

**CORRELACION ENTRE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL SENSOR MODIS Y
LA TEMPERATURA MÁXIMA Y MÍNIMA DEL AIRE EN EL DEPARTAMENTO DE
LA GUAJIRA, COLOMBIA**

ALEJANDRA MARTÍN GARZÓN

**UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL E INGENIERÍA CIVIL
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
BOGOTÁ D.C.**

2021

**CORRELACION ENTRE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL SENSOR MODIS Y
LA TEMPERATURA MÁXIMA Y MÍNIMA DEL AIRE EN EL DEPARTAMENTO DE
LA GUAJIRA, COLOMBIA**

ALEJANDRA MARTÍN GARZÓN

Trabajo de investigación presentado para obtener el título de:
Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Director:
ANDRÉS FELIPE CARVAJAL VANEGAS, Dr.

**UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL E INGENIERÍA CIVIL
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
BOGOTÁ D.C.
2021**

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	4
INTRODUCCIÓN	5
1. OBJETIVOS	6
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	6
1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	6
2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL CONOCIMIENTO	7
Marco Teórico	7
Estado del conocimiento.....	9
3. METODOLOGÍA.....	11
3.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	11
3.2. DESCRIPCION DE LOS DATOS	12
Temperatura máxima y mínima diaria	12
Información de Sensores Remotos	12
3.3. ANÁLISIS ESTADISTICO	13
3.4. PROCEDIMIENTO.....	14
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	16
5. CONCLUSIONES	22
6. RECOMENDACIONES	23
7. BIBLIOGRAFÍA	24

RESUMEN

La baja densidad de estaciones meteorológicas en el departamento de La Guajira ocasiona que haya un déficit de información climática actualizada y de alta precisión en las zonas más remotas de la región. Los datos obtenidos a partir de sensores remotos, por su continuidad espacial, pueden ayudar al mejoramiento de las estimaciones de esta información climática. Por lo anterior, el presente documento tiene como objetivo determinar y evaluar la correlación que existe entre la temperatura máxima y mínima del aire y la temperatura superficial LST diurna y nocturna del sensor MODIS en el departamento de La Guajira. Para ello, se extrajo los datos disponibles en la región de las estaciones y el sensor en el periodo comprendido entre el 1 de enero de 2015 y el 31 de diciembre de 2019. A partir de estos datos, se realizaron regresiones lineales en cada una de las estaciones y se determinó el grado de correlación de la información. Los resultados arrojaron correlaciones superiores a 0,50 entre $T_{a_{max}}$ y la temperatura superficial diurna, en cuanto a las mediciones de $T_{a_{min}}$ y la temperatura superficial nocturna se obtuvo correlaciones inferiores a 0,60 en casi todas las estaciones. Los datos mixtos mostraron correlaciones muy buenas, obteniendo valores superiores a 0,85. Estos resultados llevan a concluir que la determinación de la temperatura máxima y mínima del aire a partir de la temperatura superficial del sensor MODIS tiene un bajo ajuste con las mediciones in situ.

Palabras Clave: Temperatura del aire, temperatura superficial, MODIS, La Guajira.

ABSTRACT

Low density of meteorological stations in La Guajira state causes a deficit of up-to-date and high-precision climate information in most of the remote areas on the region. Data obtained from remote sensors, due to their spatial continuity, can help to improve estimations of this climate information. Therefore, the objective of this document is to determine and evaluate the correlation that exists between maximum and minimum air temperature and daytime and nighttime land surface temperature of MODIS sensor in La Guajira state. In order to do this, stations and sensor data available in the region were extracted in the period between January 1, 2015 and December 31, 2019. From these data, linear regressions were performed in each station and correlation of the information was determined. The results yielded correlations greater than 0.50 between $T_{a_{max}}$ and daytime surface temperature. For $T_{a_{min}}$ measurements and nighttime surface temperature, were obtained correlations less than 0.60 in almost all stations. Mixed data showed very good correlations, obtaining values higher than 0.85. These results lead to the conclusion that the determination of the maximum and minimum air temperature from land surface temperature of MODIS sensor has not a good fit with in situ measurements.

Key Words: Air Temperature, Land Surface Temperature, MODIS, La Guajira.

INTRODUCCIÓN

Las estaciones meteorológicas se encuentran ubicadas en zonas muy puntuales como aeropuertos, zonas de investigación o zonas urbanas, los cuales tienen un gran interés en mantener un monitoreo continuo de las variables climáticas. Estas mismas estaciones suelen utilizarse para la generación y actualización de mapas nacionales y regionales de variables climáticas mediante interpolación de la información entre sus ubicaciones (Hereher, 2019). Sin embargo, muchas regiones con poca población no cuentan con ninguna estación meteorológica así que la información disponible no está soportada en mediciones sino en estimaciones.

El departamento de La Guajira cuenta con una baja densidad de estaciones meteorológicas. De acuerdo con documento sobre *“Calidad, Robustez y Precisión Estadística de la Información para el Diseño del Seguro Agropecuario Catastrófico en Colombia”* emitido por Finagro, el departamento cuenta con una densidad de 0.41 estaciones/100km². Además, específicamente para las variables de temperatura del aire, cuenta con 0.10 estaciones/100km² para la medición de temperatura máxima y mínima del aire, y 0.19 estaciones/100km² para la medición de temperatura media del aire (Finagro, 2017). Considerando que la información de las estaciones meteorológicas del departamento ofrece datos precisos y en tiempo real, pero en una zona muy puntual, las estimaciones o interpolaciones realizadas a partir de estas presentan una alta incertidumbre en la mayor parte del territorio.

Por lo anterior, en este documento se propone un procedimiento para determinar una relación entre la temperatura superficial, determinada a partir de imágenes MODIS LST (land Surface temperature), y la temperatura máxima ($T_{a_{max}}$) y mínima ($T_{a_{min}}$) del aire medida en las estaciones meteorológicas que opera el IDEAM en el departamento. Con esto se busca determinar la viabilidad de la obtención de los datos de temperatura del aire a partir de sensores remotos, particularmente del sensor MODIS.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la correlación entre la temperatura superficial y la temperatura máxima y mínima del aire para el departamento de La Guajira, mediante información obtenida de imágenes MODIS LST y las estaciones meteorológicas del departamento.

1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

Analizar las series de datos de temperatura del aire máxima ($T_{a_{max}}$) y mínima ($T_{a_{min}}$) diaria y de la temperatura de superficie del sensor MODIS en el departamento de La Guajira.

Determinar el grado de correlación entre la temperatura máxima y mínima del aire y la temperatura superficial diaria en el departamento de La Guajira.

Evaluar el modelo de regresión que permita la estimación de la temperatura máxima y mínima del aire a partir de imágenes de LST del sensor MODIS en el departamento de La Guajira.

2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL CONOCIMIENTO

Marco Teórico

La temperatura es definida por la Organización meteorológica mundial (OMM,1992) como *“una cantidad física que caracteriza el movimiento aleatorio medio de las moléculas en un cuerpo físico.”* Lozano (2018) también la define como *“una magnitud física, o propiedad, resultado de la energía cinética de las partículas de un sistema”* (Lozano, 2018).

La temperatura del aire, según lo dispuesto por la organización meteorológica mundial, es el registro medido con un termómetro o termógrafo ubicado a 2 metros de altura sobre el suelo (Cuadros Rubio, 2011). Tal como lo menciona Benali et al., (2012) es una variable muy difícil de modelar por la heterogeneidad de las condiciones ambientales, ya que se ve afectada por diversos factores los cuales son principalmente la radiación influenciada también por la latitud, la altitud, la cobertura de nubes y el material particulado presente en la atmosfera.

Esta medición de la temperatura del aire es muy importante para la comprensión de procesos que se dan entre la atmosfera y el suelo, además tiene un amplio rango de aplicabilidad en diferentes áreas como industria, ciencias de la salud, agricultura, estudios hidrológicos, procesos en la biosfera y cambio climático. (Fu et al., 2011)

En el departamento de La Guajira los promedios de temperatura máxima del aire pueden llegar a superar los 34°C y se presentan durante los meses de junio y agosto. Por otra parte, los promedios de temperatura mínima del aire se presentan durante los meses de diciembre a marzo, y pueden registrarse por debajo de los 23°C, debido a la presencia de los vientos alisios que no permiten la formación de abundante nubosidad y por ende la irradiación no se mantiene entre el techo de nubes y la tierra.

Para la determinación de la temperatura del aire en regiones con poca población es necesario realizar interpolaciones entre las estaciones meteorológicas cercanas. El *“Instructivo para la elaboración del mapa de temperatura promedio mensual y trimestral”* emitidos por el IDEAM, especifica que para la generación de mapas de temperatura del aire se realiza una interpolación kriging entre las estaciones meteorológicas considerando el gradiente altitudinal. Al contar con una baja densidad de estaciones, las interpolaciones tienen poca fiabilidad, ya que las aproximaciones son buenas en zonas cercanas a la estación pero su precisión disminuye en largas distancias (Vancutsem et al., 2010).

En ausencia de información confiable, se ha llevado a plantear alternativas para una aproximación de temperatura con mayor precisión y temporalidad. Esta necesidad ha desencadenado el desarrollo de investigaciones basadas en información de sensores remotos para cubrir las áreas donde no hay registros de datos. Una de las alternativas propuestas es la determinación de la temperatura del aire a partir de la temperatura de la superficie, la cual se puede obtener mediante

imágenes satelitales descargables de algunos de los sensores remotos como MODIS o ASTER, los cuales proporcionan información de toda la cobertura terrestre con una alta frecuencia.

La temperatura superficial es la temperatura radiante de la superficie terrestre. Este es un indicador importante en el monitoreo del cambio climático. Esta es controlada por las interacciones entre la atmósfera y el suelo y los flujos de energía (Benali et al., 2012). Las series de datos LST no solo son necesarios para la investigación de cambio climático y sequía en varias escalas espaciales, sino que también son elementos importantes para mejorar los modelos de predicción hidrológica y climática global. En particular, el LST influye directamente en la dinámica de los glaciares. A su vez, estos cambios afectan directamente las condiciones de vida de casi el 40% de la población mundial (Zhao et al., 2020).

La temperatura superficial depende “*las diferencias cuantificables entre la radiación emitida por los cuerpos y la emisión del Sol*” según lo establece Díaz & Ricardo, (2009). Para su medición se utilizan generalmente tres métodos: i) medición con termómetros infrarrojos manuales, ii) termómetros de infrarrojos montados en torres, y iii) observaciones satelitales. Esta temperatura está fuertemente ligada a la temperatura del aire debido al intercambio de calor que se da entre los medios, así, el ambiente estará transfiriendo continuamente calor a la superficie y viceversa. Esto también se ve muy influenciado por el tipo de cobertura presente en la zona.

Los sensores remotos determinan temperatura de la superficie LST (Land Surface Temperature) a partir de la emisión solar y de la radiación emitida por la superficie. Las imágenes satelitales LST son productos obtenidos de las bandas del infrarrojo térmico en su mayoría, cuyas longitudes de onda comprende el rango de 8 a 15 μm (Tomlinson et al., 2011), los cuales, luego de realizar las respectivas correcciones atmosféricas, se procesan mediante algoritmos para obtener la temperatura de superficie, teniendo en cuenta efectos atmosféricos, angulares y de emisividad (Díaz & Ricardo, 2009).

Entre los sensores remotos que ofrecen imágenes de temperatura de superficie LST esta MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). MODIS consta de dos satélites, Aqua y Terra, que hacen parte del programa EOS (Earth Observing System) de la NASA. Aqua y Terra fueron lanzados por la NASA en diciembre de 1999 y mayo de 2002 respectivamente. Estos satélites cubren toda la superficie terrestre cada 1-2 días obteniendo información en 36 bandas espectrales que presentan longitudes de onda entre 0,4 y 14,385 μm (Cao, 2020). En cuanto a resolución espacial, la serie MODIS presenta: 2 bandas a 250 m nadir, 5 bandas a 500 m, y las restantes 29 bandas a 1 km (*MODIS Web*, s. f.).

Órbita	Altitud: 708 km (Terra) y 705 km (Aqua), pasando en el ecuador a 10:30 a.m. nodo descendente (Terra) y a la 1:30 p.m.; nodo ascendente (Aqua), heliosíncrona, casi polar, circular.
Tasa de escaneo	20.3 rpm, ortogonal a la órbita
Dimensiones de la franja escaneada	2.330 km (ortogonal) por 10 km (a lo largo de la órbita, al nadir)
Telescopio	17.78 cm diámetro con planos de desvío intermedarios
Tamaño	1.0 x 1.6 x 1.0 m
Peso	228.7 kg
Poder	162.5 W (promedio orbital)
Tasa de transferencia de datos	10.6 Mbps (pico); 6.1 Mbps (promedio orbital)
Codificación	12 bits
Resolución espacial	250 m (bandas 1-2) 500 m (bandas 3-7) 1000 m (bandas 8-36)
Vida útil	6 años

Tabla 1. Características del sensor MODIS. Fuente: Mas, J.-F. (2011). Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio. México D.F.

Los productos LST de los sensores MODIS Aqua y Terra están muy generalizados debido a su resolución espacial y temporal, y fácil accesibilidad. Este producto utiliza el algoritmo de ventana dividida, el cual utiliza dos canales TIR para la obtención de la temperatura de superficie LST (Samaniego Orellana, 2020).

A partir de estas imágenes LST del sensor MODIS, se ha planteado en este documento determinar una correlación entre la temperatura superficial y la temperatura del máxima y mínima del aire en el departamento de La Guajira. Para este objetivo se ha realizado una consulta de estudios adelantados en este tema.

Estado del conocimiento

Varios autores proponen un análisis estadístico para la determinación de la temperatura del aire. Bahi et al., (2016) realizaron una estimación de temperatura del aire máxima y mínima diaria a partir de imágenes satelitales MODIS en la ciudad de Casablanca, Marruecos. Para esto establece 6 modelos para encontrar el más satisfactorio entre los mismos. Los valores de correlación obtenidos fueron bastante buenos, obteniendo $R^2 = 0,775$ para la temperatura máxima y $R^2=0.921$ para la temperatura mínima.

Vancutsem et al., (2010) realizan también un análisis estadístico para diversos ecosistemas africanos en donde concluyen que la correlación de productos MODIS diurnos con la temperatura máxima del aire varía mucho de acuerdo con las regiones y temporadas, mientras que la temperatura mínima tenía un ajuste mayor con las imágenes LST nocturnas. Además, se obtuvo mejores correlaciones en las estimaciones con datos diarios realizadas que en las estimaciones que consideraron datos semanales (8 días).

Morales Salinas et al., (2018) realizan un análisis de las temperaturas extremas, es decir, temperatura máxima y mínima diaria del aire, y un análisis mixto de temperatura en Santiago de Chile a partir de datos de temperatura en superficie diurna y nocturna obtenidos del sensor MODIS e información de temperatura del aire obtenida de la red nacional de estaciones meteorológicas. A partir de los datos de las estaciones y las imágenes satelitales se determinó una ecuación mediante la cual se relacionó estas dos variables de modo que se pudiese obtener la temperatura local del aire a partir del valor del píxel LST registrado. Los resultados arrojaron que el coeficiente de determinación para los datos diurnos se encontró entre 0,23 y 0,59, por otro lado, para los datos nocturnos el coeficiente se encontró entre 0,04 y 0,32. También, para el análisis mixto que consideró los datos diurnos y nocturnos simultáneamente, la correlación fue mayor encontrando un ajuste entre 0,66 y 0,86.

Hereher (2019) propone utilizar información de sensores remotos para extraer los valores de temperatura promedio mensual máxima y mínima del aire en los desiertos del Sultanato de Omán. Para ello recoge la información de 12 estaciones meteorológicas disponibles. Los resultados arrojaron una alta correlación. Los coeficientes de determinación R^2 obtenidos se encontraron entre 0,72 y 0,92 para la relación diurnos/máximos, y entre 0,82 y 0,94 para la relación nocturnos/mínimos.

Observando análisis en regiones más cercanas y similares a La Guajira, Samaniego (2020) realiza varios modelos de regresión en los Andes del sur del Ecuador utilizando, además de imágenes satelitales LST, variables auxiliares que permitieron mejorar las estimaciones a partir de las cuales obtuvieron valores de correlación $r =$ entre 0.775 y 0.820. Samaniego concluye que entre las variables auxiliares de mayor rendimiento se encuentra la altitud, lo que concuerda con los modelos de estimación de temperatura del aire realizados en Colombia.

Galvis Causil, Stephanie et al., (2017) realizan la estimación de la temperatura superficial LST para una imagen Landsat 8 del año 2016 con un porcentaje de nubosidad menos al 10%, que cubre el área urbana del municipio de Ibagué, Tolima. La estimación es realizada a partir de datos del espectro visible, infrarrojo y térmico con una resolución espacial de 30m.

Soto-Soto et al., (2020) buscan caracterizar el fenómeno de Islas de Calor Urbano en la ciudad de Armenia, y detectar la relación con la pérdida de vegetación utilizando imágenes Landsat. Para ello utilizan técnicas de discriminación de coberturas y un algoritmo mono-canal que corrigió la temperatura de brillo. Por último, determinan una correlación entre la vegetación y la temperatura superficial.

3. METODOLOGÍA

3.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El departamento de La Guajira se encuentra ubicado al norte de Colombia. Posee un territorio que comprende 20.848 km² (ver Ilustración 1). Sus fronteras geográficas son: Al norte y oeste con el mar Caribe, al este con Venezuela, al sur con el departamento del Cesar y al suroeste con el departamento del Magdalena (La Guajira - GOBERNACIÓN DE LA GUAJIRA, s. f.).

Este territorio es, en su mayoría, árido o semiárido. En la mayoría de su territorio, especialmente hacia la parte de la alta y media Guajira su territorio es plano, contando con algunas serranías bajas de no más de 650 msnm. Más al sur, en la región conocida como la baja Guajira, su territorio tiene las mayores elevaciones en los territorios limitantes con la sierra nevada de Santa Marta y la serranía del Perijá. La Guajira cuenta con una temperatura cálida cuyos valores promedio se encuentran entre 35°C-40°C (Martínez, 2019).

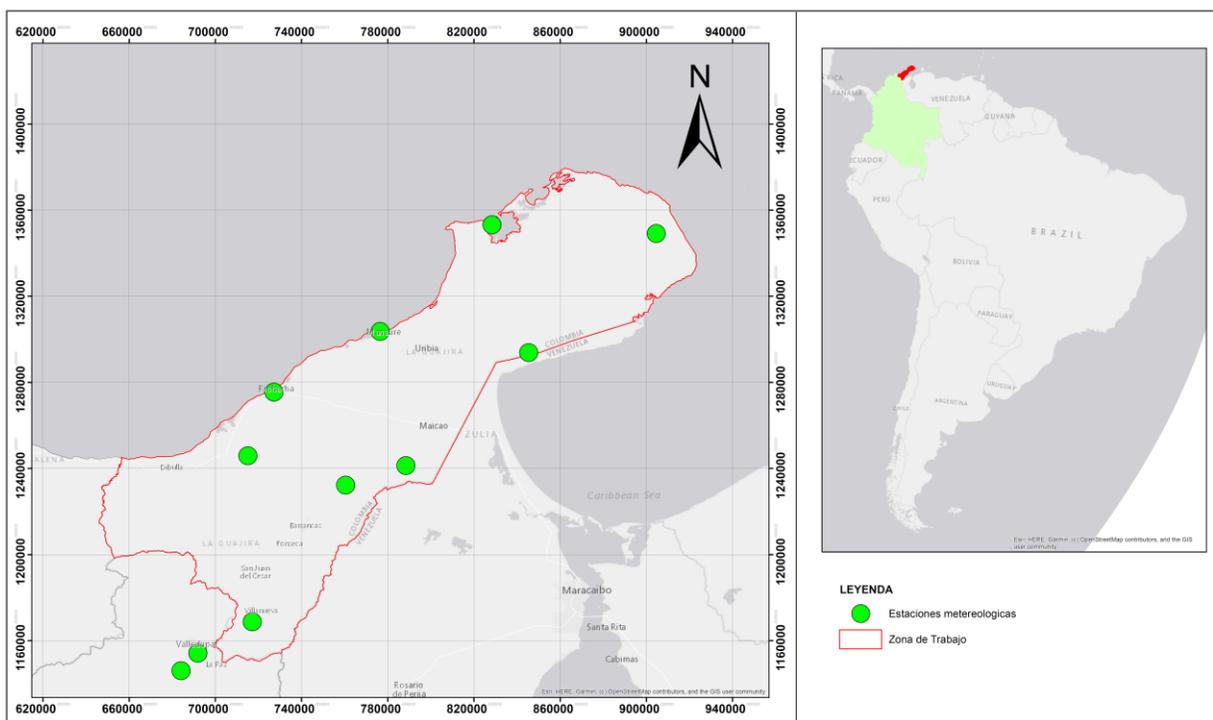


Ilustración 1. Delimitación de zona de trabajo y red de estaciones meteorológicas. Fuente: Elaboración propia.

3.2. DESCRIPCION DE LOS DATOS

Para la estimación de la temperatura del aire en el departamento se consideraron dos fuentes de información:

Temperatura máxima y mínima diaria

La temperatura máxima ($T_{a_{max}}$) y mínima ($T_{a_{min}}$) diaria entre el 1 de enero de 2015 y el 31 de diciembre de 2019, de provenientes de nueve estaciones meteorológicas disponibles en el departamento de La Guajira que tenían información registrada, y otras dos estaciones del departamento del Cesar que se encuentran en ubicadas cerca de la frontera entre los departamentos del Cesar y La Guajira. Se utilizó el software Microsoft Excel para organizar y procesar los datos. A continuación, se presenta el listado de estaciones disponibles en el departamento:

Código Estación	Nombre Estación	Latitud	Longitud
15045010	MATITAS	11.2638889	-73.030278
15065180	AEROPUERTO ALM. PADILLA	11.5296111	-72.917667
15065501	LA MINA CERREJON - AUT	11.1375833	-72.615944
15075030	MANAURE	11.7810556	-72.4635
15075501	AEROPUERTO PUERTO BOLIVAR - AUT	12.2243056	-71.982889
15085020	NAZARETH	12.1788889	-71.283889
15085030	ESCUELA AGRICOLA CARRAIPIA - AUT	11.21675	-72.359944
15085040	RANCHO GRANDE	11.6860556	-71.833056
28015070	URUMITA	10.5663889	-73.016389
28025502	AEROPUERTO ALFONSO LOPEZ -	10.4361667	-73.247667
28035020	CALLAO EL	10.3630556	-73.319444

Tabla 2. Listado de estaciones meteorológicas.

Información de Sensores Remotos

Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron imágenes MODIS LST del satélite Aqua, con resolución espacial de 1 km y resolución temporal de 1 día. El producto en mención es *Aqua daily Land Surface Temperature & Emissivity (MYD11A1)* que corresponde a los datos de temperatura superficial de la tierra. Este producto satélite registra dos mediciones por día, a las 13h30 y a la 01h30. Se consideró la información asociada al periodo comprendido entre el 1 de enero de 2015 y el 31 de diciembre de 2019.

De las imágenes de la zona de trabajo se extrajo la información correspondiente las bandas LST_Day_1km y LST_Night_1km de los puntos donde se encuentran ubicadas las estaciones meteorológicas mediante la aplicación AppEARS dispuesta en la página de la USGS, simplificando el proceso de obtención de la información. Los datos LST obtenidos del sensor remoto se encuentran en grados Kelvin, y ya se le ha aplicado el factor de escalamiento recomendado de 0,02 (Wan, Zhengming et al., 2015).

Para el procesamiento de la información, fue necesario en principio transformar los datos de grados Kelvin (K) a grados Celsius (°C), esto se realizó utilizando la *Ecuación 1*.

$$C = K - 273,15 \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

C = Temperatura superficial en grados Celsius

K = Temperatura superficial en grados Kelvin

Posteriormente, fue necesario depurar la información pues varios de los pixeles no registraban ninguna información en algunas fechas, lo que quedó registrado con un valor de 0K (-273,15°C), datos que no fueron tenidos en cuenta para realizar las regresiones.

3.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los datos fueron organizados y depurados en el software Microsoft Excel, como ya se hizo mención, se descartaron los registros donde no se tenía información de temperatura del aire máxima ($T_{a_{max}}$) y mínima ($T_{a_{min}}$). Todos los registros se consideraron para realizar la regresión

Código Estación	Nombre Estación	# Registros $T_{a_{max}}$	# Registros $T_{a_{min}}$
15045010	MATITAS	407	293
15065180	AEROPUERTO ALM. PADILLA	681	648
15065501	LA MINA CERREJÓN - AUT	552	400
15075501	AEROPUERTO PUERTO BOLIVAR - AUT	882	768
15085020	NAZARETH	235	304
15085030	ESCUELA AGRICOLA CARRAIPIA - AUT	269	262
15085040	RANCHO GRANDE	863	533
28015070	URUMITA	443	467
28025502	AEROPUERTO ALFONSO LOPEZ	578	426
28035020	CALLAO EL	579	355
	TOTAL	5489	4436

Tabla 3. Número de registro considerados para análisis estadístico.

La estación Manaure, que inicialmente se iba a considerar para realizar la regresión, no registró ningún dato en las imágenes satelitales por lo que fue excluida del análisis.

El modelo de regresión propuesto para el análisis de la información fue el modelo de regresión lineal. Éste supone que la variable dependiente tiene una relación lineal con la variable independiente. Así, poniendo una en función de otra, se puede expresar mediante la expresión:

$$y = ax + b \quad \text{Ecuación 2}$$

El parámetro a se determina mediante la ecuación:

$$a = \frac{(n(\sum x_i y_i) - (\sum x_i)(\sum y_i))}{n(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2} \quad \text{Ecuación 3}$$

El parámetro b se determina a partir de la ecuación:

$$b = \frac{(\sum y_i) - a(\sum x_i)}{n} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

n es el número de medidas

También se determinó el coeficiente de correlación de Person r para indicar la confiabilidad de la regresión generada a partir de estas series de información. Este coeficiente toma valores entre 1 y -1 en donde:

Si $r = -1$ todos los puntos se encuentran en una recta, marcando una tendencia lineal perfecta e inversa.

Si $r = 0$ no hay ninguna correlación entre los puntos.

Si $r = 1$ todos los puntos se encuentran en una recta, marcando una tendencia lineal perfecta y directa.

El coeficiente de correlación de Pearson se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$r = \frac{n(\sum x_i y_i) - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{[n(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2][n(\sum y_i^2) - (\sum y_i)^2]}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

n es el número de medidas

Sampieri et al., (2006), establecen una escala de confiabilidad a partir de los valores de correlación que se obtengan del análisis estadístico. Se tiene entonces los siguientes rangos:

COEFICIENTE	INTERPRETACION
r=1	Correlación perfecta
0.80<r<1	Muy alta
0.60<r<0.8	Alta
0.40<r<0.6	Moderada
0.20<r<0.4	Baja
0<r<0.20	Muy baja
r=0	Nula

Tabla 4. Escala de correlación. Fuente: Sampieri, R. H., Collado, C. F., & Lucio, P. B. (2006). Metodología de la investigación.

Para la validación de la regresión entre la temperatura máxima y mínima diaria del aire y la temperatura de superficies LST su utilizará uno de los indicadores más utilizados, que es el indicador del error cuadrado medio RMSE, el cual representa el promedio de desviación dentro del conjunto de datos analizado. Este indicador se determina a partir de:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 \right)} \quad \text{Ecuación 6}$$

En donde:

n es el número de datos

\hat{y}_i es el valor estimado a partir de la regresión

y_i es el valor medido

3.4. PROCEDIMIENTO

Para la obtención de las regresiones de las estaciones, lo primero que se realizó fue la descarga de la información de las temperaturas máxima y mínima del aire y de las temperaturas LST Modis. Todo el procesamiento posterior a la descarga se realizó en el software Microsoft Excel.

Inicialmente, se procedió a depurar la información, descartando todos los datos en que no se registrara información de las estaciones o del sensor remoto. Luego de esto, se organizó la información de la temperatura máxima, mínima y mixta diaria en hojas separadas. Posteriormente,

se correlacionaron los datos de la temperatura del aire con los datos de la temperatura de superficie LST Modis. El siguiente paso consistió en la determinación de la regresión lineal en cada una de las estaciones. A partir de la ecuación obtenida de las regresiones, se procedió a eliminar los datos atípicos mediante la diferencia entre la temperatura medida y la temperatura calculada $\Delta t = \hat{t}_i - t_i$. Finalmente, se determinó los factores de correlación, determinación y el error cuadrado medio RMSE, mediante los cuales se evaluó el grado de ajuste de la regresión.

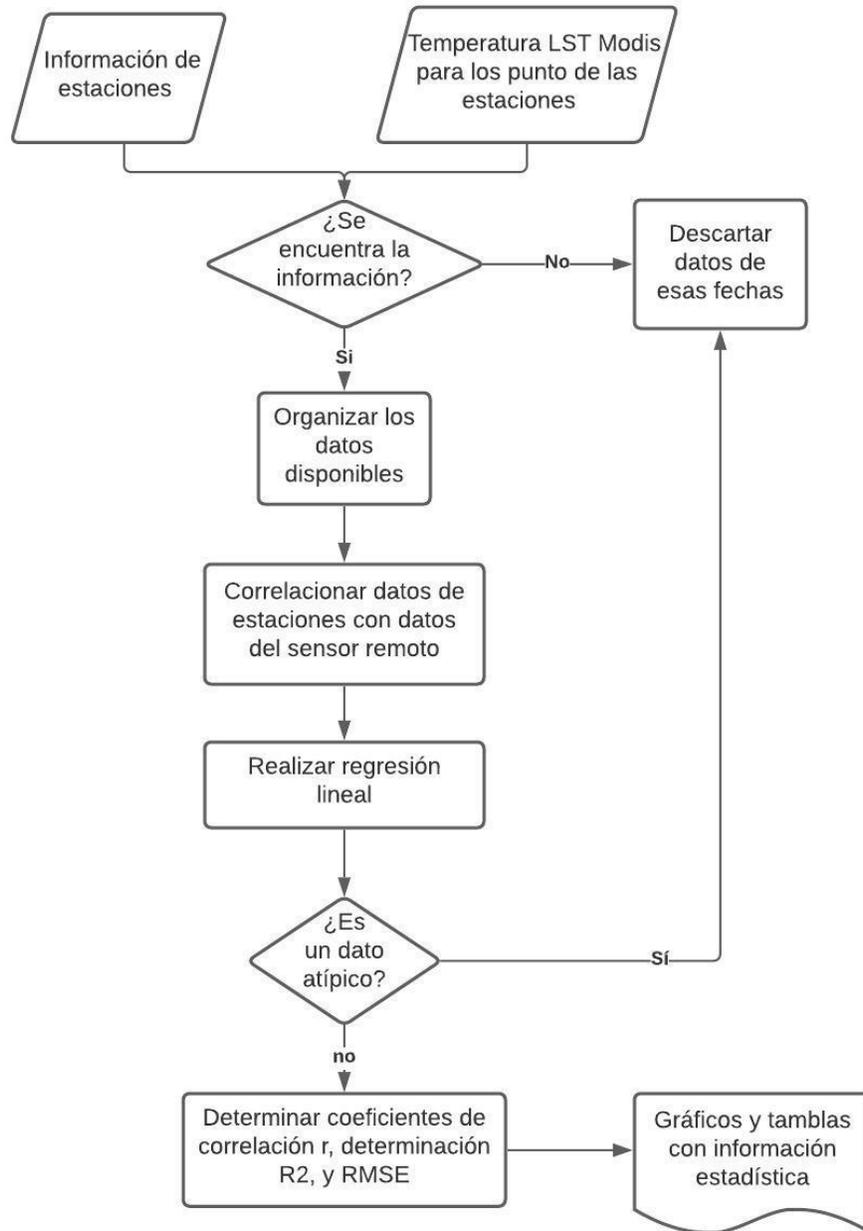


Gráfico 1. Procedimiento realizado para la determinación de las regresiones.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante la evaluación de las series de datos de temperatura del aire máxima ($T_{a_{max}}$) y mínima ($T_{a_{min}}$) diaria de las estaciones meteorológicas y de la temperatura de superficie del sensor MODIS en el departamento de La Guajira, se encontró que los datos faltantes representan el 18,6% de los datos esperados que en total suman 6'802, de los cuales 3'719 corresponden a las mediciones de temperatura máxima diaria ($T_{a_{max}}$) y 3'083 a las mediciones de temperatura mínima diaria ($T_{a_{min}}$). También, tras validar la información proveniente del sensor remoto MODIS, los datos que fueron descartados por falta de información en los píxeles registrados por el sensor sumaron en total 28'245 que representa el 70% de los datos esperados. De estos datos, 13'420 corresponden a los datos diurnos tomados por el sensor y 14'825 a los datos nocturnos. De estos datos, unos corresponden a la estación "Manaure" que se listó en la Tabla 2, la cual no contaba con ningún registro del sensor remoto por lo que se descartó completamente de los análisis; al verificar el porqué de esto se encontró que la estación está ubicada a varios metros de la línea costera, es decir, la superficie allí es agua. El sensor MODIS LST no registra datos de temperatura del agua, esto se obtiene a partir de otro producto. Finalmente, con los datos depurados y luego de analizar la información disponible, se descartaron 104 datos (0,3% del total de datos mencionados en la Tabla 3. Número de registro considerados para análisis estadístico. Tabla 3), 23 correspondientes a las temperaturas máximas/diurnas y 81 a las temperaturas mínimas/nocturnas, pues se catalogaban como datos atípicos ya que la relación entre T_a y temperatura de superficie se encontraba muy lejana a las líneas de tendencia.

Respecto al grado de correlación entre la temperatura máxima y mínima del aire y la temperatura superficial diaria en el departamento de La Guajira. En general, los mejores ajustes se obtuvieron con los datos diurnos. Los coeficientes de correlación para los datos de día presentan valores entre 0,29 y 0,85. De las diez estaciones, dos tuvieron una baja correlación presentando valores de r entre 0,30 y 0,40; tres tuvieron una correlación moderada con valores de r entre 0,40 y 0,60; cuatro estaciones mostraron correlaciones altas con valores entre 0,60 y 0,80; y una estación presentó una correlación muy alta con $r=0,85$ (Tabla 5).

En cuanto al coeficiente de determinación R^2 , los coeficientes más altos fueron de 0,59 y 0,71 lo que indica que una baja coherencia en las series de datos. El restante de coeficientes presentó valores $<0,50$ lo que indica que la tendencia de los datos tiene muy bajo ajuste a la regresión obtenida (Tabla 5).

Código Estación	Nombre Estación	Correlación r	R ²	Media IDEAM	Media MODIS	Varianza IDEAM	Varianza MODIS	% Datos Faltantes MODIS	% Datos Faltantes IDEAM
15045010	MATITAS	0.37	0.13	34.609	35.039	1.750	21.468	69%	28%
15065180	AEROPUERTO ALM. PADILLA	0.43	0.19	33.663	38.280	5.074	17.463	58%	11%
15065501	LA MINA CERREJON - AUT	0.67	0.46	34.087	35.469	3.888	17.185	65%	15%
15075501	AEROPUERTO PUERTO BOLIVAR - AUT	0.30	0.09	33.994	38.712	2.663	19.650	46%	11%
15085020	NAZARETH	0.65	0.43	31.436	33.979	2.329	23.569	73%	52%
15085030	ESCUELA AGRICOLA CARRAIPIA - AUT	0.57	0.32	33.480	33.678	3.517	26.048	71%	49%
15085040	RANCHO GRANDE	0.47	0.22	33.719	42.717	2.366	22.091	46%	12%
28015070	URUMITA	0.77	0.59	35.465	39.346	3.490	20.884	72%	14%
28025502	AEROPUERTO ALFONSO LOPEZ	0.69	0.48	36.353	42.639	2.835	13.555	81%	2%
28035020	CALLAO EL	0.85	0.72	36.072	38.521	4.569	26.661	65%	10%

Tabla 5. Datos estadísticos de la correlación Temperatura máxima diaria del aire - Temperatura superficial LST

También, al realizar la regresión considerando los datos de temperatura diurnos/máximos de todas las estaciones se obtuvo un coeficiente de correlación $r = 0,51$ que, de acuerdo con la Tabla 4, se encuentra dentro del rango de correlación moderada. El coeficiente de determinación en ese caso fue de $R^2 = 0,25$, lo que indica un bajo ajuste de los datos a la línea de tendencia (Gráfico 2).

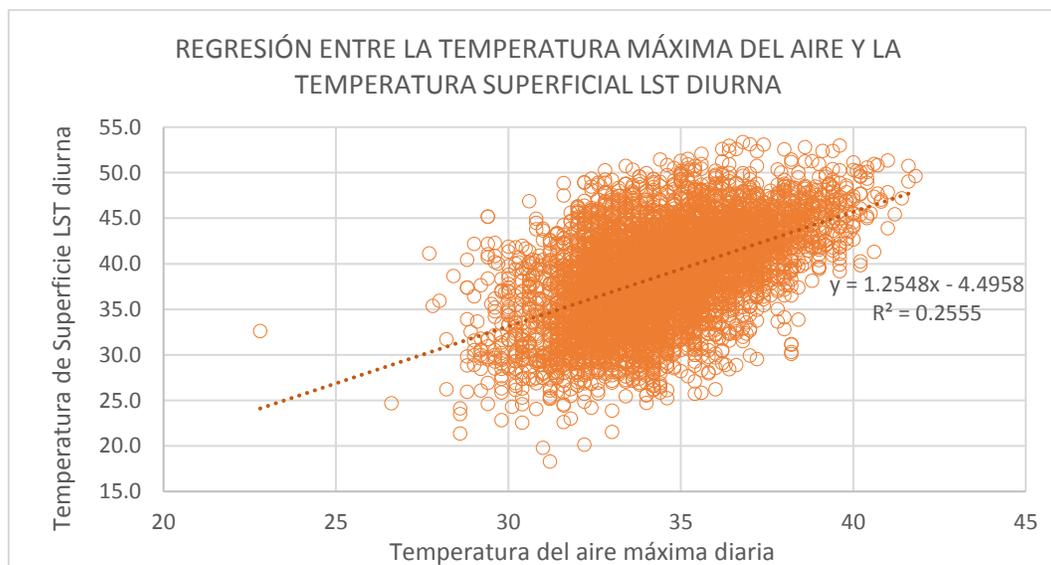


Gráfico 2. Regresión entre la temperatura del aire máxima diaria y la temperatura de superficie LST diurna.

Respecto a los datos nocturnos, se presentaron coeficientes de correlación entre 0,12 y 0,69. De las diez estaciones, una tuvo una correlación muy baja con $r = 0,12$; dos mostraron valores de r entre 0,20 y 0,30 catalogada como una correlación baja; cinco tuvieron una correlación moderada con valores de r entre 0,40 y 0,60; y dos estaciones mostraron correlaciones altas con valores entre 0,60 y 0,80 (Tabla 6).

En cuanto al coeficiente de determinación R^2 , todas las regresiones presentaron valores $<0,50$ lo que indica que la tendencia de los datos tiene un bajo ajuste a la línea de tendencia (Tabla 6).

Código Estación	Nombre Estación	Correlación r	R^2	Media IDEAM	Media MODIS	Varianza IDEAM	Varianza MODIS	% Datos Faltantes MODIS	% Datos Faltantes IDEAM
15045010	MATITAS	0.46	0.21	22.150	22.106	4.479	3.598	79%	24%
15065180	AEROPUERTO ALM. PADILLA	0.45	0.21	24.846	23.568	3.499	3.081	62%	6%
15065501	LA MINA CERREJON - AUT	0.12	0.01	25.152	22.741	1.925	6.151	74%	14%
15075501	AEROPUERTO PUERTO BOLIVAR - AUT	0.53	0.28	25.247	23.834	1.786	1.877	53%	11%
15085020	NAZARETH	0.26	0.07	23.747	21.638	2.173	3.679	75%	34%
15085030	ESCUELA AGRICOLA CARRAIPA - AUT	0.30	0.09	22.606	21.604	1.982	2.282	81%	25%
15085040	RANCHO GRANDE	0.43	0.18	25.791	24.102	1.586	1.435	60%	27%
28015070	URUMITA	0.47	0.22	22.099	23.475	2.084	1.146	70%	14%
28025502	AEROPUERTO ALFONSO LOPEZ	0.65	0.43	24.487	25.200	1.782	1.007	76%	2%
28035020	CALLAO EL	0.69	0.48	23.899	24.653	2.552	1.458	78%	11%

Tabla 6. Datos estadísticos de la correlación Temperatura mínima diaria del aire - Temperatura superficial LST nocturna

En la relación de los datos de temperatura nocturnos/mínimos de todas las estaciones se presentó un coeficiente de correlación $r=0,41$ que, de acuerdo con la Tabla 4, se encuentra dentro del rango de correlación moderada, aunque es mucho menos a la obtenida a partir de los datos diurnos. En cuanto al coeficiente de determinación R^2 , este presentó un valor de 0,17 lo que indica no es representativo y no tiene la confiabilidad para obtener medidas de temperaturas del aire a partir de la relación determinada (Gráfico 3).

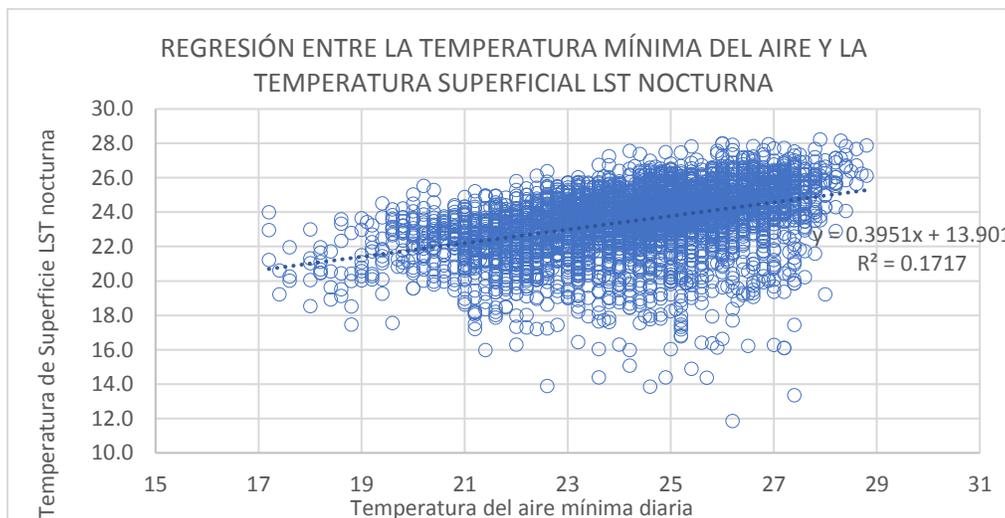


Gráfico 3. Regresión entre la temperatura del aire mínima diaria y la temperatura de superficie LST nocturna.

El último análisis que se realizó fue el mixto, en donde se consideró la temperatura máxima y mínima diaria del aire y la temperatura superficial diaria en el departamento de La Guajira. Este análisis fue

el que arrojó mejores valores de correlación presentando valores mayores a 0,85, considerada como correlación muy alta (Tabla 6).

En cuanto al coeficiente de determinación R^2 , los coeficientes estuvieron entre 0,76 y 0,94, lo que indica que es representativo y tiene alta confiabilidad para obtener medidas de temperaturas del aire a partir de las relaciones determinadas (Tabla 6).

Código Estación	Nombre Estación	Correlación r	R^2	Media IDEAM	Media MODIS	Varianza IDEAM	Varianza MODIS	% Datos Faltantes MODIS	% Datos Faltantes IDEAM
15045010	MATITAS	0.87	0.76	29.73	30.09	39.88	52.46	74%	26%
15065180	AEROPUERTO ALM. PADILLA	0.90	0.81	29.56	31.48	24.03	64.70	60%	9%
15065501	LA MINA CERREJON - AUT	0.91	0.82	30.32	30.10	22.55	52.07	70%	14%
15075501	AEROPUERTO PUERTO BOLIVAR - AUT	0.90	0.81	30.04	32.02	21.51	66.90	49%	11%
15085020	NAZARETH	0.89	0.80	27.38	27.56	16.69	48.98	74%	43%
15085030	ESCUELA AGRICOLA CARRAIPIA - AUT	0.88	0.78	28.44	28.16	32.14	50.02	77%	37%
15085040	RANCHO GRANDE	0.92	0.85	30.77	35.82	16.90	95.43	52%	20%
28015070	URUMITA	0.96	0.92	28.74	31.37	47.49	73.78	71%	14%
28025502	AEROPUERTO ALFONSO LOPEZ	0.97	0.94	31.72	35.83	36.41	82.09	79%	2%
28035020	CALLAO EL	0.94	0.88	31.73	33.57	38.48	62.79	71%	10%

Tabla 7. Datos estadísticos de la correlación Temperatura máxima y mínima diaria del aire - Temperatura superficial LST.

Al realizar la regresión considerando los datos de temperatura máximos y mínimos, y la temperatura LST diurna y nocturna de todas las estaciones se obtuvo un coeficiente de correlación $r = 0,89$ que, de acuerdo con la Tabla 4, se encuentra dentro del rango de correlación muy alta. El coeficiente de determinación en ese caso fue de $R^2 = 0,79$, lo que indica un alto ajuste de los datos a la línea de tendencia (Gráfico 4).

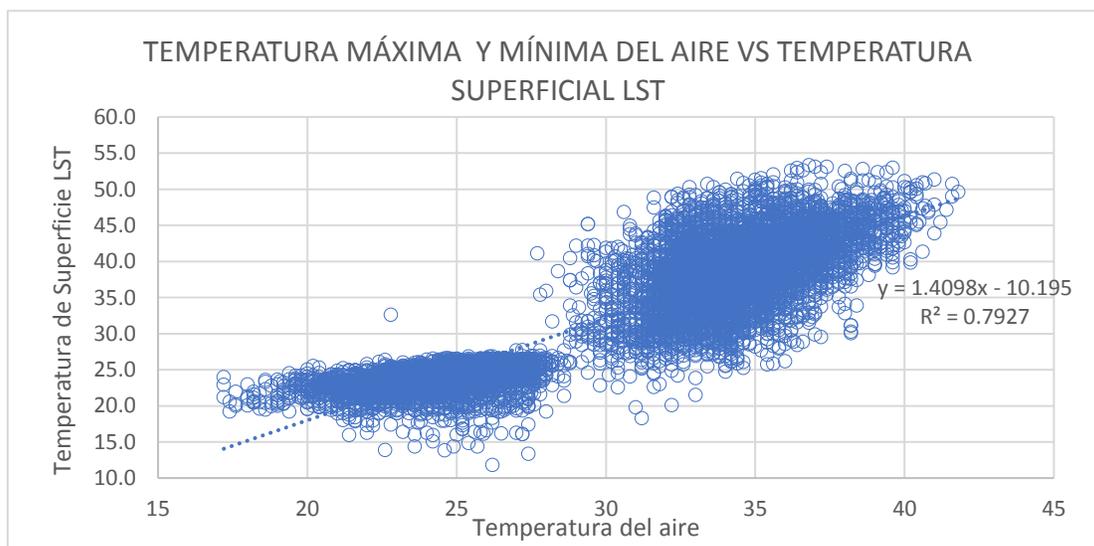


Gráfico 4. Regresión entre la temperatura del aire máxima y mínima diaria y la temperatura de superficie LST.

En cuanto a los modelos de regresión lineal determinados con la Ecuación 2, se tienen los siguientes valores en donde se presentan las pendientes (a) de las líneas de tendencia determinadas y los valores de intercepto (b) con el eje y:

Nombre Estación	Temperatura máxima del aire- Temperatura de superficie LST diurna				Temperatura mínima del aire- Temperatura de superficie LST				Temperatura máxima y mínima del aire-Temperatura de		
	a (pendiente)	b (intercepto)	R ²	RMSE	a (pendiente)	b (intercepto)	R ²	RMSE	a (pendiente)	b (intercepto)	R ²
MATITAS	1.2864	-9.4829	0.13	4.30	0.4214	13.0410	0.21	1.70	0.9976	0.4261	0.76
AEROPUERTO ALM. PADILLA	0.8066	-11.129	0.19	22.57	0.4250	13.008	0.21	1.56	1.4774	-12.191	0.81
LA MINA CERREJON - AUT	1.4188	-12.894	0.46	3.06	0.2081	17.508	0.01	2.46	1.3802	-11.7430	0.82
AEROPUERTO PUERTO BOLIVAR - AUT	0.8075	-11.262	0.09	22.92	0.5451	10.073	0.28	1.16	1.5808	-15.775	0.81
NAZARETH	2.0768	-31.205	0.43	3.67	0.3037	14.679	0.07	1.87	1.5302	-14.341	0.80
ESCUELA AGRICOLA CARRAIPIA - AUT	1.5118	-16.898	0.32	10.16	0.3203	14.363	0.09	1.44	1.0999	-3.121	0.78
RANCHO GRANDE	1.4398	-5.8327	0.22	4.14	0.3652	14.665	0.18	1.08	2.1922	-31.630	0.85
URUMITA	1.8800	-27.327	0.59	3.88	0.3221	16.375	0.22	0.95	1.1923	-2.897	0.92
AEROPUERTO ALFONSO LOPEZ	1.5102	-12.261	0.48	2.66	0.4905	13.190	0.43	0.76	1.4534	-10.271	0.94
CALLAO EL	2.0444	-35.225	0.72	2.75	0.5249	12.109	0.48	0.87	1.1953	-4.260	0.88

Tabla 8. Coeficientes de la ecuación 2 para cada una de las regresiones de las distintas estaciones.

Como se observa en la Tabla 8, hay una alta variabilidad entre las regresiones de temperatura máxima/Temperatura LST diurna y temperatura mínima/temperatura LST nocturna. Las pendientes **a** de la regresión lineal son más pronunciadas en los datos máximos/diurnos, con valores promedio de 1,5, que en los datos mínimos/nocturnos, que presentaron un promedio de 0,4. Igualmente, los valores de intercepto con el eje **b** en los datos máximos/diurnos fue en promedio de -17,4, valor que es muy inferior al presentado en los datos mínimos/nocturnos cuyo promedio fue de 13,9. La regresión donde se consideran tanto temperaturas máxima/diurnas como temperaturas mínimas/nocturnas muestra un ajuste que se aproxima más hacia la regresión de los datos máximos/diurnos. En cuanto al error cuadráticos medio RMSE, los datos máximos/diurnos presentan errores RMSE>2,5°C, entre estos se destacan dos que corresponden a las estaciones meteorológicas “AEROPUERTO ALM. PADILLA” y “AEROPUERTO PUERTO BOLIVAR - AUT”, que tienen RMSE=22,57°C y RMSE=22,92°C respectivamente. El restante de estaciones tiene un RMSE≈3,5°C. Los datos de temperatura mínima/nocturna presentaron RMSE inferiores a 2,5°C.

Los datos obtenidos de las correlaciones de $T_{a_{max}}$ y $T_{a_{min}}$ tuvieron correlaciones bajas. Vancutsem et al., (2010) señalan que estas discrepancias pueden deberse a cuatro factores: i) presencia de agua, ii) contaminación atmosférica iii) efectos direccionales, iv) diferencias espaciales en zonas montañosas. La sensibilidad de valores de emisividad y su efecto directo sobre los resultados de LST puede se puede asociar también a las bajas correlaciones obtenidas. Soto-Soto et al., (2020) sugiere que “se pueden explorar otras alternativas como el modelo global de emisividades de ASTER, su cálculo a partir de NDVI”, o utilizar modelos desarrollados por otros autores que consideren las coberturas vegetales para el ajuste de la temperatura de superficie.

En general, la información presentada muestra que, en el departamento de La Guajira, la temperatura tiene un comportamiento diferente durante el día y la noche. En el Gráfico 4 se observa una variación marcada entre la temperatura máxima y mínima del aire, que, aunque presenta una correlación alta de $r=0,89$, se pueden observar dos grandes nubes de puntos en donde se aprecia que los datos máximos/diurnos tiene una tendencia más inclinada, con una pendiente notablemente mayor a la de los datos mínimos/nocturnos.

En los datos obtenidos, se obtuvo mejores correlaciones entre los datos de $T_{a_{max}}$, con valores de r entre 0,29 y 0,85 y $RMSE > 2,5^{\circ}C$, que en los de $T_{a_{min}}$ que presentaron coeficientes r entre 0,12 y 0,69 y $RMSE < 2,5^{\circ}C$. Esto contrapone a lo registrado por autores como Vancutsem et al., (2010), quienes registran coeficientes de correlación de 0,83 ($T_{a_{max}}$), 0,94 ($T_{a_{min}}$) y 0,82 (T_a), y un $RMSE$ promedio de $2,6^{\circ}C$; Bahi et al., (2016), quienes registran valores de $R^2=0,775$ para la temperatura máxima y $R^2=0,921$ para la temperatura mínima, y $RMSE < 1,33^{\circ}C$; y Fu et al., (2011), quienes registran correlaciones de $T_{a_{min}}$ entre $r=0,81$ y $r=0,83$ y de $T_{a_{max}}$ entre $r=0,28$ y $r=0,3$, y $RMSE < 2,76^{\circ}C$.

La baja correlación presentada puede deberse al elevado porcentaje de datos faltantes de temperatura, tanto en estaciones como en las registradas por el satélite MODIS. Igualmente, si se considera que estos datos son capturados en zonas con alta población (aeropuertos, zonas mineras y otros), se puede intuir que las coberturas pueden tener una alta urbanización o construcción, alterando significativamente el paisaje, y una mayor contaminación ambiental, que como ya se ha hecho mención, tiene una alta incidencia en los registros de temperatura del aire y de temperatura de superficie.

Respecto a las regresiones mixtas realizadas, los resultados arrojados mostraron un mejor ajuste que los obtenidos con los datos extremos ($T_{a_{max}}$ y $T_{a_{min}}$). Se obtuvo correlaciones r mayores a 0,85, y coeficiente de determinación R^2 entre 0,76 y 0,94. Este comportamiento también lo describen Morales Salinas et al., (2018) en la ciudad de Santiago de Chile quienes obtuvieron coeficientes de determinación R^2 entre 0,66 y 0,86. Morales Salinas et al., (2018) también registran mejores correlaciones para los datos de temperatura máxima $T_{a_{max}}$, registrando valores de R^2 entre 0,23 y 0,59, que para los datos de temperatura mínima $T_{a_{min}}$, que registraron valores de R^2 entre 0,04 y 0,32.

5. CONCLUSIONES

- Las correlaciones obtenidas considerando los valores mixtos, temperatura máxima ($T_{a_{max}}$) y mínima ($T_{a_{min}}$) diaria, fueron muy altas, con valores superiores a 0,85. En cuanto a los valores extremos, se obtuvieron correlaciones, entre $T_{a_{max}}$ y la temperatura superficial LST diurna, altas-moderadas, con coeficientes de correlación superiores a 0,50 en la mayoría de las estaciones analizadas. En contraparte, las correlaciones obtenidas para las mediciones de $T_{a_{min}}$ y la temperatura superficial LST nocturna fueron bajas, solo el 20% de estaciones presentaron valores de r superiores a 0,60. Esto indica que las regresiones se podrían ajustar mejor a la temperatura media del aire que a los valores extremos de temperatura diaria.
- Alrededor del 70% de los datos se anularon debido a que no se contaba con información del sensor remoto en los puntos analizados. Igualmente, varios datos no fueron registrados por las estaciones meteorológicas, algunas por periodos continuos. Aunque se considera que los datos analizados fueron suficientes, se debe considerar esto en próximas investigaciones ya que es importante tomar una serie temporal adecuada para no tener inconvenientes con los datos faltantes.
- Si bien, las correlaciones obtenidas de los valores extremos, $T_{a_{max}}$ y $T_{a_{min}}$, en varias de las estaciones presentaron correlaciones r superiores a 0,5, se debe centrar en minimizar el error en futuras estimaciones. Para ello se podría incorporar nuevas variables al modelo de regresión.
- Los resultados obtenidos en esta investigación mostraron coeficientes de determinación bajos ($<0,5$) en la mayoría de las estaciones para los valores extremos de temperatura, lo que indica que las regresiones realizadas no son buenas para el cálculo de la temperatura máxima y mínima del aire a partir de la temperatura superficial LST del satélite Modis. Por otro lado, las regresiones realizadas para los datos mixtos mostraron un buen ajuste lo que puede indicar que hay una mayor correlación con la temperatura media del aire.
- Hay varios factores que pueden estar incidiendo en las bajas correlaciones obtenidas para las temperaturas extremas del aire. Entre estas pueden estar: el alto contenido de material particulado, presencia de islas de calor en las ubicaciones de las estaciones, la calibración de los equipos de medición, procesos de inversión térmica en la región, entre otros.

6. RECOMENDACIONES

- Los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas del IDEAM tienen un nivel de aprobación “preliminar” (900). Es posible que, al realizar el mismo análisis con datos validados por la entidad se obtengan mejores resultados.
- Aunque no se obtuvieron las correlaciones esperadas, el uso de productos MODIS, junto con la incorporación de otras variables, puede mejorar las estimaciones de temperatura del aire en los sectores remotos que no realicen captura de información.
- El procesamiento de datos en Excel fue sencillo, aunque extenso, y la organización de los datos requirió un trabajo significativo. Se recomienda evaluar otras herramientas informáticas, como Python o Matlab, que puedan facilitar y agilizar este procesamiento.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Antonio, L.-R., William. (2018). *Clima, hidrología y meteorología.: Para ciencias ambientales e ingeniería*. Universidad Piloto de Colombia.
- Bahi, H., Rhinane, H., & Bensalmia, A. (2016). CONTRIBUTION OF MODIS SATELLITE IMAGE TO ESTIMATE THE DAILY AIR TEMPERATURE IN THE CASABLANCA CITY, MOROCCO. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W1*, 3-11. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W1-3-2016>
- Benali, A., Carvalho, A. c., Nunes, J. p., Carvalhais, N., & Santos, A. (2012). Estimating air surface temperature in Portugal using MODIS LST data. *Remote Sensing of Environment*, 124, 108-121. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.04.024>
- Cao, Z. (2020). Chapter 9—Assessment methods for air pollution exposure. En L. Li, X. Zhou, & W. Tong (Eds.), *Spatiotemporal Analysis of Air Pollution and Its Application in Public Health* (pp. 197-206). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815822-7.00009-1>
- Cuadros Rubio, N. (2011). *Análisis de la variabilidad de la temperatura del aire en regiones de Colombia bajo la influencia de la oscilación Madden—Julian durante los años 1978—2008*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/8422>
- Díaz, C., & Ricardo, I. (2009). *Metodología de validación de productos MODIS para la estimación de temperatura de la superficie en zonas heterogéneas y homogéneas de Colombia*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/10404>
- Finagro. (2017). *DOCUMENTO SOBRE CALIDAD, ROBUSTEZ Y PRECISIÓN ESTADÍSTICA DE LA INFORMACIÓN PARA EL DISEÑO DEL SEGURO AGROPECUARIO CATASTRÓFICO EN COLOMBIA*. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjDuvqK1IfxAhVvElkFHxRqBeMQFjAAegQIAxAF&url=https%3A%2F%2Fwww.finagro.com.co%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2F4._calidad_robustez_y_precision_estadistica.pdf&usg=AOvVaw3N5BkmyPMZcHugBuwAo1p9
- Fu, G., Shen, Z., Zhang, X., Shi, P., Zhang, Y., & Wu, J. (2011). Estimating air temperature of an alpine meadow on the Northern Tibetan Plateau using MODIS land surface temperature. *Acta Ecologica Sinica*, 31(1), 8-13. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2010.11.002>
- Galvis Causil, Stephanie, Prada Castellanos, Romy Verónica, & Correa Ortiz, Luis Carlos. (2017). *Uso de imágenes satelitales Landsat 8 para la estimación de temperatura superficial de la tierra, caso de estudio*. https://biblioteca.umanizales.edu.co/ils/opac_css/index.php?lvl=notice_display&id=58231
- Hereher, M. E. (2019). Estimation of monthly surface air temperatures from MODIS LST time series data: Application to the deserts in the Sultanate of Oman. *Environmental monitoring and assessment*, 191(9), 592. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7771-y>
- La Guajira—GOBERNACIÓN DE LA GUAJIRA*. (s. f.). Recuperado 8 de junio de 2021, de <https://www.laguajira.gov.co/web/la-guajira/la-guajira.html>

- Martínez, A. (2019). *La Guajira: Caracterización departamental y municipal*.
<https://www.repository.fedesarrollo.org.co/handle/11445/3736>
- MODIS Web. (s. f.). Recuperado 18 de junio de 2021, de
<https://modis.gsfc.nasa.gov/about/design.php>
- Morales Salinas, L., Cárdenas Jirón, L., Montaner Fernández, D., Fuentes Jaque, G., Muñoz Aguayo, P., & Neira Román, J. (2018). *Modelo espacialmente explícito de estimación de las temperaturas extremas diarias en la Ciudad de Santiago, Chile, usando imágenes MODIS e información meteorológica*. Asociación Española de Climatología.
<https://repositorio.aemet.es/handle/20.500.11765/9991>
- Samaniego Orellana, L. M. (2020). *Estimación de la temperatura mensual del aire usando imágenes satelitales en una zona de topografía muy variable en los Andes del sur del Ecuador*.
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/78826>
- Sampieri, R. H., Collado, C. F., & Lucio, P. B. (2006). *Metodología de la investigación*. MacGraw-Hill/Interamericana. https://books.google.com.co/books?id=4_kPwAACAAJ
- Soto-Soto, J., Garzón, J., & Jimenez-Cleves, G. (2020). Analysis of urban heat islands using Landsat images: Case study Armenia-Colombia 1996-2018 Contenido. *Espacios*, 41, 9.
- Tomlinson, C., Chapman, L., Thornes, J., & Baker, C. (2011). Remote sensing land surface temperature for meteorology and climatology: A review. *Meteorological Applications*, 18, 296-306. <https://doi.org/10.1002/met.287>
- Vancutsem, C., Ceccato, P., Dinku, T., & Connor, S. J. (2010). Evaluation of MODIS land surface temperature data to estimate air temperature in different ecosystems over Africa. *Remote Sensing of Environment*, 114(2), 449-465. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.10.002>
- Wan, Zhengming, Hook, Simon, & Hulley, Glynn. (2015). *MYD11A1 MODIS/Aqua Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1km SIN Grid V006* [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MYD11A1.006>
- Zhao, B., Mao, K., Cai, Y., Shi, J., Li, Z., Qin, Z., Meng, X., Shen, X., & Guo, Z. (2020). A combined Terra and Aqua MODIS land surface temperature and meteorological station data product for China from 2003 to 2017. *Earth System Science Data*, 12(4), 2555-2577.
<https://doi.org/10.5194/essd-12-2555-2020>