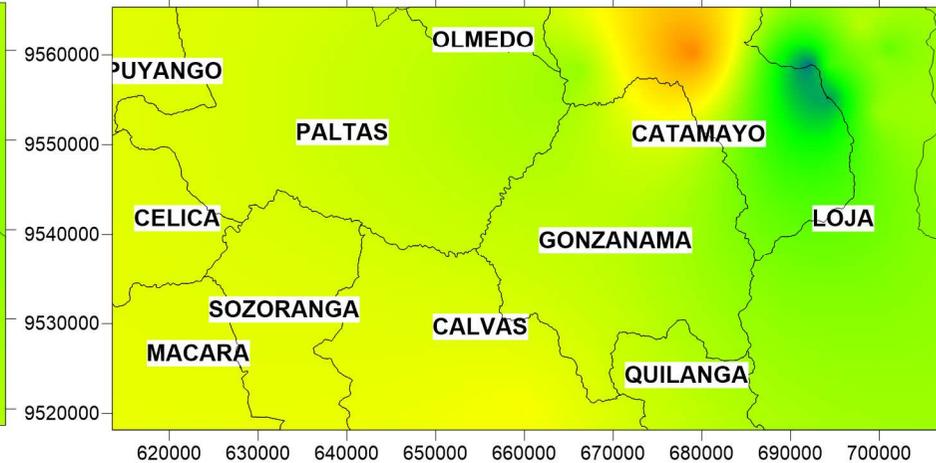


Figura 40: Mapa de TA. Método de Interpolación Kriging Ordinario.
Fuente: El Autor.
Elaboración: El Autor.

5.6.2. Mapa de TA. Método Gradiente Altitudinal.

El método de Gradiente Altitudinal se basa en relacionar la temperatura de un punto específico con la altura que este posee, la Figura 41 muestra la distribución espacial de la TA generada mediante el método de Gradiente Altitudinal, como se puede apreciar la variación espacial de la TA está regida por la topografía del terreno y varía de manera progresiva ya que responde a un gradiente altitudinal, el cual para la provincia de Loja es de 6.5°C por cada 1000 msnm aproximadamente, cuya temperatura se incrementa de Este a Oeste, hacia las partes más bajas del terreno.

De acuerdo al método de Gradiente Altitudinal mostrado en la Figura 41, las temperaturas más bajas se encuentran en la provincia de Loja, en los meses junio y septiembre correspondiente a las imágenes 3 y 2 respectivamente, estas temperaturas se ubican aproximadamente en alturas mayores a los 3000 msnm y de acuerdo a la Tabla 15, corresponde al clima sub-templado a frío, con temperaturas menores a 10°C (color azul). Las partes elevadas de los cantones de Loja, Gonzanama, Paltas y Calvas poseen clima templado ya que las temperaturas están comprendidas entre 12 a 18°C (color verde claro). Las temperaturas más altas se muestran en la región sector sur-oeste del área de estudio, en los meses junio y septiembre correspondiente a las imágenes 3 y 2 respectivamente, estas temperaturas se registran en alturas inferiores a los 1000 msnm aproximadamente, con temperaturas mayores a 22°C (color naranja-rojizo), por lo que corresponde al clima tropical y abarca parte de los cantones: Macará, Sozoranga, Celica, Paltas, Calvas y Gonzanama, en su mayor parte siguiendo la trayectoria del Río Catamayo.

El modelo de TA mediante el método de Gradiente Altitudinal es bastante aproximado a la realidad ya que la correlación entre la TA y la altitud es elevada, tal como se demuestra en el Anexo 2 en Figura 42. La Tabla 22 muestra que la correlación entre A y TA es alta, con un promedio $R^2 = 0.95$ y un error de $\pm 0.72^\circ\text{C}$, por lo cual es de esperar que las mejores predicciones de TA se obtengan a partir de la ecuación generada por esta correlación. El cálculo detallado de la validación cruzada aplicada a esta metodología se encuentra en el Anexo 1 en las Tablas: 26, 27 y 28.

Tabla 22: Correlación entre A y la TA

Imagen	Fecha	R ² (A vs TA)	Error TA (°C)
1	2013/04/10	0.96	± 0.50
2	2013/9/17	0.93	± 1.09
3	2012/6/10	0.95	± 0.57
Promedio		0.95	± 0.72

Fuente: El Autor
Elaboración: El Autor



IMAGEN 1: 2013/04/10

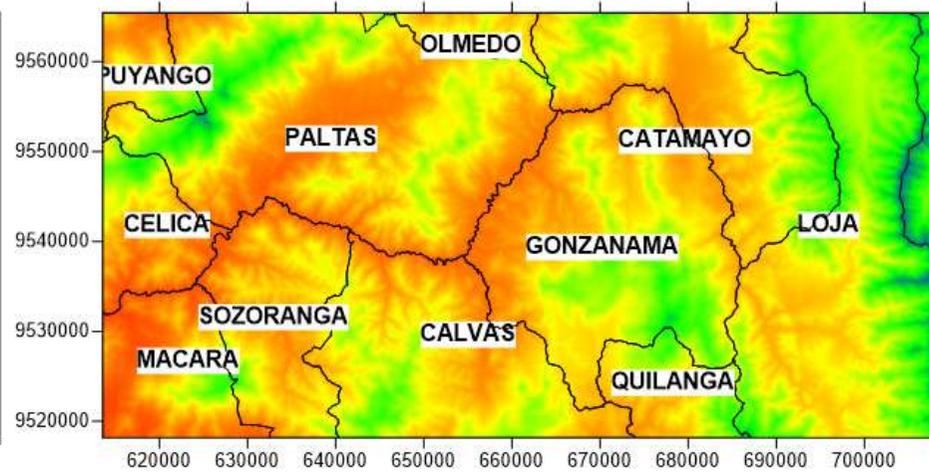


IMAGEN 2 : 2013/9/17

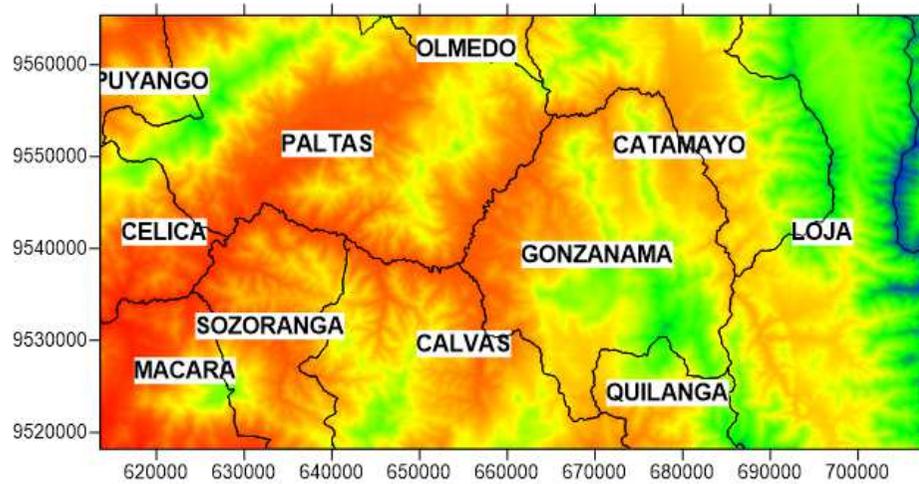


IMAGEN 3 : 2012/6/10

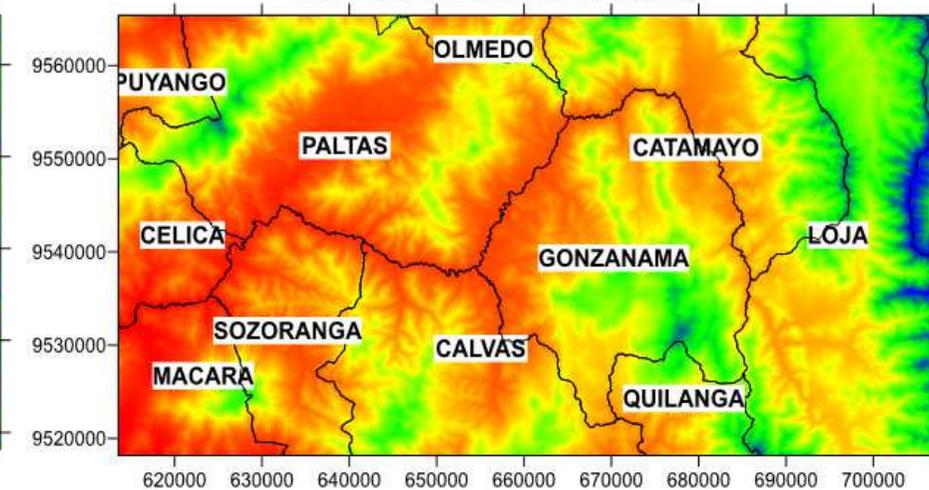


Figura 41: Mapa de TA. Método de Gradiente Altitudinal.
Fuente: El Autor.
Elaboración: El Autor.

CONCLUSIONES

Las conclusiones que se muestran a continuación, se basan en el análisis de mapas de TA mediante imágenes de satélite y responden al cumplimiento de los objetivos planteados al inicio de esta investigación los cuales son: usar imágenes de satélite para la obtención de variables como TA, evaluar los resultados obtenidos mediante imágenes de satélite y determinar otras fuentes donde se puedan obtener mapas de TA. Al finalizar la investigación las conclusiones a las que se ha llegado son las siguientes:

- La presente investigación demuestra que es posible obtener mapas de TA a partir de imágenes de satélite Landsat 7. Los mapas de TA indican que las zonas bajas no se modelan adecuadamente mientras que en las altas se obtiene una buena precisión, esto se debe a que el uso de imágenes del satélite Landsat 7, por sí solo no representan una herramienta totalmente operativa para el cálculo de la TS (Cogliati, 2011), principalmente en zonas de montaña, ya que para realizar una óptima corrección atmosférica de la banda térmica, se requiere como dato de entrada valores de radiosondeos coincidentes a la hora de paso del satélite, para mediante códigos de transferencia radiativa (J. Sobrino et al., 2010), permita la obtención de parámetros atmosféricos con los que corregir los efectos de la atmósfera. Aunque existen aproximaciones a estos factores con el vapor de agua atmosférico (Hantson et al., 2011), este parámetro es calculado mediante satélites como NOAA-AVHRR o MODIS, los cuales presentan los mejores resultados en predicciones de la TA (Cristóbal et al., 2005), por esto es recomendable emplearlos directamente en caso de estudios a gran escala, donde no se requiere alta resolución. Como solución alternativa al uso de radiosondeos y al de vapor de agua atmosférico, se empleó el aplicativo web desarrollado por Barsi et al., (2005) el cual permite la obtención de estos factores atmosféricos y cuyo fin es viabilizar el uso de imágenes Landsat. En general, la principal desventaja en el uso de imágenes de satélite, es la presencia de nubes, lo cual oculta gran parte de la superficie terrestre y provoca la pérdida de información de temperatura, algo que se ve reflejado en los mapas de TA obtenidos para la provincia de Loja, la misma que se encuentra cubierta de nubes la mayor parte del año, por lo que en las imágenes Landsat 7 disponibles en el periodo de estudio 2012 y 2013, fue imposible adquirir imágenes totalmente libres de nubes.

- Evaluando los mapas de TA obtenidos mediante imágenes satelitales, se determinó que los algoritmos monocanal empleados para el cálculo de TS permiten obtener una buena correlación entre la TS y TA, se estableció que la ecuación de TS Jiménez-Muñoz & Sobrino brinda una mejor correlación que la ecuación de Artist & Carnahan, con R^2 de 0.82 y 0.77 respectivamente, tal como se muestra en la Tabla 19, donde también se muestra el resumen del análisis de validación cruzada, con un error medio de $\pm 1.77^\circ\text{C}$ en la predicción de la TA según la ecuación de Jiménez-Muñoz & Sobrino, frente a $\pm 1.93^\circ\text{C}$ de Artist & Carnahan. Los resultados presentados no son definitivos, ya que pueden ser mejorados mediante la aplicación de una nueva metodología explicada en el apartado 5.5, la cual constituye el aporte de esta investigación al modelo de la TA mediante imágenes satelitales Landsat 7. La funcionalidad de esta metodología ha sido probada en los mapas de TS de Artist & Carnahan, con lo que se ha podido incrementar el valor de R^2 , de un promedio de 0.77 a 0.88 y disminuir el error de validación cruzada, de un promedio de $\pm 1.93^\circ\text{C}$ a $\pm 1.58^\circ\text{C}$ tal como se muestra en la Tabla 20, estas mejoras en el modelo de la TA permitieron obtener una mejor distribución espacial de la TA en los mapas obtenidos como se aprecia en la Figuras: 36, 37, 38 y 39.
- En la presente investigación se propuso dos alternativas al uso de imágenes de satélite con las que se puede obtener mapas de TA las cuales son: interpolación espacial Kriging Ordinario y el método de Gradiente Altitudinal, este último presenta mejores resultados, con una precisión de $\pm 0.72^\circ\text{C}$, como se muestra en la Tabla 22, el método correspondiente a interpolación espacial Kriging Ordinario, posee una precisión de $\pm 3.59^\circ\text{C}$, como se muestra en la Tabla 21, este método no considera la variación altitudinal por lo que no se aconseja para el presente caso de estudio, debido a la marcada orografía del terreno.

RECOMENDACIONES

Luego de realizada la investigación, se presentan algunas recomendaciones las cuales están encaminadas a mejorar la precisión de los mapas de temperatura TA, en todos los casos, el lector debe analizar si estas recomendaciones están acorde a sus necesidades de investigación.

- Los mapas de TA mediante imágenes de satélite se basan en correlacionar la TS de un pixel con la TA de una zona, es por eso que se debe garantizar la representatividad de los pixeles que se emplean para generar la ecuación de TA, antes de generar el mapa de temperatura. Una forma de detectar pixeles con temperaturas extrañamente bajas o altas, es correlacionar la TS del pixel con la elevación a la que se encuentra y así analizar si ese pixel debe ser o no considerado para el análisis, pues las temperaturas de algunos pixeles varían más rápidamente que el resto del entorno, ya sea porque se enfrían o calientan en mayor o menor grado, según las características particulares en el pixel, como tipo de superficie o cobertura que posee. A estos pixeles se los denomina: pixeles aislados y no deben formar parte del análisis.
- Las imágenes satelitales con menor resolución espacial como NOAA y MODIS, son las que mejores correlaciones presentan para el cálculo de TA, esto debido a que poseen una baja resolución espacial (1 km) con lo cual la TS de estos pixeles es un promedio más representativo de la zona, lo que concuerda con distribución homogénea de la TA (Cristóbal et al., 2005). Para aprovechar este conocimiento, en el apartado 5.5 de esta investigación se propone resamplear cambiar la superficie del pixel de TS de 30x30 m a pixeles de mayor tamaño como 120x120 m, luego se correlaciona esta TS con la TA para generar una ecuación que me permita obtener un mapa de TA, finalmente aplicamos esta ecuación al mapa de TS con resolución de 30x30m y con ello obtenemos un mapa de TA. De acuerdo a los resultados obtenidos en la sección 5.5, esta es una alternativa que se ha demostrado eficaz para mejorar la precisión de los mapas de TA.

LINEA DE INVESTIGACIÓN FUTURA

Investigar sobre la estimación de Mapas de Vapor de Agua Atmosférico, a partir de imágenes MODIS, aplicadas a la provincia de Loja. Esta investigación dará pie a un estudio de mejoras en la modelación de TA a partir de imágenes del satélite Landsat.

Investigar alternativas para mejorar en la modelización de la TA mediante análisis de regresión múltiple que combine predictores de Teledetección como: TS, albedo y NDVI, con predictores geográficos como: altitud, latitud y continentalidad, para crear modelos combinados, los cuales según investigaciones realizadas por según Rosselló et al., 2010, demuestran mejor predicción de la TA que los modelos puramente de Teledetección o puramente SIG.

BIBLIOGRAFÍA

- Ariza Alexander. (2013). *Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission)*. Centro de Investigación y Desarrollo en información Geográfica del IGAC -CIAF. Bogotá, Colombia: Centro de Investigación y Desarrollo.
- Artis, D. A., & Carnahan, W. H. (1982). Survey of emissivity variability in thermography of urban areas. *Remote Sensing of Environment*, 329. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005>
- Banda, L. A., Del, T., Etm, L., Medidas, C. O. N., Coll, C., Galve, J. M., ... Mira, E. V. M. (2009, September). Validación de la calibración y la corrección atmosférica de la banda térmica del landsat 7/etm+ con medidas de campo. *Teledetección: Agua Y Desarrollo Sostenible*, 489–492.
- Barsi, J. a, Schott, J. R., Palluconi, F. D., & Hook, S. J. (2005). Validation of a web-based atmospheric correction tool for single thermal band instruments. *Proceedings of SPIE*, 5882, 5882, 58820E (2005). <https://doi.org/10.1117/12.619990>
- Bayala, I. (2014). Evapotranspiración a escala local y regional (pp. 1–8). Instituto de Hidrología de Llanuras.
- Bustamante, J. (2003). Cartografía predictiva de variables climáticas: comparación de distintos modelos de interpolación de la temperatura en España peninsular. *Graellsia*, 59(2–3), 359–376.
- Bustillos, L. (2012). *Gap Fill para imágenes Landsat 7*.
- Cawley, G. C. (2006). Leave-One-Out Cross-Validation Based Model Selection Criteria for Weighted LS-SVMs. *The 2006 IEEE International Joint Conference on Neural Network Proceedings*, 1661–1668. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2006.246634>
- Centro Internacional de Agricultura Tropical. (n.d.). Valoración de los diferentes métodos de corrección topográfica en imágenes de satélite aplicado a la respuesta espectral del café.
- Chander, G., Markham, B. L., Helder, D. L., & Ali, E.-. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113(5), 893–903. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial* (Segunda). Madrid: Ediciones RIALP S.A.
- Chuvieco Salina, E. (2002). *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio*. *Journal of Chemical Information and Modeling* (2nd ed., Vol. 53). Barcelona. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Cogliati, M. G. (2011). Temperatura de superficie en el valle del río neuquén utilizando imágenes Landsat, 11–26.
- Coll, C., Galve, J. M., Sánchez, J. M., Caselles, V., Valor, E., & Mira, M. (2009). Validación De La Calibración Y La Corrección Atmosférica De La Banda Térmica Del Landsat 7/Etm+ Con Medidas De Campo. *Agua Y Desarrollo Sostenible. XIII*, 489–492.

- Contell, C. (2009). Optimización Del Algoritmo Acca Para La Detección En Imágenes Landsat De Nubes , Sombras Y Agua, (Irish 2000), 453–456.
- Cristóbal, J., Ninyerola, M., & Pons, X. (2005). Aportación de variables obtenidas mediante Teledetección a la modelización de la temperatura del aire . *Water Resources*, (2), 21–23.
- Facultad de Ciencias Agrarias - UNCUYO. (2015). Calentamiento, Enfriamiento y Temperatura del Aire. In *Cátedra de Climatología Agrícola* (pp. 1–16).
- Fernandez, I. A., & Herrero, E. L. (2001). *El satélite Landsat. Análisis visual de imágenes obtenidas del sensor ETM+ satélite Landsat*. Palencia: Escuela Técnica Superior de ingenierías Agrarias.
- gvSIG Asociación. (2015). Manual de usuario: gvSIG 2.2, 401. Retrieved from <http://www.gvsig.com/es/productos/gvsig-desktop/documentacion>
- Hantson, S., Chuvieco, E., Pons, X., Domingo, C., Cea, C., Moré, G., ... Tejeiro, J. a. (2011). Cadena de pre-procesamiento estándar para las imágenes Landsat del Plan Nacional de Teledetección. *Revista de Teledetección*, 36, 51–61.
- INAMHI. (2015). Anuario meteorológico № 52-2012. *Instituto Nacional Meteorología E Hidrología*, 52, 153.
- INEGI. (1999). Aspectos técnicos de las imágenes Landsat. *Dirección General de Geografía Y Medio Ambiente de México*. Retrieved from http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite/doc/aspectos_tecnicos_de_imagenes_landsat.pdf
- Irish, R. R. (2000). Landsat 7 automatic cloud cover assessment. *AeroSense 2000*, 4049, 348–355. <https://doi.org/10.1117/12.410358>
- Jiménez-Muñoz, J. C., & Sobrino, J. A. (2003). A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research*, 108. <https://doi.org/10.1029/2004JD004804>
- Jiménez, J. (2005). *Estimación de la temperatura y la emisividad de la superficie terrestre a partir de datos suministrados por sensores de alta resolución*. *Journal of Chemical Information and Modeling*.
- Leguizamón, A. B. (2003). Modelos geoespaciales de la distribución de las variables climatológicas en el Territorio Colombiano, 81–89.
- Maldonado, N. (2014). EL CLIMA DE LOJA: Rasgos Generales. Retrieved August 2, 2016, from <http://casadelaculturaloja.gob.ec/>
- Martinez, J. (2005). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. (A. Díaz, Ed.). Comisión Nacional del Agua.
- NASA. (n.d.). Landsat 7 Handbook. Retrieved July 17, 2016, from http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/data_prod/prog_sect11_3.html

- Ormeño-Villajos, S. (2006). *Teledetección fundamental* (3rd ed.). Madrid.
- Perez, D. J. (2007). *Introducción a los Sensores Remotos* (Vol. 9). Buenos Aires: Laboratorio de Tectónica Andina.
- Philo. (1998). *Plan Integral de Desarrollo de los Recursos Hídricos de la Provincia de Loja*. (I. – P. – C. – O.E.A., Ed.). Loja.
- Pons, X., Cristóbal, J., & Serra, P. (2003). Sobre el uso operativo de Landsat-7 ETM+ en Europa. *X Congreso de Teledetección*, 55–59.
- Recondo, C., & Pérez-Morandeira, C. (2002). Obtención de la temperatura del aire de Asturias a partir de la temperatura de superficie calculada con imágenes NOAA-AVHRR. *Revista de Teledetección*, 5–12. Retrieved from <http://www.aet.org.es/revistas/revista17/AET17-01.pdf>
- Rial, E., & Gonzalez, L. (1999). Manual de practicas cin IDRISI. *Laboratorio de Teledetección Y S.I.G.*, 20.
- Rodríguez, N. (2009). *Rellenado de los gaps provocados por la falla del Scan Line Corrector en las imágenes Landsat 7 ETM+*. Facultad de Matemática y Computación. Universidad de La Habana. Retrieved from http://www.gabrielortiz.com/descargas/Articulo_SLC_Off_Proyect_7_07.pdf
- Rosselló, C., Casals, N., Fernández, P., & Montferrer, P. L. a. (2010). Mejoras en la modelización de la temperatura del aire mediante el uso de teledetección y de los sistemas de información geográfica, 93–103.
- Schirmbeck, J., & Rivas, R. (2007). Estimación de la radiación neta a nivel del suelo a partir de datos captados por el sensor ETM+. *Anais Del XIII Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 6159–6165.
- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., Sòria, G., Romaguera, M., Guanter, L., Moreno, J., ... Martínez, P. (2008). Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(2), 316–327. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.904834>
- Sobrino, J., Cristóbal, J., Sòria, G., Ninyerola, M., & Pons, X. (2010). Obtención de la temperatura de la superficie terrestre a partir de la serie histórica LANDSAT Land surface temperature retrieval from. *Teledetección Y Desarrollo Regional*, 6, 53–63.
- Universidad de Murcia. (2003). Correcciones a las imágenes de satélites. In Universidad de Murcia (Ed.), *Teledetección* (pp. 79–88). Murcia. <https://doi.org/Universidad de Murcia>
- Yu, X., Guo, X., & Wu, Z. (2014). Land surface temperature retrieval from landsat 8 TIRS-comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method. *Remote Sensing*, 6(10), 9829–9852. <https://doi.org/10.3390/rs6109829>

ANEXOS

Anexo 1: Análisis de Validación Cruzada

Tabla 23: TA mediante imágenes de satélite. Imagen 1: 2013/04/10.

FECHA	2013/04/10	PARÉMTROS ATMOSFERICOS			TS (°C) Jiménez-Muñoz & Sobrino						
					Ecuación de TA:		VALIDACION CRUZADA				
Estación	HR (%)	Trans	R a	R d	TS	TA	TS	TA	Ec. TA	TA calc.	Error TA
Jipiro	74.47	0.7	2.04	3.23	NB	16.83			-	-	-
Malca	63.5	0.56	3.21	4.9	43.84	23.55	43.84	23.55	0.3288*X+7.1613	21.58	-1.97
Militar	75.53	0.68	2.24	3.52	30.91	17.43	30.91	17.43	0.4117*X+4.9092	17.63	0.20
San Pedro	81.34	0.7	2.04	3.23	33.87	16.96	33.87	16.96	0.4351*X+4.4488	19.19	2.23
Tecnico	77.96	0.72	1.88	3	29.8	15.95	29.8	15.95	0.4085*X+5.1522	17.33	1.38
UTPL	ND	-	-	-	NB	ND			-	-	-
Cerro Ventanas	86.35	0.78	1.36	4.24	20	12.73	20	12.73	0.3873*X+5.7167	13.46	0.73
Cerro Villonaco	ND	-	-	-	NB	ND			-	-	-
Cariamanga	90	0.65	2.47	3.85	28.65	18.9	28.65	18.9	0.426*X+4.1252	16.33	-2.57
Celica	ND	-	-	-	26.54	16.5	26.54	16.5	0.4217*X+4.4755	15.67	-0.83
La Argelia	73	0.7	2.04	3.24	30.15	17.4	30.15	17.4	0.4115*X+4.8738	17.28	-0.12
Prom.											1.25

SIMBOLOGÍA	DEFINICIÓN
HR (%)	Humedad Relativa en %
Trans	Trasmitancia atmosférica
Ra	Radinacia ascendente
Rd	Radinacia descendente
TS	Temperatura superficial
TA	Temperatura del aire
Ec. TA	Ecuación de Validación Cruzada
TA calc.	TA de Validacion Cruzada
Error TA	Error de Validación Cruzada
ND	Sin datos
NB	Pixel afectado por nube

FECHA	2013/04/10	PARÉMTROS ATMOSFERICOS			TS (°C) Artist & Carnahan						
					Ecuación de TA:		VALIDACION CRUZADA				
Estación	HR (%)	Trans	R a	R d	TS	TA	TS	TA	Ec. TA	TA calc.	Error TA
Jipiro	74.47	0.7	2.04	3.23	NB	16.83			-	-	-
Malca	63.5	0.56	3.21	4.9	24.42	23.55	24.42	23.55	0.5996*X+5.0627	19.70	-3.85
Militar	75.53	0.68	2.24	3.52	20.45	17.43	20.45	17.43	0.9175*X-0.6739	18.09	0.66
San Pedro	81.34	0.7	2.04	3.23	21.91	16.96	21.91	16.96	1.0193*X-2.4018	19.93	2.97
Tecnico	77.96	0.72	1.88	3	20.04	15.95	20.04	15.95	0.9177*X-0.5193	17.87	1.92
UTPL	ND	-	-	-	19.34	ND			-	-	-
Cerro Ventanas	86.35	0.78	1.36	4.24	14.6	12.73	14.6	12.73	0.9223*X-0.8687	12.60	-0.13
Cerro Villonaco	ND	-	-	-	NB	ND			-	-	-
Cariamanga	90	0.65	2.47	3.85	19.03	18.9	19.03	18.9	0.9453*X-1.6241	16.36	-2.54
Celica	ND	-	-	-	18.07	16.5	18.07	16.5	0.935*X-1.2047	15.69	-0.81
La Argelia	73	0.7	2.04	3.24	20.03	17.4	20.03	17.4	0.9111*X-0.5985	17.65	0.25
Prom.											1.64

Fuente: El Autor
Elaboración: El Autor.

Tabla 24: TA mediante imágenes de satélite. Imagen 2: 2013/09/17.

		TS (°C) Jiménez-Muñoz & Sobrino										
FECHA	2013/9/17	PARÉMTROS ATMOSFERICOS			Ecuación de TA:		0.3071*X+6.5652		VALIDACION CRUZADA			
Estación	HR (%)	Trans	R a	R d	TS	TA	TS	TA	Ec. TA	TA calc.	Error TA	
Jipiro	ND				17.96	ND			-	-	-	
Malca	59.21	0.6	2.84	4.4	NB	22.58			-	-	-	
Militar	74.24	0.71	1.98	3.15	30.21	16.6	30.21	16.6	0.3032*X+6.5225	15.68	-0.92	
San Pedro	71.08	0.72	1.85	2.98	41.65	17.21	41.65	17.21	0.4293*X+3.9046	21.78	4.57	
Tecnico	78.74	0.75	1.67	2.69	27.49	15	27.49	15	0.3071*X+6.5672	15.01	0.01	
UTPL	ND	-	-	-	NB	ND			-	-	-	
Cerro Ventanas	87.47	0.62	1.18	3.85	19.4	11.8	19.4	11.8	0.2894*X+7.2387	10.65	-1.15	
Cerro Villonaco	88.53	0.81	1.17	1.91	14.13	10.62	14.13	10.62	0.2901*X+7.1472	11.25	0.63	
Cariamanga	80	0.68	2.22	3.52	35.25	19.8	35.25	19.8	0.2605*X+7.3237	16.51	-3.29	
Celica	ND	-	-	-	39.23	ND			-	-	-	
La Argelia	76	0.73	1.81	2.9	NB	16.1			-	-	-	
Prom.											1.76	

		TS (°C) Artist & Carnahan										
FECHA	2013/9/17	PARÉMTROS ATMOSFERICOS			Ecuación de TA:		0.6195*X+3.4743		VALIDACION CRUZADA			
Estación	HR (%)	Trans	R a	R d	TS	TA	TS	TA	Ec. TA	TA calc.	Error TA	
Jipiro	ND				13.36	ND			-	-	-	
Malca	59.21	0.6	2.84	4.4	NB	22.58			-	-	-	
Militar	74.24	0.71	1.98	3.15	20.1	16.6	20.1	16.6	0.6115*X+3.4883	15.78	-0.82	
San Pedro	71.08	0.72	1.85	2.98	25.55	17.21	25.55	17.21	0.8525*X-0.1963	21.59	4.38	
Tecnico	78.74	0.75	1.67	2.69	18.99	15	18.99	15	0.6198*X+3.5174	15.29	0.29	
UTPL	ND	-	-	-	18.75	ND			-	-	-	
Cerro Ventanas	87.47	0.62	1.18	3.85	14.37	11.8	14.37	11.8	0.5885*X+4.2024	12.66	0.86	
Cerro Villonaco	88.53	0.81	1.17	1.91	12	10.62	12	10.62	0.5847*X+4.2374	11.25	0.63	
Cariamanga	80	0.68	2.22	3.52	22.28	19.8	22.28	19.8	0.5271*X+4.6514	16.40	-3.40	
Celica	ND	-	-	-	24.15	ND			-	-	-	
La Argelia	76	0.73	1.81	2.9	NB	16.1			-	-	-	
Prom.											1.73	

SIMBOLOGÍA	DEFINICIÓN
HR (%)	Humedad Relativa en %
Trans	Trasmitancia atmosférica
Ra	Radinacia ascendente
Rd	Radinacia descendente
TS	Temperatura superficial
TA	Temperatura del aire
Ec. TA	Ecuación de Validación Cruzada
TA calc.	TA de Validacion Cruzada
Error TA	Error de Validación Cruzada
ND	Sin datos
NB	Pixel afectado por nube

Fuente: El Autor.
Elaboración: El Autor.

Tabla 25: TA mediante imágenes de satélite. Imagen 3: 2012/06/10.

					TS (°C) Jiménez-Muñoz & Sobrino						
FECHA	2012/6/10	PARÉMTROS ATMOSFERICOS			Ecuación de TA:		0.575*X+1.2594		VALIDACION CRUZADA		
Estación	HR (%)	Trans	R a	R d	TS	TA	TS	TA	Ec. TA	TA calc.	Error TA
Jipiro	74.6	0.76	1.59	2.55	NB	15.3					
Malca	49.5	0.65	2.59	4.06	33.54	24.2	33.54	24.2	0.4587*X+3.4176	18.80	-5.40
Militar	68.31	0.74	1.77	2.84	NB	17.36					
San Pedro	67.7	0.77	1.57	2.53	28.72	16.6	28.72	16.6	0.588*X+1.1359	18.02	1.42
Tecnico	78.41	0.78	1.45	2.33	26.29	14.16	26.29	14.16	0.5824*X+1.4439	16.76	2.60
UTPL	64.45	0.76	1.59	2.56	30.58	16.46	30.58	16.46	0.6174*X+0.6269	19.51	3.05
Cerro Ventanas	89.76	0.67	0.98	3.41	15.35	10.46	15.35	10.46	0.5906*X+0.7779	9.84	-0.62
Cerro Villonaco	89.23	0.85	0.95	1.56	12.49	9.31	12.49	9.31	0.6395*X-0.645	7.34	-1.97
Cariamanga	88	0.71	2.09	3.3	29.33	19	29.33	19	0.5635*X+1.3955	17.92	-1.08
Celica	ND	-	-	-	-	-			-	-	-
La Argelia	71	0.76	1.63	2.62	NB	16.5			-	-	-
Prom.										2.30	

SIMBOLOGÍA	DEFINICIÓN
HR (%)	Humedad Relativa en %
Trans	Trasmitancia atmosférica
Ra	Radinacia ascendente
Rd	Radinacia descendente
TS	Temperatura superficial
TA	Temperatura del aire
Ec. TA	Ecuación de Validación Cruzada
TA calc.	TA de Validacion Cruzada
Error TA	Error de Validación Cruzada
ND	Sin datos
NB	Pixel afectado por nube

					TS (°C) Artist & Carnahan						
FECHA	2012/6/10	PARÉMTROS ATMOSFERICOS			Ecuación de TA:		0.9907*X-1.9423		VALIDACION CRUZADA		
Estación	HR (%)	Trans	R a	R d	TS	TA	TS	TA	Ec. TA	TA calc.	Error TA
Jipiro	74.6	0.76	1.59	2.55	NB	15.3			-	-	-
Malca	49.5	0.65	2.59	4.06	21.99	24.2	21.99	24.2	0.7884*X+0.8029	18.14	-6.06
Militar	68.31	0.74	1.77	2.84	NB	17.36			-	-	-
San Pedro	67.7	0.77	1.57	2.53	20.39	16.6	20.39	16.6	1.0328*X-2.4008	18.66	2.06
Tecnico	78.41	0.78	1.45	2.33	18.89	14.16	18.89	14.16	1.0165*X-1.9632	17.24	3.08
UTPL	64.45	0.76	1.59	2.56	20.5	16.46	20.5	16.46	1.0416*X-2.5104	18.84	2.38
Cerro Ventanas	89.76	0.67	0.98	3.41	12.22	10.46	12.22	10.46	1.013*X-2.4114	9.97	-0.49
Cerro Villonaco	89.23	0.85	0.95	1.56	10.51	9.31	10.51	9.31	1.1083*X-4.3256	7.32	-1.99
Cariamanga	88	0.71	2.09	3.3	20.45	19	20.45	19	0.9728*X-1.7455	18.15	-0.85
Celica	ND	-	-	-	-	-			-	-	-
La Argelia	71	0.76	1.63	2.62	NB	16.5			-	-	-
Prom.										2.42	

Fuente: El Autor.
Elaboración: El Autor.

Tabla 26: TA método de Gradiente Altitudinal. Imagen 1: 2013/04/10.

Mapa 1: Método Gradiente Altitudinal								
Fecha: 2013/04/10	Ecuación de TA:		-0.00679x + 31.58059					
Estación	A(msnm)	TA	A(msnm)	TA	VALIDACION CRUZADA (TA °C)			
					Ec. TA	TA calc.	Error TA	
Jipiro	2167	16.83	2167	16.83	-0.0068x + 31.58	16.84	0.01	
Malca	1201	23.55	1201	23.55	-0.0065x + 30.938	23.13	-0.42	
Militar	2009	17.43	2009	17.43	-0.0068x + 31.717	18.06	0.63	
San Pedro	2174	16.96	2174	16.96	-0.0068x + 31.583	16.80	-0.16	
Tecnico	2366	15.95	2366	15.95	-0.0069x + 31.747	15.42	-0.53	
UTPL	2129	ND			-	-		
Cerro Ventanas	2762	12.73	2762	12.73	-0.0067x + 31.443	12.94	0.21	
Cerro Villonaco	2872	ND			-	-		
Cariamanga	1984	18.9	1984	18.9	-0.0067x + 31.327	18.03	-0.87	
Celica	2036	16.5	2036	16.5	-0.0069x + 31.86	17.81	1.31	
La Argelia	2135	17.4	2135	17.4	-0.0068x + 31.564	17.05	-0.35	
Prom.							0.50	

SIMBOLOGÍA	DEFINICIÓN
A (msnm)	Altura sobre le nivel del mar
TA	Temperatura del aire (°C)
Ec. TA	Ecuación de Validación Cruzada
TA calc.	TA de Validacion Cruzada
Error TA	Error de Validación Cruzada (TA °C)
ND	Sin datos

Fuente: El Autor.
Elaboración: El Autor.

Tabla 27: TA método de Gradiente Altitudinal. Imagen 2: 2013/09/17.

Mapa 2: Método Gradiente Altitudinal								
Fecha: 2013/9/17	Ecuación de TA:		0.00727x + 32.12114					
Estación	A(msnm)	TA	A(msnm)	TA	VALIDACION CRUZADA (TA °C)			
					Ec. TA	TA calc.	Error TA	
Jipiro	2167	ND						
Malca	1201	22.58	1201	22.58	-0.0085x + 35.008	24.80	2.22	
Militar	2009	16.6	2009	16.6	-0.0074x + 32.476	17.61	1.01	
San Pedro	2174	17.21	2174	17.21	-0.0073x + 31.977	16.11	-1.10	
Tecnico	2366	15	2366	15	-0.0073x + 32.129	14.86	-0.14	
UTPL	2129	ND						
Cerro Ventanas	2762	11.8	2762	11.8	-0.0072x + 31.935	12.05	0.25	
Cerro Villonaco	2872	10.62	2872	10.62	-0.0069x + 31.457	11.64	1.02	
Cariamanga	1984	19.8	1984	19.8	-0.007x + 31.227	17.34	-2.46	
Celica	2036	ND						
La Argelia	2135	16.1	2135	16.1	-0.0073x + 32.228	16.64	0.54	
Prom.							1.09	

SIMBOLOGÍA	DEFINICIÓN
A (msnm)	Altura sobre le nivel del mar
TA	Temperatura del aire (°C)
Ec. TA	Ecuación de Validación Cruzada
TA calc.	TA de Validacion Cruzada
Error TA	Error de Validación Cruzada (TA °C)
ND	Sin datos

Fuente: El Autor.
Elaboración: El Autor.

Tabla 28: TA método de Gradiente Altitudinal. Imagen 3: 2012/06/10.

Mapa 3: Método Gradiente Altitudinal							
Fecha: 2012/6/10	Ecuación de TA:		-0.00907x + 35.71254				
Estación	A(msnm)	TA	A(msnm)	TA	VALIDACION CRUZADA (TA °C)		
					Ec. TA	TA calc.	Error TA
Jipiro	2167	15.3	2167	15.3	-0.0091x + 35.809	16.09	0.79
Malca	1201	24.2	1201	24.2	-0.0099x + 37.655	25.77	1.57
Militar	2009	17.36	2009	17.36	-0.0091x + 35.755	17.47	0.11
San Pedro	2174	16.6	2174	16.6	-0.0091x + 35.64	15.86	-0.74
Tecnico	2366	14.16	2366	14.16	-0.0091x + 35.701	14.17	0.01
UTPL	2129	16.46	2129	16.46	-0.0091x + 35.701	16.33	-0.13
Cerro Ventanas	2762	10.46	2762	10.46	-0.009x + 35.558	10.70	0.24
Cerro Villonaco	2872	9.31	2872	9.31	-0.0089x + 35.337	9.78	0.47
Cariamanga	1984	19	1984	19	-0.0089x + 35.234	17.58	-1.42
Celica	2036	ND					
La Argelia	2135	16.5	2135	16.5	-0.0091x + 35.686	16.26	-0.24
Prom.						0.57	

SIMBOLOGÍA	DEFINICIÓN
A (msnm)	Altura sobre le nivel del mar
TA	Temperatura del aire (°C)
Ec. TA	Ecuación de Validación Cruzada
TA calc.	TA de Validacion Cruzada
Error TA	Error de Validación Cruzada (TA °C)
ND	Sin datos

Fuente: El Autor.
Elaboración: El Autor.

Tabla 29: TA método Kriging Ordinario. Imágenes 1, 2 y 3.

SIMBOLOGÍA	DEFINICIÓN
A (msnm)	Altura sobre le nivel del mar
TA	Temperatura del aire (°C)
Ec. TA	Ecuación de Validación Cruzada
TA calc.	TA de Validacion Cruzada
Error TA	Error de Validación Cruzada (TA °C)
ND	Sin datos

Mapa 1: Método Kriging Ordinario (TA °C)			
2013/04/10	VALIDACION CRUZADA		
Estación	TA	TA pred.	Error TA
Jipiro	16.83	17.22	0.39
Malca	23.55	16.03	-7.52
Militar	17.43	17.11	-0.32
San Pedro	16.96	22.13	5.17
Tecnico	15.95	15.41	-0.54
UTPL	ND	-	-
Cerro Ventanas	12.73	16.97	4.24
Cerro Villonaco	ND	-	-
Cariamanga	18.9	16.07	-2.83
Celica	16.5	18.21	1.71
La Argelia	17.4	14.01	-3.39
	Prom.		2.90

Mapa 2: Método Kriging Ordinario (TA °C)			
2013/9/17	VALIDACION CRUZADA		
Estación	TA	TA pred.	Error TA
Jipiro	ND	-	-
Malca	22.58	17.20	-5.38
Militar	16.6	15.60	-1.00
San Pedro	17.21	22.41	5.20
Tecnico	15	11.97	-3.03
UTPL	ND	-	-
Cerro Ventanas	11.8	14.65	2.85
Cerro Villonaco	10.62	15.41	4.79
Cariamanga	19.8	15.83	-3.97
Celica	ND	-	-
La Argelia	16.1	13.50	-2.60
	Prom.		3.60

Mapa 3: Método Kriging Ordinario (TA °C)			
2012/6/10	VALIDACION CRUZADA		
Estación	TA	TA pred.	Error TA
Jipiro	15.3	17.08	1.78
Malca	24.2	13.04	-11.16
Militar	17.36	15.04	-2.32
San Pedro	16.6	23.64	7.04
Tecnico	14.16	11.16	-3.00
UTPL	16.46	15.36	-1.10
Cerro Ventanas	10.46	14.23	3.77
Cerro Villonaco	9.31	14.81	5.50
Cariamanga	19	15.18	-3.82
Celica	ND	-	-
La Argelia	16.5	13.25	-3.25
	Prom.		4.27

Fuente: El Autor.
Elaboración: El Autor.

Anexo 2: Correlación entre variables: A, TS y TA.

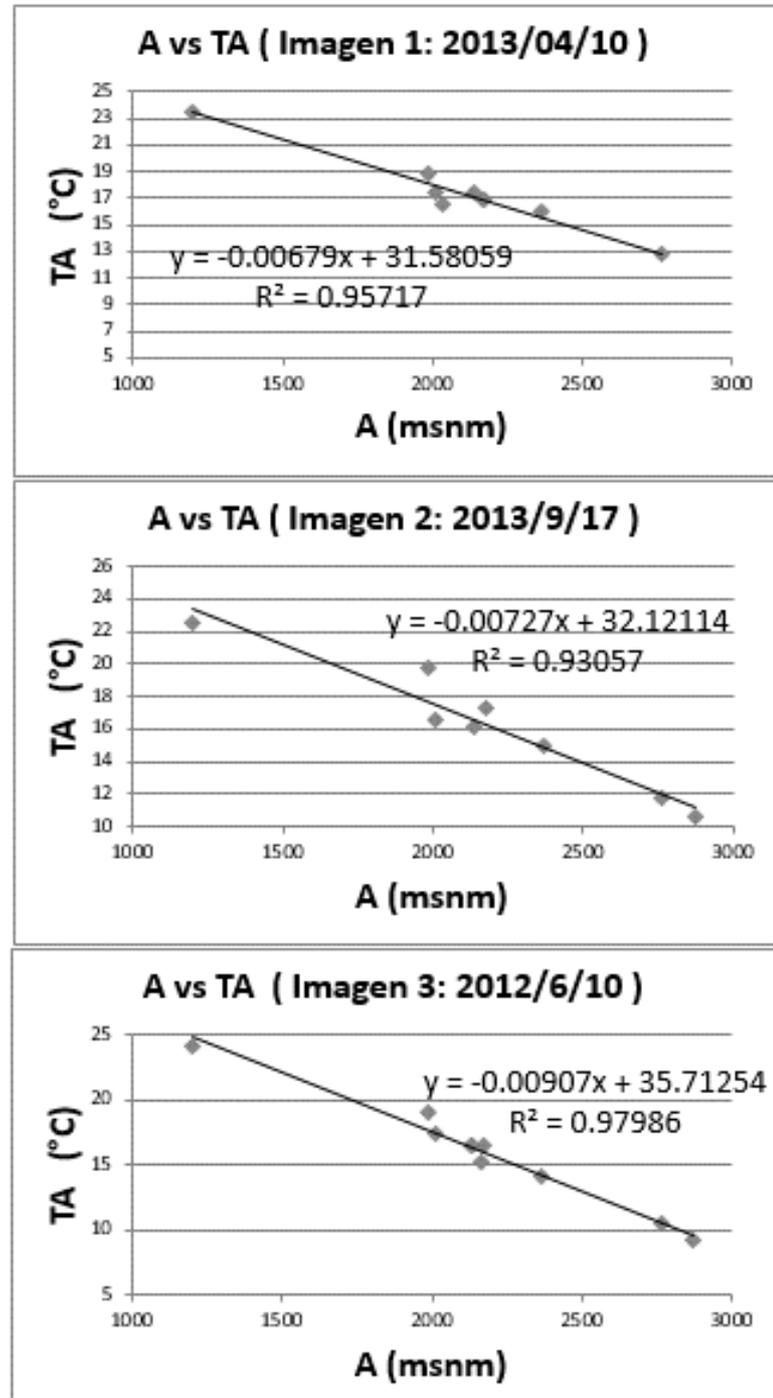
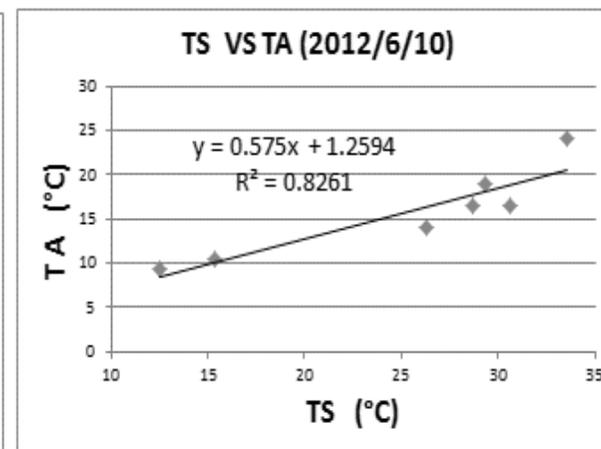
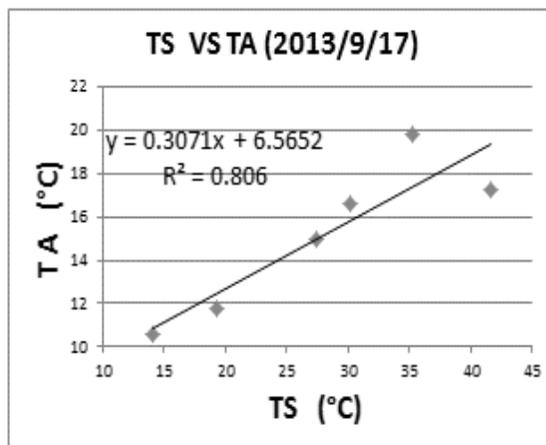
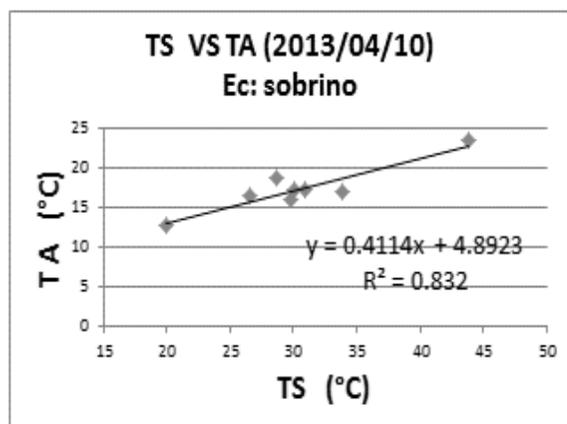


Figura 42: Correlación A vs TA.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

Ecuación Jiménez-Muñoz & Sobrino



Ecuación Artist & Carnahan

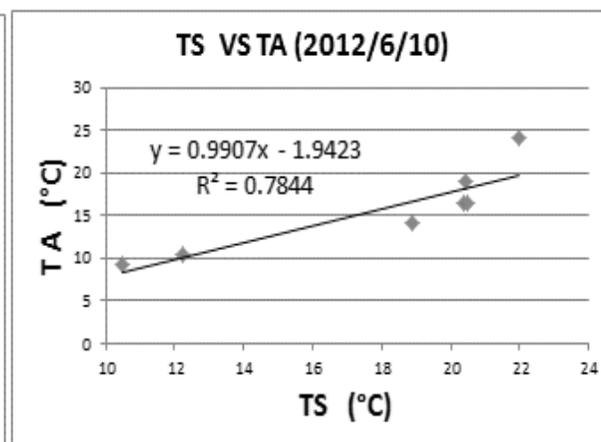
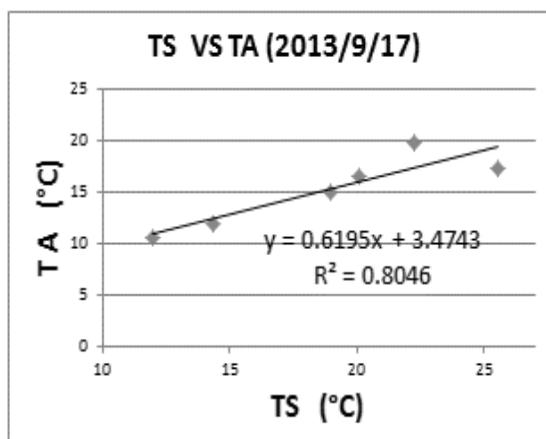
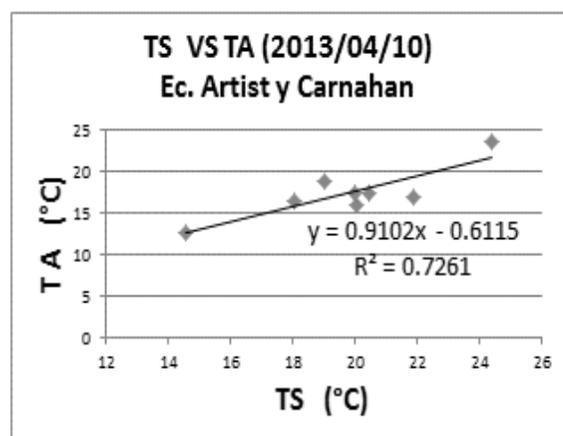
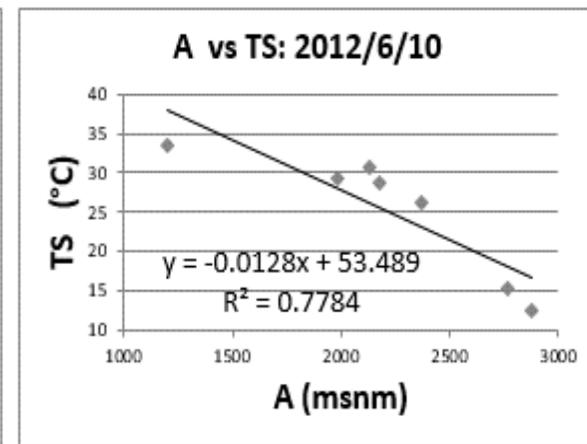
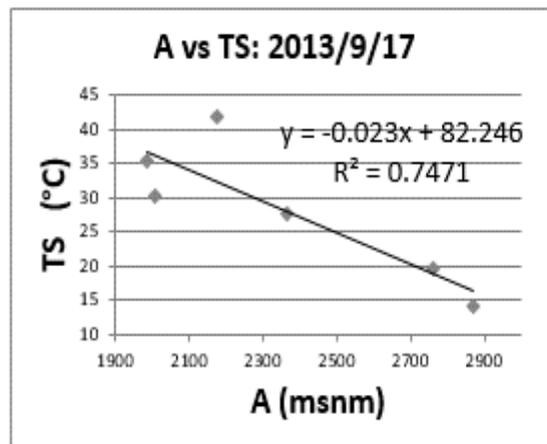
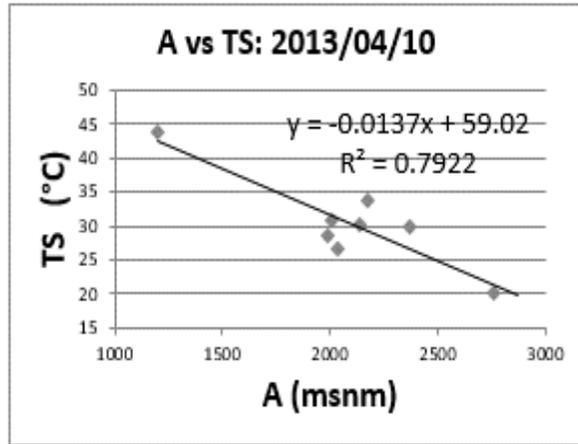


Figura 43: Correlación TS vs TA

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor.

Ecuación Jiménez-Muñoz & Sobrino



Ecuación Artist & Carnahan

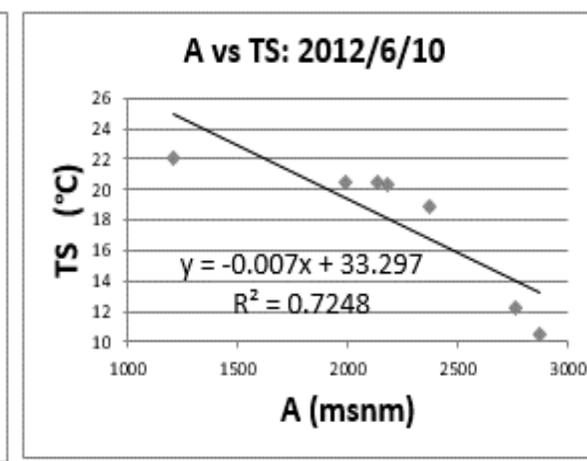
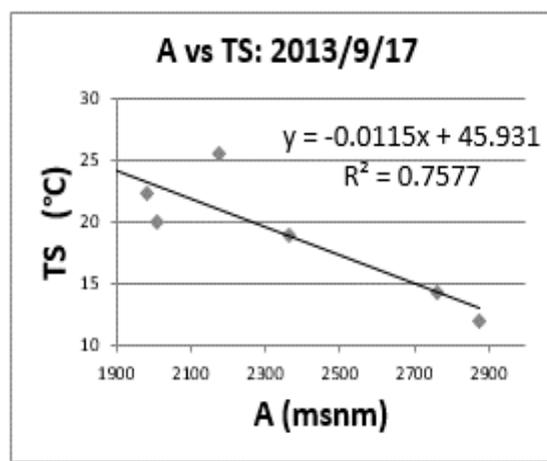
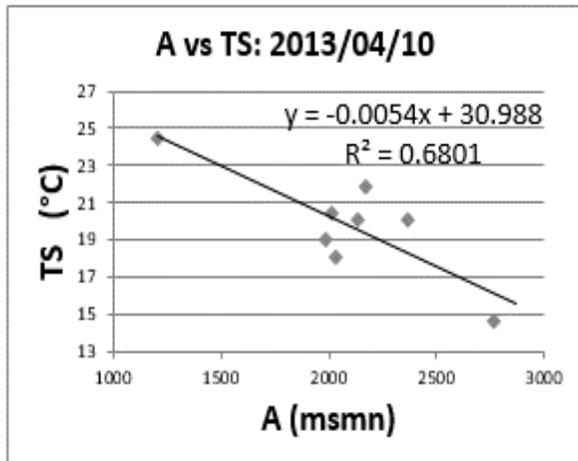


Figura 44: Correlación A vs TS

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor.

Anexo 3: Correlación entre A y los factores atmosféricos.

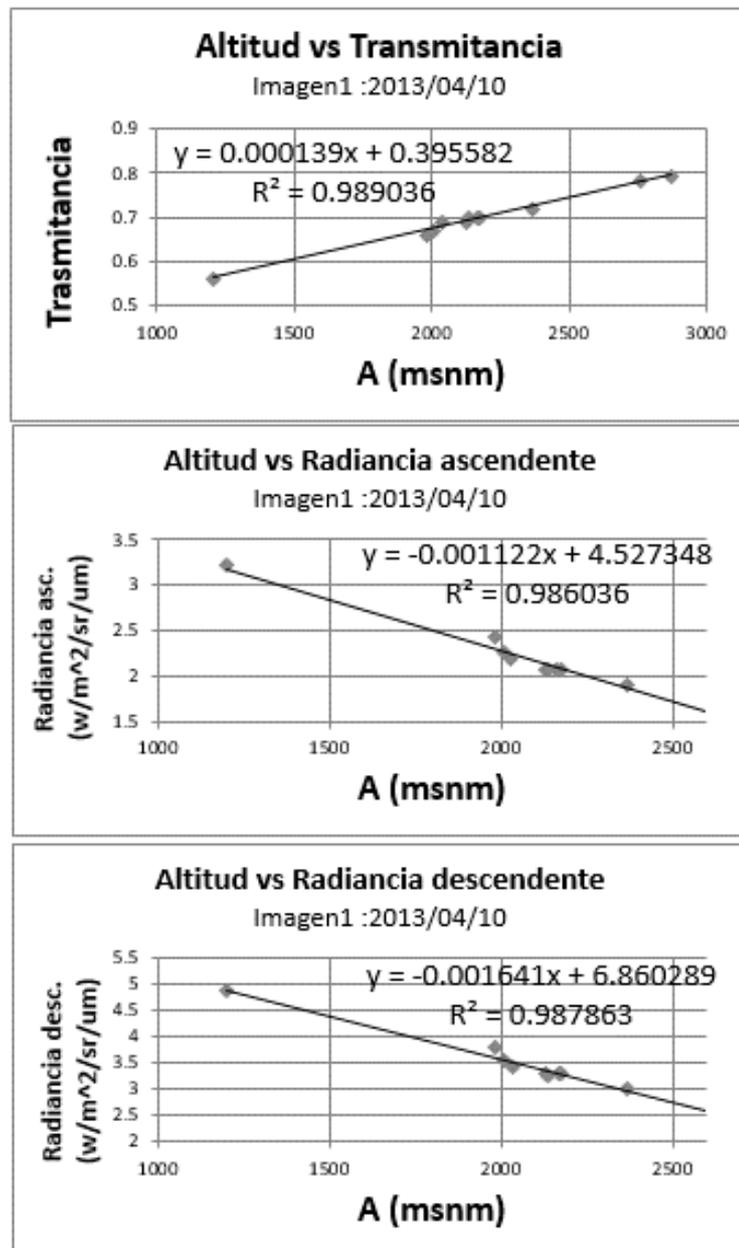


Figura 45: Correlación A vs factores atmosféricos. Imagen 1: 2013/04/10
Fuente: El Autor.
Elaboración: El Autor.

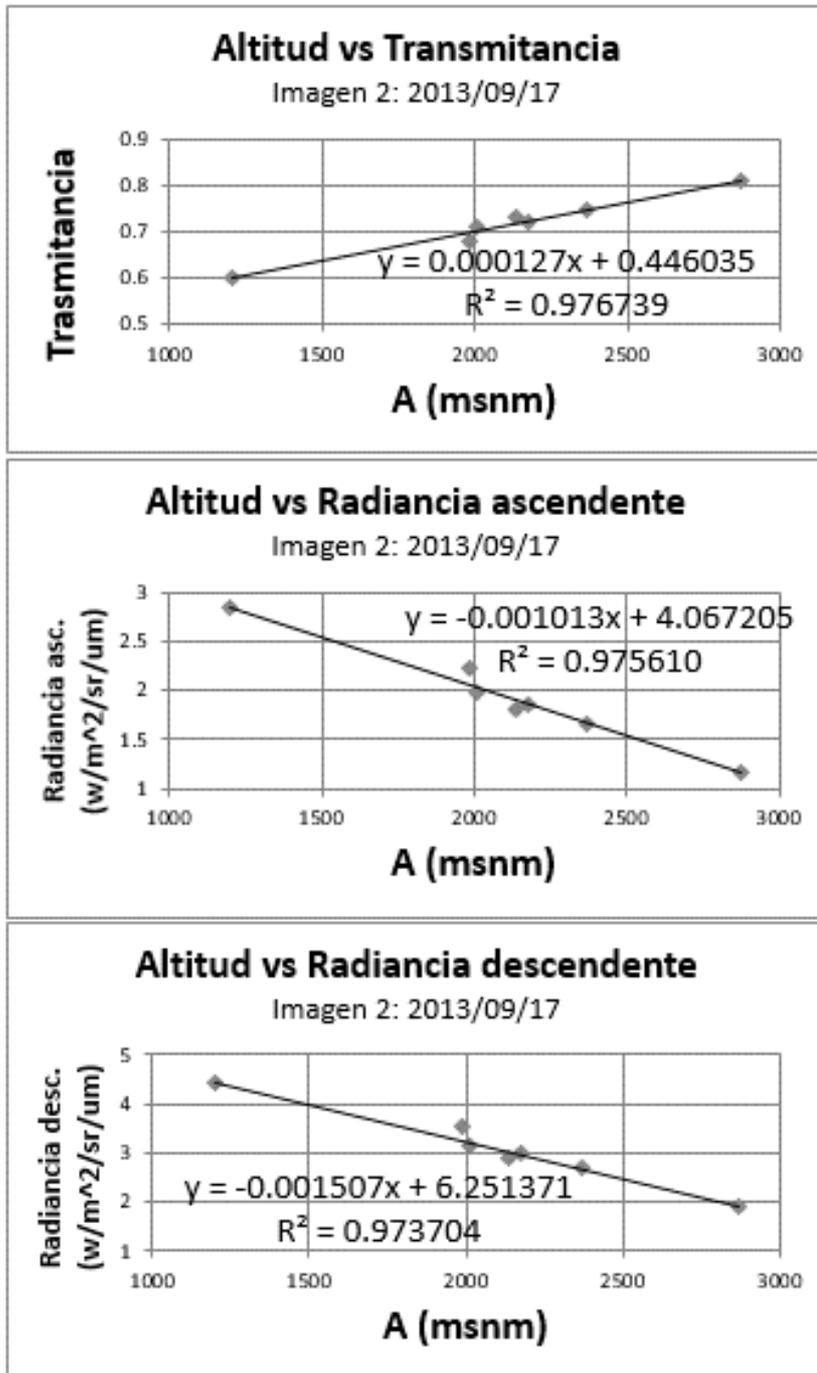


Figura 46: Correlación A vs factores atmosféricos. Imagen 2: 2013/09/07
Fuente: El Autor
Elaboración: El Autor.

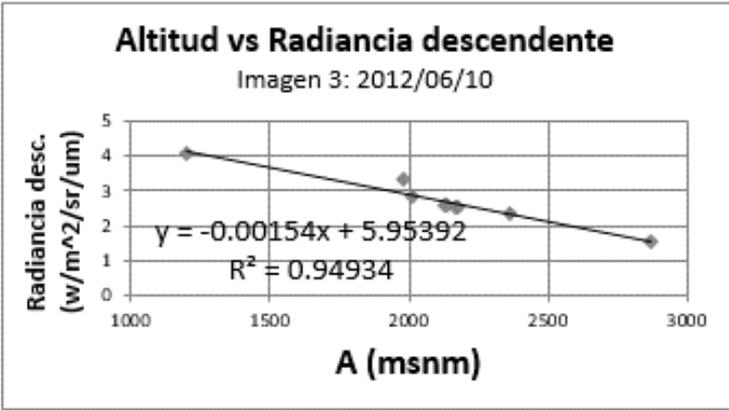
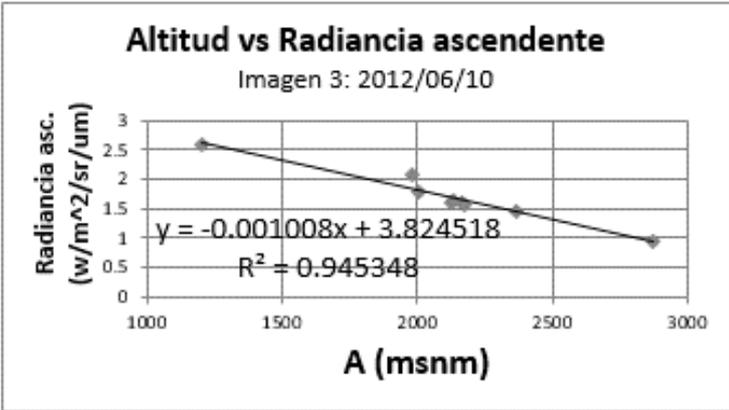
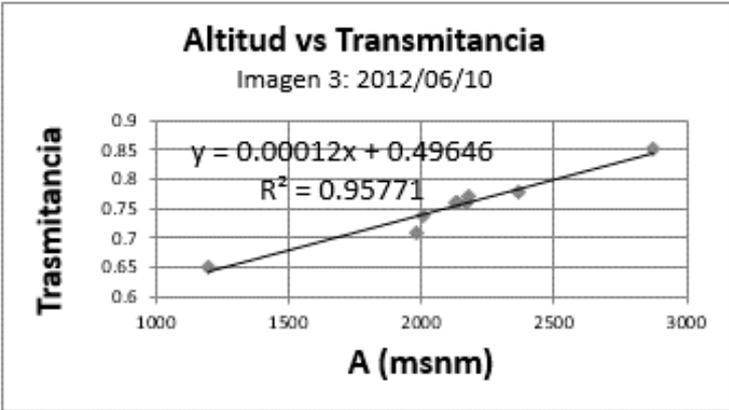


Figura 47: Correlación A vs factores atmosféricos. Imagen 3: 2012/06/10
Fuente: El Autor
Elaboración: El Autor.

Anexo 4: Mejora en el modelo de TA mediante imágenes satelitales.

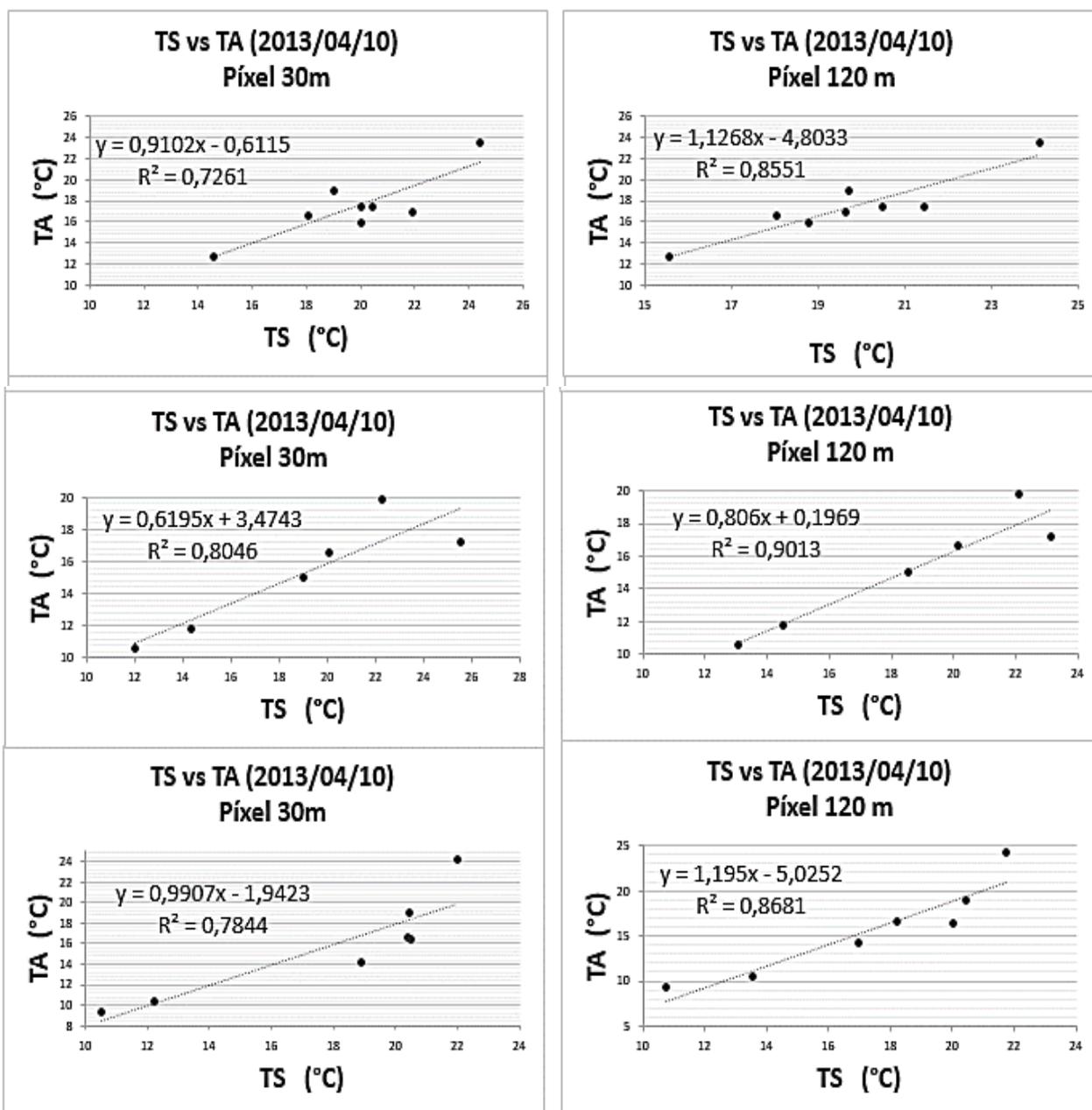


Figura 48: Mejora en el modelo de la TA, correlación TS vs TA. Ec. Artist & Carnahan.
 Fuente: El Autor
 Elaboración: El Autor.

Tabla 30: Mejora en el modelo de la TA, validación cruzada Imágenes 1 y 2.

Imágen 1: TS (°C) Artist & Carnahan (Pixel: 120m)											
FECHA	2013/04/10	PARÉMTROS ATMOSFERICOS			Ecuación de TA:		1,0556x - 1.0471		VALIDACION CRUZADA		
Estación	HR (%)	Trans	R a	R d	TS	TA	TS	TA	Ec. TA	TA calc.	Error TA
Jipiro	74.47	0.7	2.04	3.23	NB	16.83			-		
Malca	63.5	0.56	3.21	4.9	24.13	23.55	24.13	23.55	0,8563x + 0,1976	20.86	-2.69
Militar	75.53	0.68	2.24	3.52	20.48	17.43	20.48	17.43	1,1436x - 5,0125	18.41	0.98
San Pedro	81.34	0.7	2.04	3.23	19.65	16.96	19.65	16.96	1,126x - 4,7338	17.39	0.43
Tecnico	77.96	0.72	1.88	3	18.8	15.95	18.8	15.95	1,1161x - 4,5294	16.45	0.50
UTPL	ND	-	-	-	19.34	ND			-		
Cerro Ventanas	86.35	0.78	1.36	4.24	15.58	12.73	15.58	12.73	1,1224x - 4,7098	12.78	0.05
Cerro Villonaco	ND	-	-	-	NB	ND			-		
Cariamanga	90	0.65	2.47	3.85	19.7	18.9	19.7	18.9	1,128x - 5,0406	17.18	-1.72
Celica	ND	-	-	-	18.05	16.5	18.05	16.5	0,9073x - 0,9259	15.45	-1.05
La Argelia	73	0.7	2.04	3.24	21.44	17.4	21.44	17.4	1,0635x - 3,4868	19.31	1.91
Prom.											±1,17

Imágen 2: TS (°C) Artist & Carnahan (Pixel: 120m)											
FECHA	2013/9/17	PARÉMTROS ATMOSFERICOS			Ecuación de TA:		0.6195*X+3.4743		VALIDACION CRUZADA		
Estación	HR (%)	Trans	R a	R d	TS	TA	TS	TA	Ec. TA	TA calc.	Error TA
Jipiro	ND				13.36	ND			-	-	-
Malca	59.21	0.6	2.84	4.4	NB	22.58			-	-	-
Militar	74.24	0.71	1.98	3.15	20.1	16.6	20.13	16.6	0,6115x + 3,4883	15.80	-0.80
San Pedro	71.08	0.72	1.85	2.98	25.55	17.21	23.14	17.21	0,8525x - 0,1963	19.53	2.32
Tecnico	78.74	0.75	1.67	2.69	18.99	15	18.53	15	0,6198x + 3,5174	15.00	0.00
UTPL	ND	-	-	-	18.75	ND			-	-	-
Cerro Ventanas	87.47	0.62	1.18	3.85	14.37	11.8	14.51	11.8	0,5885x + 4,2024	12.74	0.94
Cerro Villonaco	88.53	0.81	1.17	1.91	12	10.62	13.05	10.62	0,5847x + 4,2374	11.87	1.25
Cariamanga	80	0.68	2.22	3.52	22.28	19.8	22.12	19.8	0,5271x + 4,6514	16.31	-3.49
Celica	ND	-	-	-	24.15	ND			-	-	-
La Argelia	76	0.73	1.81	2.9	NB	16.1			-	-	-
Prom.											±1,47

SIMBOLOGÍA	DEFINICIÓN
HR (%)	Humedad Relativa en %
Trans	Trasmitancia atmosférica
Ra	Radinacia ascendente
Rd	Radinacia descendente
TS	Temperatura superficial
TA	Temperatura del aire
Ec. TA	Ecuación de Validación Cruzada
TA calc.	TA de Validacion Cruzada
Error TA	Error de Validación Cruzada
ND	Sin datos
NB	Pixel afectado por nube

Fuente: El Autor
Elaboración: El Autor.

Tabla 31: Mejora en el modelo de la TA, validación cruzada Imagen 3.

		Imágen 3: TA (°C) Artist & Carnahan (Píxel: 120m)									
FECHA	2012/6/10	PARÉMTROS ATMOSFERICOS			Ecuación de TA:		0.9907*X-1.9423		VALIDACION CRUZADA		
Estación	HR (%)	Trans	R a	R d	TS	TA	TS	TA	Ec. TA	TA calc.	Error TA
Jipiro	74.6	0.76	1.59	2.55	NB	15.3			-	-	-
Malca	49.5	0.65	2.59	4.06	21.99	24.2	21.74	24.2	0,966x - 1,7533	19.25	-4.95
Militar	68.31	0.74	1.77	2.84	NB	17.36			-	-	-
San Pedro	67.7	0.77	1.57	2.53	20.39	16.6	18.19	16.6	1,1961x - 5,026	16.73	0.13
Tecnico	78.41	0.78	1.45	2.33	18.89	14.16	16.96	14.16	1,1893x - 4,7471	15.42	1.26
UTPL	64.45	0.76	1.59	2.56	20.5	16.46	20.01	16.46	1,2813x - 6,0833	19.56	3.10
Cerro Ventanas	89.76	0.67	0.98	3.41	12.22	10.46	13.57	10.46	1,153x - 4,1483	11.50	1.04
Cerro Villonaco	89.23	0.85	0.95	1.56	10.51	9.31	10.76	9.31	1,4588x - 10,148	5.55	-3.76
Cariamanga	88	0.71	2.09	3.3	20.45	19	20.42	19	1,2109x - 5,2318	19.49	0.49
Celica	ND	-	-	-	-	-			-	-	-
La Argelia	71	0.76	1.63	2.62	NB	16.5			-	-	-
										Prom.	±2,11

SIMBOLOGÍA	DEFINICIÓN
HR (%)	Humedad Relativa en %
Trans	Trasmitancia atmosférica
Ra	Radinacia ascendente
Rd	Radinacia descendente
TS	Temperatura superficial
TA	Temperatura del aire
Ec. TA	Ecuación de Validación Cruzada
TA calc.	TA de Validacion Cruzada
Error TA	Error de Validación Cruzada
ND	Sin datos
NB	Píxel afectado por nube

Fuente: El Autor
Elaboración: El Autor.