

# Distribución espacial de la precipitación en la provincia de Cienfuegos

## Spatial distribution of precipitation in Cienfuegos province



<https://cu-id.com/2377/v30n4e05>

✉ Sinaí Barcia Sardiñas<sup>1\*</sup>, ✉ Dianelly Gómez Díaz<sup>2</sup>, ✉ Lennis Beatriz Fuentes Roque<sup>2</sup>,  
✉ Endris Yoel Viera González<sup>2</sup>, ✉ Leonardo Mejías Seibanes<sup>2</sup>, Raquel Alejandra Angulo Romero<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Investigador independiente EE. UU.

<sup>2</sup>Centro Meteorológico Provincial de Cienfuegos, Cuba.

**RESUMEN:** El conocimiento de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación constituye un importante insumo para el estudio de las ciencias del ambiente, permitiendo caracterizar las condiciones climáticas de cualquier área sobre la superficie terrestre. La presente investigación tuvo como objetivo: estimar la distribución espacial de la precipitación en la provincia de Cienfuegos en el periodo 1991-2020. Para esto se compararon varios métodos de interpolación (Kriging ordinario, Inverso de la distancia ponderada y Regresión lineal múltiple) y se evaluó de forma objetiva cuál presentaba las mejores posibilidades para lograr el objetivo que se pretendió. Se determinó que el método de Regresión lineal múltiple resulta el más acertado para la estimación de la distribución espacial de las precipitaciones en la provincia de Cienfuegos mostrando una mayor eficiencia y menores errores en comparación con los otros dos. La interpolación espacial de la precipitación mediante el uso de este método permitió la obtención de coberturas continuas estadísticamente confiables de la lluvia en el periodo de estudio. La altura sobre el nivel del mar mostró relación directa significativa en todos los periodos temporales analizados, mientras que la distancia a la costa mostró una relación menos clara. Los mapas climáticos de precipitación mensuales, anuales y estacionales obtenidos constituyen una fuente de información valiosa para la toma de decisiones en las actividades socioeconómicas que se desarrollen, así como guías referenciales para las disímiles investigaciones que necesiten de los datos de esta variable.

**Palabras claves:** Cienfuegos, distribución espacial, interpolación, precipitación, regresión lineal múltiple.

**ABSTRACT:** The knowledge of the spatial and temporal variability of precipitation constitutes an important input for environmental sciences studies, allowing the characterization of the climatic conditions of any area on the Earth's surface. The objective of this research is: Estimate the spatial distribution of precipitation in the province of Cienfuegos in 1991-2020 period. For this, several interpolation methods are compared (Ordinary Kriging, Inverse Distance Weighted and Multiple Linear Regression) and objectively evaluated to know which one presents the best possibilities to achieve the intended objective. It is determined that the Multiple Linear Regression method is the most accurate for estimating the spatial distribution of precipitation in the province of Cienfuegos, showing greater efficiency and lower errors compared to the other two. The spatial interpolation of precipitation using this method allowed obtaining statistically reliable continuous coverage of rainfall in the study period. The altitude shows a significant direct relationship in all the time periods analyzed, while the distance to the coast shows a less clear relationship. The climatic maps of monthly, annual and seasonal precipitation obtained constitute a source of valuable information for decision-making in the socioeconomic activities that are carried out, as well as reference guides for the dissimilar investigations that require data on this variable.

**Key words:** Cienfuegos, multiple linear regression, interpolation, precipitation, spatial distribution.

\*Autor para correspondencia: Sinaí Barcia Sardiñas. E-mail: [sinaibs@gmail.com](mailto:sinaibs@gmail.com)

Recibido: 08/04/2024

Aceptado: 03/06/2024

**Conflicto de intereses:** declaramos, no tener ningún conflicto de interés

**Contribución de los autores:** **Conceptualización:** Sinaí Barcia Sardiñas, Dianelly Gómez Díaz, Endris Yoel Viera González. **Curación de datos:** Sinaí Barcia Sardiñas, Dianelly Gómez Díaz, Lennis B. Fuentes Roque, Endris Yoel Viera González. **Investigación:** Sinaí Barcia Sardiñas, Dianelly Gómez Díaz, Endris Yoel Viera González, Leonardo Mejías Sebanes, Raquel Alejandra Angulo Romero. **Metodología:** Sinaí Barcia Sardiñas, Dianelly Gómez Díaz, Endris Yoel Viera González. **Supervisión:** Sinaí Barcia Sardiñas, Dianelly Gómez Díaz, Endris Yoel Viera González. **Visualización:** Sinaí Barcia Sardiñas, Dianelly Gómez Díaz, Endris Yoel Viera González.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

## INTRODUCCION

La precipitación es una variable climática de gran importancia que ha sido objeto de numerosas investigaciones científicas. Esta es considerada como uno de los factores limitantes para los cultivos ya que su influencia puede ser positiva o negativa y puede actuar directa o indirectamente sobre la vegetación.

Investigaciones han señalado que factores geográficos, como la latitud, la altitud, la proximidad a cuerpos de agua, así como la complejidad del relieve, ejercen una influencia importante en la distribución de las precipitaciones (Nuñez, 2013). La estimación exacta de la distribución espacial de la precipitación requiere una red muy densa de instrumentos y medidas, lo que implica altos costos operativos y muchas veces es necesario estimar las precipitaciones en un punto donde no se registran estaciones (Goovaerts, 2000). Esta situación ocurre frecuentemente en terreno montañoso donde se disponen de pocas estaciones y donde los efectos de la orografía pueden ser altamente influyentes (Hevesi et al., 1992; Hay et al., 1998; Fleming, et al., 2000).

En las últimas décadas, se han desarrollado diversas técnicas de interpolación para estimar la distribución espacial de variables climáticas. Métodos de interpolación locales como los polígonos de Thiessen y el inverso de distancia ponderada (*IDW*) han sido de los más frecuentemente utilizados en la predicción climática y desarrollo cartográfico (New et al., 2000; Vicente et al., 2003), al igual que procedimientos geo-estadísticos como *Kriging*, *co-Kriging* y *Spline* (Vicente et al., 2003; Apaydin et al., 2004; Hong et al., 2005).

Los métodos globales de interpolación permiten el procesamiento de datos topográficos y geográficos, asumiendo la dependencia de la variable a interpolar de otras variables de apoyo. Estos métodos se basan en el uso de modelos estadísticos multivariados que permiten evaluar las relaciones de los datos climáticos con las variables geográficas y topográficas de las estaciones climáticas y su correlación espacial (Ninyerola et al., 2000; Brown y Comrie, 2002). Actualmente, la combinación de modelos de regresión con métodos geo-estadísticos hace posible el desarrollo de cartografía climática con predicciones precisas y mínima varianza espacial (Vicente et al., 2003).

En el caso de las precipitaciones la elección de una metodología adecuada depende de varios factores, como la disponibilidad y calidad de los datos observados, las características espaciales y temporales de las precipitaciones y la topografía del área de estudio.

En Cuba, la distribución espacial de la precipitación ha sido estudiada mediante diversos métodos y

técnicas. Uno de los métodos más tradicionales utilizados es el análisis de isoyetas, que consiste en la interpolación manual de las líneas de igual precipitación sobre un mapa a partir de los datos recogidos en las estaciones meteorológicas. Este método ha sido empleado para la elaboración de mapas de precipitación media anual y de temporada, permitiendo identificar patrones y zonas de mayor o menor pluviosidad en la isla (Martínez y Guevara, 2010). Con la llegada de las tecnologías de la información geográfica (TIG), se han implementado métodos más sofisticados como el uso de sistemas de información geográfica (SIG) y técnicas de interpolación espacial como el *Kriging* (Pérez et al., 2015).

Además, se han utilizado modelos de elevación digital para comprender cómo la topografía influye en la distribución de la precipitación. Hernández et al. (2018) logran identificar la influencia que ejercen algunos factores físico-geográficos como la altitud y la distancia a la costa en la distribución espacio-temporal de la lluvia en algunas zonas de Cuba. Esta investigación revela que no deben establecerse correcciones homogéneas por la altitud en todos los macizos montañosos del país y además logra identificar la influencia que ejerce la distancia a la costa en el régimen de precipitación.

En el ámbito de la modelización climática, se han empleado modelos regionales de clima para simular la distribución espacial de la precipitación bajo diferentes escenarios de cambio climático. Estos modelos permiten proyectar cambios en los patrones de precipitación y evaluar posibles impactos en los recursos hídricos de la isla (Castellanos y Pereira, 2020).

Como antecedentes en la provincia de Cienfuegos sobre el análisis espacial de las precipitaciones se destacan los trabajos de Barcia et al. (2009), Barcia et al. (2012), Barcia y Castillo (2015), entre otros. En el caso de Barcia y Castillo (2015) elaboran por primera vez el Atlas climático de la provincia de Cienfuegos y determinan la distribución espacial de las precipitaciones acumuladas mensuales, anual y por periodo, aplicando la metodología de interpolación basada en el análisis de regresión múltiple. Los resultados de este trabajo son novedosos desde el punto de vista local, aunque se le señala como dificultad la no realización de la validación cruzada para determinar el error de la interpolación.

El objetivo general trazado con este trabajo consistió en: estimar la distribución espacial de la precipitación en la provincia de Cienfuegos en el periodo 1991-2020. Para esto se compararon varios métodos de interpolación y se evaluó de forma objetiva cuál presentaba las mejores posibilidades para lograr el objetivo que se pretendió.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

La provincia de Cienfuegos se ubica en el centro sur de Cuba, entre las coordenadas 21°50' y los 22°30' de latitud norte y los 80°06' y los 80° 55' de longitud oeste. Limita al norte y al oeste con la provincia de Matanzas, al este y al nordeste con la provincia de Villa Clara, al sur con el mar Caribe y al suroeste con la provincia de Sancti Spiritus (Figura 1). Está dividida en ocho municipios y cuenta con una extensión territorial de 4188.61 km<sup>2</sup>, que representa aproximadamente el 4.0% de la superficie total del país (ONEI, 2020).

### Datos empleados y control de la calidad

Se emplearon los datos diarios de lluvia de 62 pluviómetros provenientes de la Red Nacional del Instituto de Recursos Hidráulicos (INRH) y de 4 estaciones meteorológicas del país pertenecientes al Instituto de Meteorología (INSMET), que se encuentran distribuidos al interior y en las proximidades de la provincia (Figura 2). Preferentemente, se consideró el uso de las estaciones que cumplieran con un periodo común de datos que abarcó 30 años de continuidad (1991 - 2020). Cada estación posee un código y los datos de longitud (LON), latitud (LAT), altura (h) y distancia a la costa (d).

Los pluviómetros utilizados (66) se encuentran distribuidos en un área de 4188.61km<sup>2</sup>, de los cuales 50 se encuentran a una altitud entre los 0 - 200 m (zonas llanas), 3 entre los 201-400 m (zona premontañosa) y 11 por encima de los 400 m (zona montañosa) (Figura 2).

La selección de los pluviómetros estuvo basada en que tuvieran menos de cuatro años de datos faltantes,

los cuales representan menos del 10 % del total de datos a utilizar.

El control de calidad de las series diarias de lluvia se realizó utilizando la rutina Rclimdex-ExtraQC que corre sobre la plataforma R. La misma fue originada en el software de control de calidad y cálculo de índices de cambio climático desarrollada por *Environment Canada* para el Equipo de expertos sobre detección e índices de cambio climático (ETCCDI) y representa una modificación de la versión “oficial” de éste (Zhang *et al.*, 2004). Esta versión incluye un conjunto de rutinas adicionales (Extra\_QC) para un control de calidad más preciso e intensivo. El procedimiento permitió determinar un conjunto de datos “sospechosos” por las siguientes causas:

- Días duplicados
- *Outliers* (valores atípicos que se encuentran fuera de un rango particular)

Después de correr el control de la calidad a través del Rclimdex-ExtraQC se determinaron un conjunto de datos sospechosos mediante el fichero nombrado *outliers*. El fichero de *outliers* se filtró y se seleccionaron los que igualaban o superaban el acumulado de 200 mm.

Con el objetivo de validar estos acumulados se consultaron las cronologías de fenómenos meteorológicos disponibles en el Centro Meteorológico Provincial de Cienfuegos (Barcia *et al.*, 2009; Barcia *et al.*, 2012; Delfín *et al.*, 2020). A partir de ese análisis fue posible asociar los acumulados significativos anteriormente seleccionados a diferentes sistemas meteorológicos como frentes fríos, bajas extratropicales y ciclones tropicales. Además, al no contar con los libros de observación para realizar la verificación de los datos sospechosos, se chequeó la consistencia entre los días previos y posteriores al reporte y, también, con estaciones vecinas atendiendo a la época del año en que se presentaron.

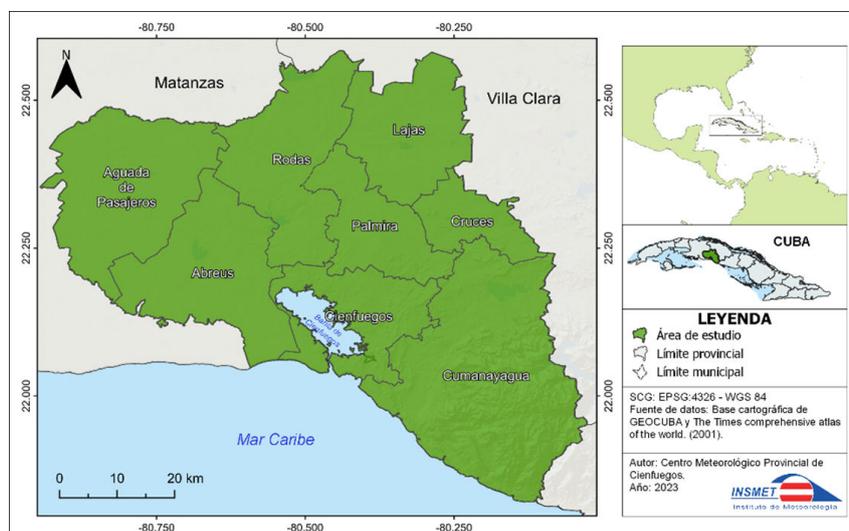
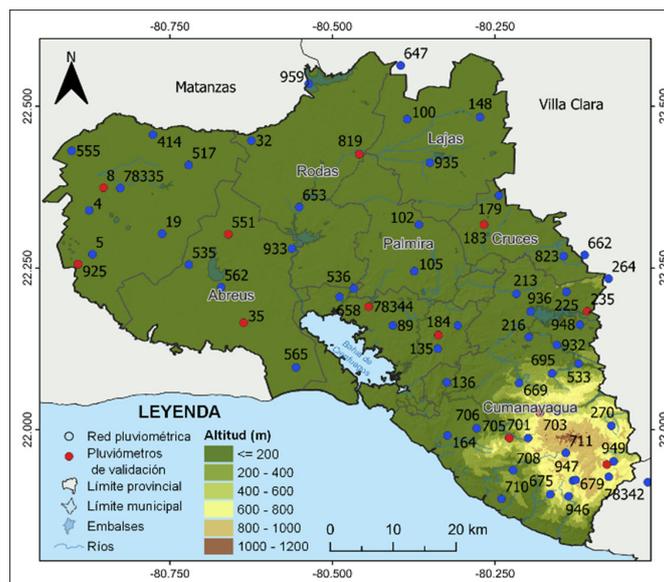


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio



Fuente: Elaboración propia

**Figura 2.** Mapa de localización de las estaciones pluviométricas y meteorológicas utilizadas en el estudio espacial.

Finalmente, el formato original de los datos diarios fue transformado en una base de datos a la que se le calculó los valores medios mensuales, anual y por periodo estacional (lluvioso y poco lluvioso).

### Interpolación espacial

Con el propósito de predecir espacialmente la precipitación mensual histórica de la provincia Cienfuegos, para cada uno de los meses del año, anual y por periodo estacional se compararon varios métodos de interpolación.

En la presente investigación se evaluaron: a) Kriging, b) Inverso de la distancia ponderada y c) Regresión lineal múltiple.

#### a) Kriging

El Kriging, es un método analítico, donde la función de interpolación depende de la autocorrelación espacial de la variable, que se representa en variogramas. Comúnmente el ajuste de los variogramas es un proceso relativamente complejo, sujeto a un número considerable de consideraciones sobre las características del fenómeno que se analiza.

Este método utiliza datos tabulares y su posición geográfica (Sistema de coordenadas universal transversal de Mercator [UTM]) para el cálculo de las interpolaciones. En este estudio se empleó el Kriging Ordinario (KO) y fue implementado con el complemento *Start-Map* (Pereira *et al.*, 2022) en el software libre Quantum GIS versión 3.28 (QGIS 3.28) con una resolución espacial de 4 x 4 km.

#### b) Inverso de la distancia ponderada (IDW)

Este método es un interpolador promedio ponderado y puede ser un interpolador exacto o de suavizado. Con la distancia inversa a una potencia,

los datos se ponderan durante la interpolación de modo que la influencia de un punto en relación con otro disminuye con la distancia desde el nodo de la cuadrícula. La ponderación se asigna a los datos mediante el uso de una potencia de ponderación (p) que controla cómo disminuyen los factores de ponderación a medida que aumenta la distancia desde un nodo de la red. Cuanto mayor sea la potencia de ponderación, menor será el efecto de los puntos alejados del nodo de la red durante la interpolación.

Una de las características de la distancia inversa a una potencia es la generación de "ojos de buey" que rodean la posición de las observaciones dentro del área cuadrículada. Puede asignar un parámetro de suavizado durante la distancia inversa a una potencia para reducir el efecto de "ojo de buey" suavizando la cuadrícula interpolada.

En el presente trabajo se realizaron varias corridas de este método empleando diferentes coeficientes de ponderación (1, 2 y 3) y también fueron implementadas en QGIS 3.28 con una resolución espacial de 4 x 4 km.

#### c) Regresión lineal múltiple (RLM)

Serrano-Notivoli y Tejedor (2021) señalan que, en el estudio de las relaciones entre la lluvia y los factores ambientales, los métodos de regresión lineal múltiple han sido el núcleo de muchas bases de datos en rejillas. Así que siguiendo la metodología empleada por Ninyerola *et al.* (2005), Fernández (2008), Núñez *et al.* (2013), Núñez *et al.* (2014), Millán y Lallana (2017), Barcia *et al.* (2023) se realizó el ajuste de las ecuaciones de regresión lineal múltiple entre la variable dependiente (precipitación) y las variables independientes o predictoras: longitud, latitud, altitud y distancia a la costa. Se obtuvieron los coeficientes de regresión múltiple de manera separada para cada

mes del año, anual y por periodo estacional, para cada punto de rejilla mediante la siguiente ecuación:

$$RR = b_0 + b_1 * LON + b_2 * LAT + b_3 * h + b_4 * d \quad (1)$$

Donde:

RR: Precipitación (mm)

LON: longitud (°)

LAT: latitud (°)

h: altitud (m)

d: distancia a la costa (km)

b<sub>0</sub>, b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>, b<sub>3</sub>, b<sub>4</sub>: coeficientes de regresión que se estiman en el proceso de ajuste del modelo.

Las variables significativas fueron seleccionadas en función del nivel de significancia expresado por el valor de  $p < 0.05$ .

Una vez obtenidos los coeficientes de regresión fueron reproducidas las ecuaciones del ajuste de regresión mediante álgebra de mapas de las matrices ráster de las variables independientes. Como resultado se obtuvieron mapas “potenciales” de distribución de precipitación acumulada mensual, anual y estacional.

Para obtener los residuos se restaron los valores observados de precipitación y de los valores predichos del modelo de regresión para cada estación pluviométrica. Estos valores residuales (errores) se interpolaron espacialmente usando el IDW, dando lugar a los mapas de anomalías. Los residuos del ajuste de regresión, en cada estación, reflejan tanto la variación inexplicada (variables no consideradas) como los errores metodológicos acumulados.

Finalmente, estos mapas de anomalías se agregaron a los mapas potenciales mediante álgebra de mapas consiguiendo mejoras en el proceso de distribución espacial.

La rejilla empleada en este procedimiento es la elaborada por Solano *et al.* (2006) y empleada en el Sistema Nacional de Vigilancia Agrometeorológica y de la Sequía Meteorológica que tiene una resolución de 4 x 4 km y de la cual 280 puntos corresponden a la provincia de Cienfuegos.

### Validación cruzada y estimación del error de interpolación

Un aspecto importante en la selección de la metodología de interpolación más representativa del campo medio de precipitación en la provincia de Cienfuegos lo fue la validación de los campos generados. Para realizar esta selección se realizó un procedimiento de validación cruzada, empleando los registros de 12 estaciones pluviométricas localizadas dentro de la zona de estudio y que representan aproximadamente el 18 % del total de la muestra empleada (Figura 2). El criterio de selección de las estaciones estuvo basado en su representación espacial en cada zona físico-geográfica de la provincia.

La capacidad predictiva de cada método de interpolación fue evaluada en función de los valores de la precipitación acumulada mensual, anual y estacional estimada en las 12 estaciones de validación que no entraron en el análisis inicial. Para esto se emplearon índices categóricos y continuos. Los continuos incluyeron el índice de eficiencia modificado de Kling- Gupta (KGE, Gupta *et al.*, 2009; Kling *et al.*, 2012). El KGE es un indicador adimensional relativamente nuevo y que ha sido empleado con mayor frecuencia en el campo de la hidrología y tiene la ventaja de sintetizar los resultados de las comparaciones entre los valores estimados y observados, considerando la correlación temporal (coeficiente de correlación de Pearson), el sesgo y la variabilidad de la variable.

Por último, también fue empleado el error medio (ME), error medio absoluto (MAE), el error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>).

El cálculo de todos estos índices se realizó a través de la librería hydroGOF (Zambrano, 2024) en Rstudio.

Algunas de estas métricas son integradas en el diagrama de Taylor (Taylor, 2001), el cual ofrece una vía muy práctica a la hora de comparar datos estimados y observados.

### Generación de campos de precipitación

Una vez determinado el método de interpolación más representativo de los campos de precipitación en la provincia de Cienfuegos fueron confeccionados los mapas de precipitación media mensual, anual y estacional del periodo 1991-2020 para la provincia, pero esta vez empleando el conjunto de las 66 estaciones pluviométricas. Los mapas fueron generados empleando el QGIS 3.28.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Evaluación de los métodos de interpolación

Las tablas 1, 2 y 3 sintetizan los resultados de la comparación de los cinco modelos empleados para la interpolación espacial de la lluvia anual y periodos estaciones lluvioso y poco lluvioso en la provincia de Cienfuegos a través de diferentes métricas. Como puede apreciarse, el modelo de Regresión Lineal Múltiple mostró los mejores resultados en todos los indicadores en las corridas anuales (Figura 3) y por periodo estacional. No obstante, los resultados del IDW de potencia 3 y el Kriging Ordinario mostraron resultados semejantes e iguales de satisfactorios confirmando su uso para similares objetivos.

Con excepción de los meses de marzo y mayo todos los métodos subestimaron los valores originales (observados > estimados). Como se puede apreciar en la mayor parte de los meses los menores valores de EM se correspondieron con el modelo de RLM (Tabla 4).

**Tabla 1.** Valores del ME, MAE, RMSE, R<sup>2</sup> y KGE de la estimación de los acumulados **anuales** de los 12 pluviómetros de validación en cada uno los métodos empleados

Método	ME	MAE	RMSE	R <sup>2</sup>	KGE
RLM	2.86	44.37	51.8	0.96	0.91
IDW_p1	-19.11	137.85	167.16	0.9	0.36
IDW_p2	-23.26	93.26	113.53	0.89	0.65
IDW_p3	-24.2	82.48	105.42	0.86	0.74
Kriging Ordinario	-31.94	77.57	92	0.91	0.78

**Tabla 2.** Valores del ME, MAE, RMSE, R<sup>2</sup> y KGE de la estimación de los acumulados del **periodo estacional lluvioso** de los 12 pluviómetros de validación en cada uno los métodos empleados

Método	ME	MAE	RMSE	R <sup>2</sup>	KGE
RLM	3.4	37.53	43.02	0.95	0.96
IDW_p1	-19.03	101.51	122.8	0.89	0.38
IDW_p2	-18.82	67.49	84.65	0.85	0.68
IDW_p3	-16.91	62.94	83.04	0.82	0.77
Kriging Ordinario	-29.3	66.52	78.72	0.87	0.76

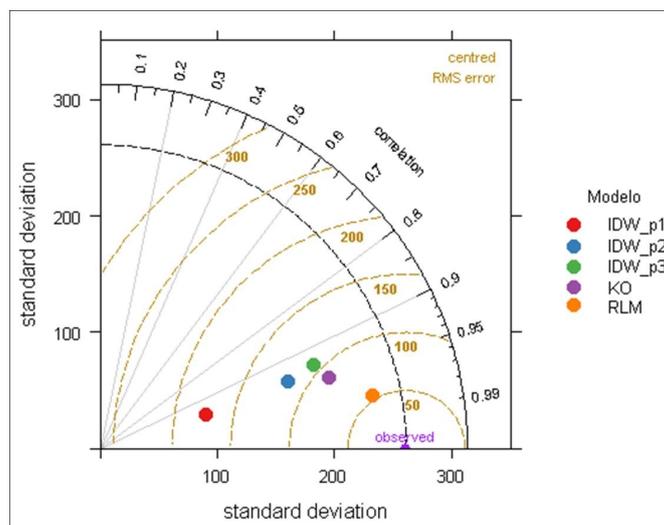
**Tabla 3.** Valores del ME, MAE, RMSE, R<sup>2</sup> y KGE de la estimación de los acumulados del **periodo estacional poco lluvioso** de los 12 pluviómetros de validación en cada uno los métodos empleados

Método	ME	MAE	RMSE	R <sup>2</sup>	KGE
RLM	0	20.89	25.76	0.94	0.72
IDW_p1	-0.09	41.17	51.94	0.89	0.31
IDW_p2	-4.44	27.66	35.96	0.93	0.56
IDW_p3	-7.28	22.51	30.07	0.94	0.65
Kriging Ordinario	-8.26	29.08	41.38	0.92	0.48

Nota: ME-Error medio, MAE-Error medio absoluto, RMSE-Raíz del error cuadrático medio, R<sup>2</sup>-Coeficiente de determinación y KGE- Índice de eficiencia modificado de Kling-Gupta.

**Tabla 4.** Valores del Error Medio de la estimación de los acumulados mensuales de los 12 pluviómetros de validación en cada uno los métodos empleados

Método	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
RLM	-0.82	-0.33	1.42	-0.01	4.55	-0.8	8.69	-1.67	-4.89	-2.59	-0.02	-1.2
IDW_p1	-1	-0.53	1.11	-0.71	0.59	-6.88	4.01	-5.32	-8.44	-2.98	2.02	-0.98
IDW_p2	-1.34	-0.5	0.65	-1.04	1.71	-5.69	5.32	-4.89	-9.79	-5.49	-0.7	-1.51
IDW_p3	-1.32	-0.37	0.35	-1.69	2.64	-5.3	6.43	-3.68	-9.95	-7.05	-2.36	-1.9
Kriging Ordinario	-2.51	-1.65	0.63	0.37	-1.03	-6.48	4.04	-5.87	-13.06	-10.77	-2.08	-2.81



**Figura 3.** Diagrama de Taylor utilizado para comparar los estimados de precipitación anual en las 12 estaciones de validación con los diferentes modelos evaluados

En el análisis mensual del KGE los resultados difirieron un poco y en los meses de marzo y abril los mayores valores del KGE se obtienen con el IDW con potencia 3 y KO respectivamente (Tabla 5). El mes de abril fue el de peores resultados por el modelo de RLM.

Al observar el comportamiento del KGE por estaciones de validación se observa igualmente que el modelo de RLM junto al KO mostró los mejores valores, en todos los casos por encima de 0.9 (Figura 4). De las tres corridas del IDW el de peores resultados es el de potencia 1 con las eficiencias más bajas hacia el sur de la provincia y zona montañosa.

Los resultados anteriores sugieren que el mejor método es la RLM. Sin embargo, se puede afirmar que el empleo del IDW con potencia 3 y el Kriging Ordinario también producen resultados adecuados para representar la distribución espacial de la precipitación en la provincia de Cienfuegos.

### Cartografía del modelo de regresión lineal múltiple (MRLM)

Como puede observarse en la tabla 6 los coeficientes de determinación de los MRLM oscilaron entre 0.27 y 0.83. Las mejores estimaciones correspondieron al bimestre septiembre- octubre donde los modelos obtenidos explicaron más del

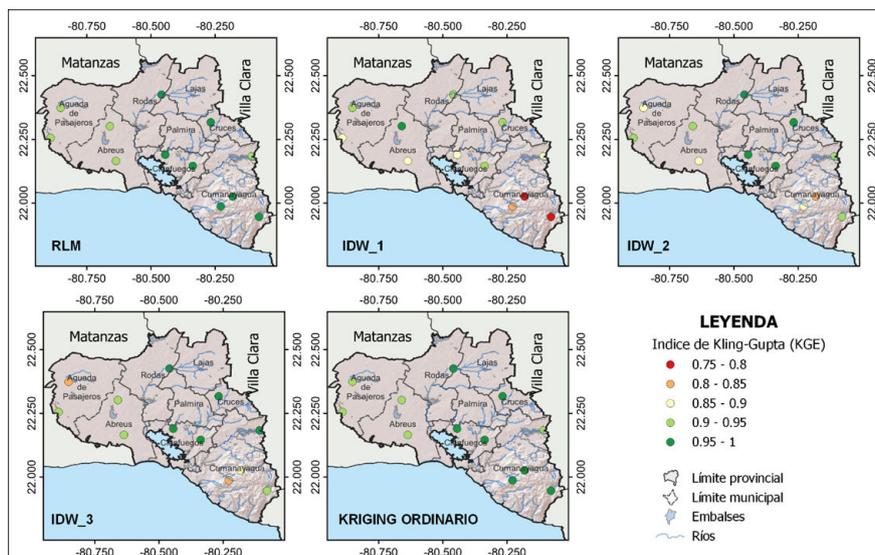
82 % de la varianza de la variable estudiada. Los modelos de los meses abril y julio mostraron la mayor incertidumbre dado que no explicaron más de 45% de la varianza de la precipitación. Estos resultados son consistentes con lo encontrado por Ninyerola *et al.* (2000), Diodato (2005), Núñez *et al.* (2013) y Núñez *et al.* (2014), quienes reportaron valores de R<sup>2</sup> comprendidos entre 0.32 y 0.82.

Todos los meses y períodos presentaron una buena relación con la altura sobre el nivel del mar y solo en mayo y noviembre la distancia a la costa fue significativa en los modelos obtenidos. La relación estadística con la altitud fue positiva en todos los casos corroborando el aumento de los acumulados pluviales con la elevación del terreno. Este resultado coincide con lo obtenido por Vázquez y Solano (2013) en Cuba, Fernández *et al.* (2014) en Perú y Núñez *et al.* (2014) en México.

La longitud geográfica por su parte mostró significancia estadística negativa durante cinco meses del período lluvioso del año, lo cual indica que la precipitación aumenta en dirección oeste; mientras que la latitud geográfica tiene significancia estadística durante los meses de mayo, septiembre, octubre, noviembre y diciembre con una tendencia poco clara que indica que la precipitación es menor hacia el norte de la provincia.

**Tabla 5.** Valores del índice de Kling-Gupta (KGE) de la estimación de los acumulados mensuales de los 12 pluviómetros de validación en cada uno los métodos empleados

Método	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
RLM	0.64	0.63	0.71	0.42	0.84	0.77	0.66	0.76	0.95	0.92	0.86	0.59
IDW_p1	0.27	0.28	0.28	0.17	0.33	0.29	0.19	0.36	0.43	0.42	0.4	0.27
IDW_p2	0.47	0.5	0.53	0.53	0.62	0.56	0.36	0.66	0.77	0.68	0.69	0.46
IDW_p3	0.55	0.6	0.63	0.71	0.75	0.62	0.4	0.68	0.86	0.73	0.79	0.53
Kriging Ordinario	0.41	0.47	0.81	0.69	0.67	0.55	0.53	0.67	0.83	0.75	0.7	0.41



**Figura 4.** Índice KGE de las estimaciones de la lluvia por los cinco métodos de interpolación evaluados. Los colores para KGE van del rojo al verde, lo que representa un desempeño bajo a alto, respectivamente

**Tabla 6.** Resultados del ajuste del Modelo de Regresión Lineal Múltiple con el que se elaboró la cartografía de las precipitaciones en la provincia de Cienfuegos. Período 1991-2020

Mes y/o Período	R <sup>2</sup>	b <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	b <sub>4</sub>
enero	0.68	32.87	ns	ns	0.033	ns
febrero	0.71	30.66	ns	ns	0.026	ns
marzo	0.58	38.45	ns	ns	0.025	ns
abril	0.27	-450.70	ns	23.37	0.032	ns
mayo	0.77	-2607.05	-49.02	-52.92	0.151	0.983
junio	0.55	-5887.00	-75.68	ns	0.137	ns
julio	0.44	-3474.00	-45.36	ns	0.090	ns
agosto	0.57	-2618.00	-34.93	ns	0.099	ns
septiembre	0.82	-2770.09	-50.63	-49.07	0.178	ns
octubre	0.83	1588.58	ns	-63.88	0.130	ns
noviembre	0.75	2678.00	21.75	-40.12	0.067	0.569
diciembre	0.60	322.59	ns	-13.08	0.021	ns
año	0.82	-14510.0	-197.50	ns	1.038	ns
período poco lluvioso	0.73	249.76	ns	ns	0.218	ns
período lluvioso	0.79	-1693.00	-224.40	ns	0.834	ns

R<sup>2</sup>= coeficiente de determinación;  $\beta_1$  (LON)= longitud;  $\beta_2$  (LAT)= latitud;  $\beta_3$  (h)= altitud;  $\beta_4$  (d)= distancia a la zona de costa; ns=variables descartadas en el proceso de ajuste de modelos por presentar valor de  $p > 0.05$

### Comportamiento de la precipitación en la provincia de Cienfuegos en el período 1991-2020

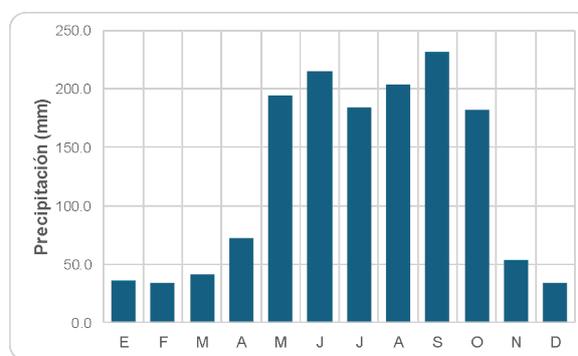
En la provincia de Cienfuegos, el acumulado promedio anual de precipitaciones en el período 1991-2020 fue de 1479.8 mm. La marcha anual de esta variable reflejó una marcada estacionalidad, distinguiéndose un período lluvioso de mayo-octubre con el 81.7 % del total anual y un período poco lluvioso de noviembre-abril con el 18.3 % restante.

En la **figura 5** se muestra cómo a partir del mes de mayo el aumento de las lluvias es notable con valores que persisten por encima de los 150 mm mensuales hasta el mes de octubre. En los meses de julio y agosto ocurren una disminución relativa con respecto a junio, pero en septiembre se alcanza el máximo anual con un promedio de 231 mm (**Tabla 3**). Octubre es el mes que menos aporta al período estacional lluvioso en la provincia con 182.2 mm.

En el período estacional poco lluvioso los acumulados solo rebasaron los 50 mm mensuales en los meses de transición abril y noviembre. El resto mostró valores muy similares siendo febrero el que registró el mínimo anual con 33.5 mm.

La **Tabla 7** muestra las estadísticas descriptivas calculadas a partir del conjunto de las 280 celdas de 4 x 4 km de la provincia de Cienfuegos. La mayor variabilidad espacial ocurre en los meses del período poco lluvioso, con un máximo en el mes de noviembre. La menor variabilidad espacial se registra en el período lluvioso, con un mínimo en el mes de agosto.

La distribución espacial de la precipitación acumulada anual en el período de estudio mostró valores entre 1250-2330 mm en toda la provincia. En la **figura 6** se pueden apreciar dos regiones de máximos bien definidas. Una primera, que se extiende desde el oeste y centro de la provincia que llega



**Figura 5.** Marcha anual de los acumulados de lluvias en la provincia de Cienfuegos. Período: 1991-2020

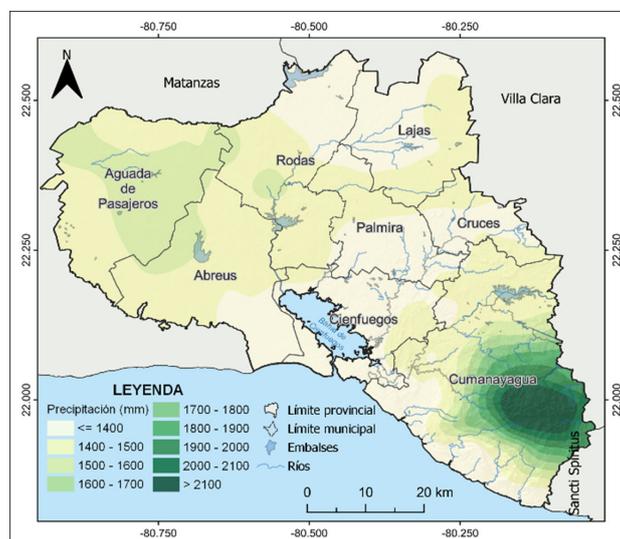
hasta las inmediaciones de los municipios de Lajas y Cruces, con acumulados entre 1400 - 1600 mm anuales. En esta región se divide un núcleo de lluvias máximas entre 1500-1600 mm que cubre gran parte de Aguada de Pasajeros y pequeñas porciones de Abreus y Rodas. La otra región coincide con el macizo montañoso de Guamuhaya, evidenciado las variaciones altitudinales de esta variable. En esta zona los registros anuales llegan a superar los 2100 mm en alturas superiores a los 750 m sobre el nivel del mar.

Hacia el sur y norte de la provincia se registran los menores acumulados anuales con valores inferiores a los 1400 mm.

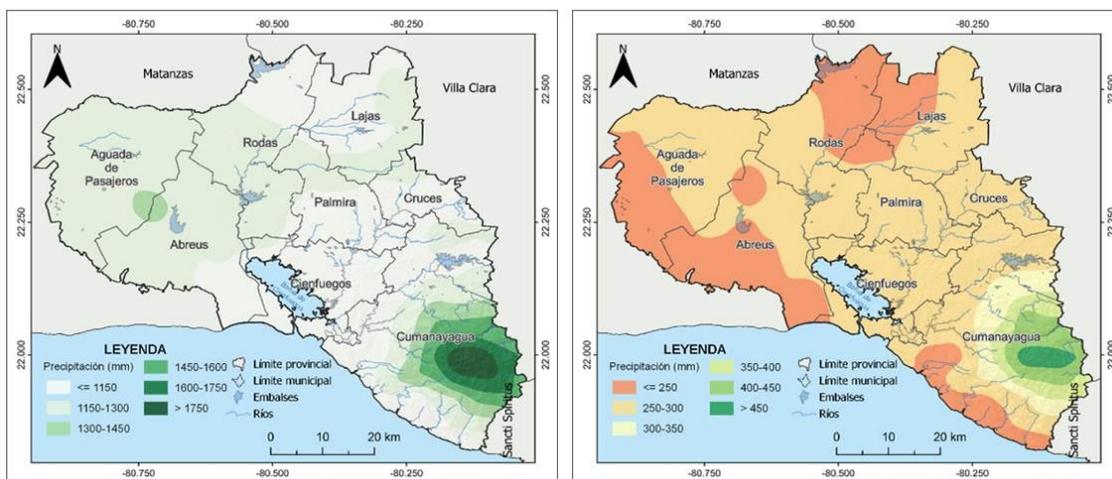
Al analizar las lluvias por períodos estacionales se observa que para el período lluvioso (**Figura 7 izq.**), la distribución espacial tiene un patrón muy similar al analizado anteriormente. La mayor parte de la provincia presenta valores de precipitaciones menores a 1200 mm, además se aprecia un núcleo de precipitaciones superiores a este valor al oeste de la provincia que abarca el municipio de Aguada de Pasajeros completamente y parte de Rodas y Abreus. El otro núcleo se presenta al sureste de la provincia coincidiendo con la zona montañosa.

**Tabla 7.** Parámetros estadísticos de la precipitación (mm) para los 280 puntos de rejilla pertenecientes a la provincia de Cienfuegos. Período 1991-2020

Mes y/o Período	Media	Desviación estándar	Coficiente de variación	Valor Mínimo	Valor máximo
enero	36.1	6.9	19.0	27.7	67.0
febrero	33.5	5.1	15.2	24.6	57.4
marzo	41.1	5.2	12.6	30.1	63.1
abril	72.4	7.1	9.8	49.8	95.8
mayo	194.3	29.1	15.0	151.1	323.1
junio	214.9	26.0	12.1	152.1	305.9
julio	184.1	18.4	10.0	145.1	251.6
agosto	203.3	16.9	8.3	170.2	276.4
septiembre	231.1	34.0	14.7	195.7	381.6
octubre	182.2	30.5	16.7	139.8	307.7
noviembre	53.3	18.5	34.7	35.6	132.8
diciembre	33.7	6.4	18.9	25.0	58.8
año	1479.8	182.4	12.3	1249.3	2328.1
período poco lluvioso	270.4	45.0	16.6	224.8	471.1
período lluvioso	1209.5	143.8	11.9	1007.0	1862.1



**Figura 6.** Distribución espacial de la precipitación anual de la provincia de Cienfuegos. Período 1991-2020



**Figura 7.** Precipitación en el Período Lluvioso del año (Izquierda) y Período Poco Lluvioso (Derecha). Provincia Cienfuegos. Período 1991-2020

La distribución de la lluvia en el período poco lluvioso (Figura 7 der.) mostró un comportamiento más homogéneo, con valores entre 300-400 mm y ligeramente superiores hacia el sector montañoso.

Como ya se ha indicado anteriormente, durante los meses de mayo a octubre cae aproximadamente el 81.7% de las lluvias anuales, sin embargo la distribución espacial de esta proporción tiene sus diferencias como muestra la figura 8. El máximo de dicha proporción (> 84 %) se encuentra ocupando gran parte de los municipios de Aguada de Pasajeros, Abreus, Rodas y Lajas; y la porción sur de la zona montañosa. Ello refleja un mayor contraste de las condiciones de humedecimiento hacia estas zonas del territorio que pudiera ejercer efectos importantes sobre la actividad agropecuaria de la provincia.

En cambio, hacia la ladera norte de la zona montañosa (barlovento) se registró el mínimo de esta proporción (< 78 %) manteniendo durante el año una mayor uniformidad en el régimen de humedecimiento. Esta situación está dada fundamentalmente a que la interacción del relieve con los procesos frontales invernales activa la ocurrencia de precipitaciones en el período poco lluvioso (Lecha, 1993).

### Periodo lluvioso

La figura 9 muestra los mapas con la distribución espacial de las precipitaciones de cada uno de los meses del periodo estacional lluvioso.

En mayo comienza el período lluvioso en Cuba y como tal es habitual que los totales de lluvia se incrementen de forma notable con respecto a los meses que le preceden, siendo incluso muy altos en ocasiones. La mayor parte de la provincia presentó acumulados entre 160 y 200 mm. Las mayores precipitaciones (>200 mm) se encuentran en el municipio de Aguada de Pasajeros y zona montañosa

de Cumanayagua donde pueden llegar a superar los 280 mm en las zonas más altas.

Junio se presenta como el segundo mes más lluvioso del año en la provincia de Cienfuegos. Una parte considerable de los acumulados de precipitación se produce asociada a eventos lluviosos de varios días de duración, los que ocurren principalmente en las primeras dos decenas del mes (Barcía y Fernández, 2006; Llanes et al., 2010).

La distribución de las precipitaciones en la provincia Cienfuegos en el mes de junio muestra como la mayor parte del territorio presenta acumulados por encima de los 200 mm. Se aprecia una extensa franja hacia la mitad norte de la provincia abarcando los municipios de Aguada de Pasajeros, Rodas, Lajas; y norte de Abreus y Palmira donde los acumulados se encuentran entre 200 y 240 mm, con un núcleo máximo entre 240-280 en el municipio de Aguada de Pasajeros. Los valores máximos de la provincia (>240 mm) se ubican en las elevaciones más altas del municipio de Cumanayagua. Hacia la zona costera de la provincia ocurre una disminución de la precipitación.

Julio junto a octubre es uno de los meses que menos precipitación aporta al período lluvioso en la provincia. Durante julio y agosto, bimestre característico del verano en el hemisferio norte, se produce un notable incremento de la intensidad del Anticiclón del Atlántico y de su influencia sobre Cuba, lo que produce una notable disminución de las precipitaciones con respecto al mes que le precede. No obstante, ocurren chubascos y tormentas eléctricas, principalmente durante la tarde y primeras horas de la noche, asociadas al paso de sistemas migratorios de la zona tropical, tales como las ondas y las bajas tropicales, así como al calentamiento diurno (Lecha et al., 1994).

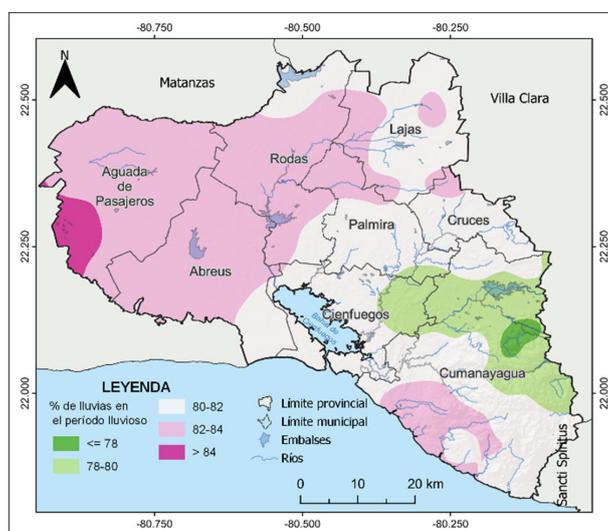


Figura 8. Proporción relativa de las precipitaciones que ocurren en el período lluvioso con respecto al total anual. Provincia Cienfuegos. Período 1991-2020

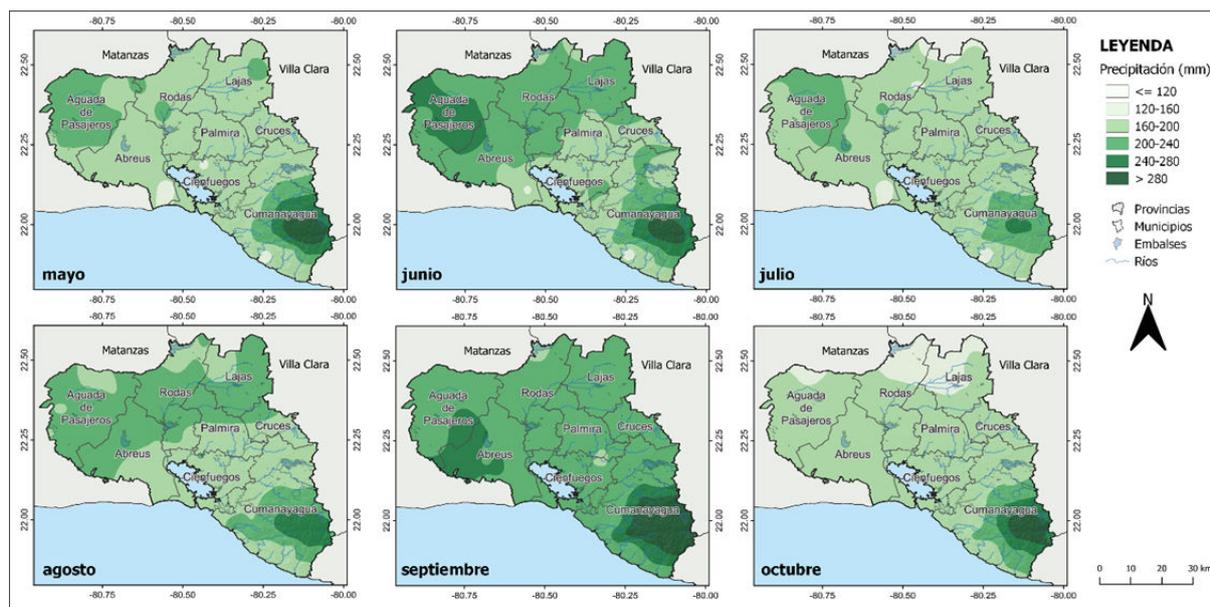


Figura 9. Precipitación mensual en el Período Lluvioso. Provincia Cienfuegos. período 1991-2020

En el caso de julio se presenta una distribución espacial en la provincia Cienfuegos muy similar al mes de mayo donde la mayor parte de la provincia posee acumulados entre 160 - 200 mm. Hacia los municipios de Aguada de Pasajeros y Cumanayagua se concentran los mayores valores medios entre 200 - 240 mm y solo en elevaciones de más de 900m se sobrepasan los 240 mm.

A pesar de que durante agosto todavía se mantiene la notable influencia del Anticiclón del Atlántico sobre Cuba, las precipitaciones son superiores al mes de julio. Es también agosto un mes en que comienza a incrementarse la actividad ciclónica sobre Cuba.

La distribución de las precipitaciones en el mes de agosto es muy similar a la del mes de junio donde la mayor parte de la provincia presenta acumulados por encima de los 200 mm. Se aprecia una extensa franja que abarca los municipios de Aguada de Pasajeros, Rodas, Lajas y Abreus y parte del municipio de Palmira donde las precipitaciones se encuentran entre 200 y 250 mm. Otro núcleo de máximas lluvias se observa en el municipio de Cumanayagua donde las precipitaciones se encuentran entre 200 y 250 mm, llegando a ser superiores a este umbral en las partes más altas del macizo montañoso Guamuha.

En septiembre la influencia del anticiclón del Atlántico disminuye considerablemente con respecto a julio y agosto, lo que, unido al paso frecuente de las ondas y las bajas tropicales, propicia el incremento de las precipitaciones. En septiembre se incrementa la actividad ciclónica sobre Cuba de forma notable con respecto a agosto. Este es el segundo mes de mayor afectación de ciclones tropicales a la provincia de Cienfuegos y en muchas ocasiones dicha afectación está asociada a las lluvias intensas que estos provocan (Barcia *et al.*, 2009). En el periodo de estudio se

destacan las lluvias intensas ocasionadas por los huracanes Georges (1998), Ike (2008) e Irma (2017).

En este mes, en la provincia Cienfuegos, se evidencia un incremento notable de las lluvias en el territorio con respecto a los dos meses que le preceden siendo el mes más lluvioso del año en el periodo 1991-2020. Toda la provincia presenta acumulados superiores a los 200 mm con un núcleo de máximo en las inmediaciones entre Aguada de Pasajeros y Abreus entre 200-240 mm y otro hacia la zona montañosa con valores que llegan a ser superiores a los 280 mm en alturas por encima de los 400 m sobre el nivel del mar.

Como ya se dijo, con octubre finaliza el periodo estacional lluvioso. En este mes el territorio nacional es afectado tanto por sistemas tropicales como de latitudes más altas. Es característico la presencia de ondas tropicales, hondonadas de superficie y vaguadas extendidas en el flujo del Este, sistemas que producen generalmente fuerte actividad de chubascos y lluvias. Además, la frecuencia de afectación a Cuba por huracanes en este mes es la mayor de toda la temporada ciclónica, principalmente en su segunda decena (Roura *et al.*, 2018).

La disminución de las precipitaciones en octubre con respecto a septiembre es notable y se divisa con claridad en la distribución espacial de estas observándose un decrecimiento de los acumulados (< 200 mm) en casi toda la provincia. Los máximos valores solo se mantienen en la zona montañosa del municipio de Cumanayagua.

### Periodo poco lluvioso

La figura 10 muestra los mapas con la distribución espacial de las precipitaciones de cada uno de los meses del periodo estacional poco lluvioso.

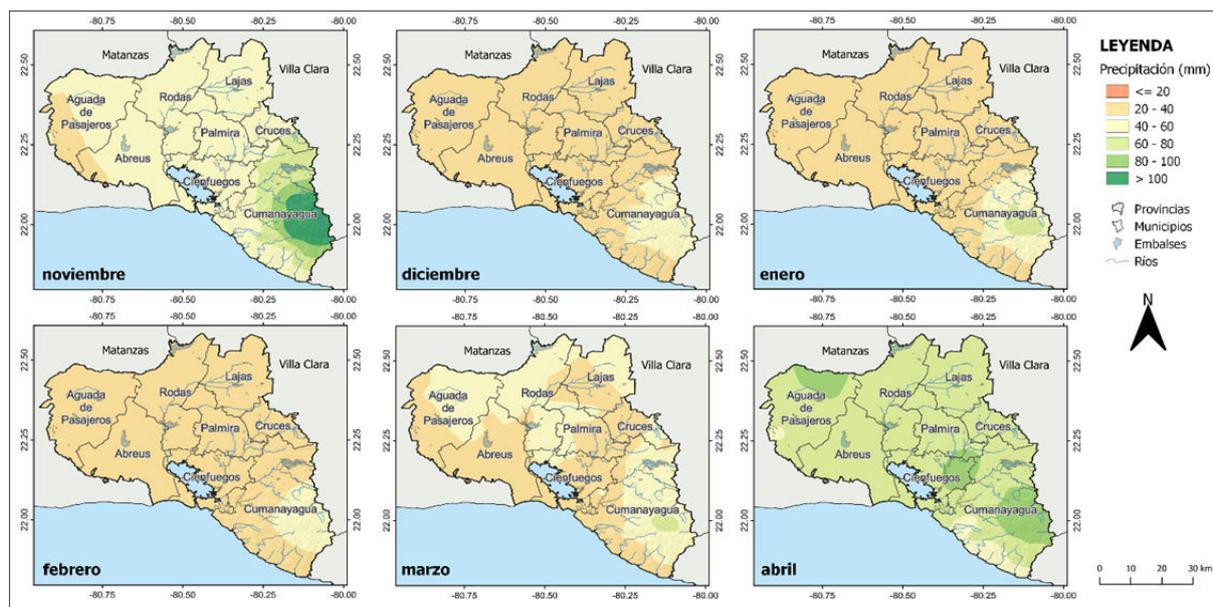


Figura 10. Precipitación mensual en el Período poco lluvioso. Provincia Cienfuegos. Período 1991-2020

Noviembre es el segundo mes de mayores acumulados dentro del período poco lluvioso del año en la provincia de Cienfuegos. La mayor parte del territorio presenta acumulados entre 40 y 60 mm con los máximos en la zona montañosa que pueden llegar a ser superiores a los 100 mm en el mes.

A partir de diciembre ocurre una disminución acentuada de los acumulados de precipitaciones, así como de los días con lluvia, que permanece hasta febrero. Las precipitaciones que ocurren en este periodo están asociadas a los sistemas frontales y bandas prefrontales que anteceden a los anticiclones migratorios que se mueven más bajos en latitud afectando la mitad occidental del país en esta época del año (Lecha *et al.*, 1994).

La distribución espacial de las lluvias en estos tres meses es muy similar en toda la provincia. La mayor parte del territorio provincial presenta acumulados entre 20 y 40 mm y hacia el municipio de Cumanayagua se observa un máximo que llega en las partes más elevadas de la zona montañosa hasta 60 mm.

En marzo las precipitaciones dependen fundamentalmente de los sistemas frontales que todavía afectan al país, además que en este mes se produce la mayor influencia del evento El niño - Oscilación del Sur (ENOS), haciéndolo más lluvioso y tormentoso en los años en que este se presenta (Pérez *et al.*, 2012). En este mes se observa un incremento de las lluvias hacia la mitad norte de la provincia con respecto a los meses precedente con valores entre 40-60 mm y hacia la zona montañosa del municipio Cumanayagua se mantienen los mayores acumulados (60 - 80 mm).

En el último mes del periodo estacional poco lluvioso la componente migratoria de los sistemas meteorológicos es mucho menor y las masas de

aire permanecen más estables en sus regiones de orígenes. Las altas presiones continentales comienzan a debilitarse, por lo que los frentes fríos son débiles o llegan en estado de disipación con pocas lluvias asociadas, por lo que poseen una frecuencia de afectación ligeramente inferior que la del mes que le antecede (Barcia *et al.*, 2009).

En la provincia Cienfuegos los acumulados de abril son los que más aportan al periodo estacional poco lluvioso aumentando notablemente en comparación con los meses anteriores. La mayor parte del territorio posee registros de lluvia entre 60 y 80 mm y los máximos superiores a los 80 mm se ubican hacia el macizo montañoso, norte de Aguada de Pasajeros y nordeste de Cienfuegos.

## CONCLUSIONES

Se determina que el método de RLM resulta el más acertado para la estimación de la distribución espacial de las precipitaciones en la provincia de Cienfuegos en el periodo 1991-2020 en comparación con el IDW y KO. Este muestra los menores valores del error cuadrático medio y una mayor eficiencia (índice KGE y diagrama de Taylor) lo que lo hace tener una mayor capacidad de predicción para caracterizar la distribución espacial de la precipitación en la provincia.

La interpolación espacial de la precipitación mediante el uso de MRLM calibrados con los valores residuales, permite la obtención de coberturas continuas estadísticamente confiables para los valores medios mensuales, anuales y estacionales del periodo 1991-2020 en la provincia de Cienfuegos. La altura sobre el nivel del mar muestra relación directa significativa en todos los periodos temporales analizados, mientras que la distancia a la costa

muestra una relación menos clara. En futuros estudios podría evaluarse el efecto de incorporar otras variables predictivas a los MRLM como: humedad relativa, cobertura de nubes, dirección de vientos dominantes y la cobertura del suelo; lo cual podría contribuir en mejorar la fiabilidad de los modelos desarrollados para los meses de abril y julio cuyos MRLM representaron menos de la mitad de la varianza de la precipitación.

Se obtienen mapas climáticos de precipitación multimensuales, anuales y estacionales del periodo 1991-2020, para la provincia Cienfuegos, constituyéndose en fuente de información valiosa para la toma de decisiones en las actividades socioeconómicas que se desarrollen y como guías referenciales para las disímiles investigaciones que necesiten de los datos de esta variable.

Los resultados de la distribución espacial de la precipitación en la provincia de Cienfuegos son de gran importancia para el territorio debido a la importancia de este vital recurso para las diferentes actividades socioeconómicas, por lo que los mapas constituyen fuentes de información para la toma de decisiones en las actividades socioeconómicas que se desarrollen y como guías referenciales para las disímiles investigaciones que necesiten de los datos de esta variable.

## REFERENCIAS

- Apaydin, H., Sonmez, F. K., & Yildirim, Y. E. (2004). Spatial interpolation techniques for climate data in the GAP region in Turkey. *Climate Research*, 28(1), 31-40. doi: <http://doi.org/10.3354/cr02803>
- Barcia, S. & Fernández, A. (2006). Tendencia de los patrones de circulación y su influencia en las precipitaciones en Cienfuegos en el bimestre mayo-junio. *Revista Cubana de Meteorología*, 13(2), 67-80.
- Barcia, S., Orbe, G., Regueira, V., Rodríguez, C., Millán, J. (2012). Nueva Guía Climática de la Provincia de Cienfuegos. Centro Meteorológico Provincial de Cienfuegos.
- Barcia, S. & Castillo, C. S. (2015). Atlas climático de la provincia de Cienfuegos. Centro Meteorológico Provincial de Cienfuegos.
- Barcia, S., Viera, E. Y., Gómez, D., Fuentes, L. B., Porres, M. A., Mejías, L., Angulo, R. A. (2023). Distribución espacial de la temperatura del aire en la provincia de Cienfuegos. *Revista Cubana de Meteorología*, 29(3), 1-20. <https://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/797/1477>
- Brown, D. P. & Comrie, A. C. (2002). Sub-regional seasonal precipitation linkages to SOI and PDO in the Southwest United States. *Atmospheric Science Letters*, 3(2-4), 94-102. <https://doi.org/10.1006/asle.2002.0057>
- Castellanos, P. & Pereira, G. (2020). Modelización de la distribución espacial de la precipitación en Cuba ante escenarios de cambio climático. *Revista de Climatología*, 20, 31-45.
- Delfín, C. A., Gómez, D., Barcia, S. (2020). Fenómenos meteorológicos peligrosos que han afectado la zona costera de la bahía de Cienfuegos. *Revista Cubana de Meteorología*, 26(2), 1-20.
- Diodato, N. (2005). The influence of topographic co-variables on the spatial variability of the precipitation over small regions of complex terrain. *International Journal of Climatology*, 25, 351-363.
- Fernández, F. (2008). Creación de nuevos mapas a partir del MDE. Aplicación de las funciones de análisis de superficies. In A. Moreno Jiménez (Coord.), *Sistemas y Análisis de la Información Geográfica: Manual de autoaprendizaje con ArcGIS* (2nd. Ed. pp. 329-648). RA-MA.
- Fernández, C., Lavada W. S., Felipe, O. G. (2014). Análisis comparativo de métodos de interpolación espacial para la elaboración de mapas climáticos de precipitación. <https://repositorio.se-namhi.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12542/947/An%C3%A1lisis-comparativo-de-m%C3%A9todos-de-interpolaci%C3%B3n-espacial-para-la-elaboraci%C3%B3n-de-mapas-clim%C3%A1ticos-de-precipitaci%C3%B3n.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Fleming, M., Stuart Champin III, F., Cramer, W., Hufford, G., Serreze, M. (2000). Geographic patterns and dynamics of Alaskan climate interpolated from a sparse station record. *Global Change Biology*, 6(S1), 49-58. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2000.06008.x>
- Goovaerts, P. (2000). Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology*, 228, 113-129.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., Martínez G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377 (1-2), 80-91, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Hay, L., Viger, R., McCabe, G. (1998). Precipitation interpolation in mountainous regions using multiple linear regression. In Proceedings of the HeadWater'98 conference, Italy.
- Hernández, M., Planos, E., Boudet, D. (2018). Influencia de los factores físico-geográficos en la configuración espacio-temporal de la lluvia: Estudio de casos en Cuba. *Revista Cubana de Meteorología*, 24 (1), 61-74.
- Hevesi, J., Istok, J., Flint, A. (1992). Precipitation Estimation in Mountainous Terrain Using Multivariate Geostatistics. Part I: Structural Analysis. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 31(7), 661-676. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1992\)031<0661:PEIMTU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1992)031<0661:PEIMTU>2.0.CO;2)

- Hong, Y., Nix, H. A., Hutchinson, M. F., Booth, T. H. (2005). Spatial interpolation of monthly mean climate data for China. *International Journal of Climatology*, 25(10), 1369-1379. <https://doi.org/10.1002/joc.1187>
- Kling, H., Fuchs, M., Paulin, M. (2012). Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 424-425 (March), 264-277. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.011>.
- Lecha, L. B. (1993). Estudio bioclimático de la provincia Cienfuegos. La Habana: Editorial Academia.
- Lecha, L. B., Paz, L. R., Lapinel, B. (1994). El clima de Cuba. Sello Editorial Academia.
- Llanes, M. T., Barcia, S., Fernández, A. Orbe, G. P. (2010). Acumulados decenales de precipitación en las provincias centrales de Cuba. *Revista Cubana de Meteorología*, 16(1), 32-44.
- Martínez, A. & Guevara, E. (2010). Análisis de la distribución espacial de la precipitación en la región central de Cuba. *Revista Cubana de Meteorología*, 16(2), 15-24.
- Millán, A. & Lallana, V. (2017). Modelización espacial del régimen bioclimático medio en la Comunidad Autónoma de Madrid mediante la aplicación de la temperatura fisiológica equivalente (PET). *Revista Mapping*, 26(183), 20-29.
- New, M., Hulme, M., Jones, P. (2000). Representing twentieth-century space-time climate variability. Part II: Development of 1901-96 monthly grids of terrestrial surface climate. *Journal of climate*, 13(13), 2217-2238. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<2217:RTCSTC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<2217:RTCSTC>2.0.CO;2)
- Ninyerola, M., Pons, X., Roure, J. M. (2000). Monthly precipitation mapping of the Iberian Peninsula using spatial interpolation tools implemented in a Geographic Information System. *Theoretical and Applied Climatology*, 89: 195-209.
- Ninyerola, M., Pons, X., Roure, J. M. (2005). Atlas climático digital de la Península Ibérica. Metodología y aplicaciones en bioclimatología y geobotánica. Universitat Autònoma de Barcelona. <http://opengis.uab.es/wms/iberia/pdf/acdpi.pdf>
- Núñez, D. (2013). Variabilidad de la sequía meteorológica de largo plazo en la parte mexicana de la cuenca del río Bravo. Tesis de doctorado. Universidad autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales. <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/3960>
- Núñez, D., Treviño, E. J., Reyes, V. M., Muñoz, C. A., Aguirre, O. A., Jiménez, J. (2013). Interpolación espacial de la precipitación media mensual en la cuenca del río Bravo/Grande. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 4(2), 185-193.
- Núñez, D., Treviño, E. J., Reyes, V. M., Muñoz, C. A., Aguirre, O. A., Jiménez, J. (2014). Uso de modelos de regresión para interpolar espacialmente la precipitación media mensual en la cuenca del río Conchos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5 (2), 201-213. <http://www.redalyc.org.org/263129784003.pdf>
- ONEI. (2021). Anuario Estadístico de Cienfuegos 2020.
- Pereira, G. W.; Valente, D. S. M.; Queiroz, D. M. D.; Coelho, A. L. d. F.; Costa, M. M. & Grift, T. (2022). Smart-Map: An Open-Source QGIS Plugin for Digital Mapping Using Machine Learning Techniques and Ordinary Kriging. *Agronomy* 12, 1350. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061350>
- Pérez, R.; Fonseca, C.; Lapinel, B.; González, C.; González, I.; Planos, E.; Cutié, V.; Mitrani, I.; Aguilar, Y.; Carnesoltas, M.; Ballester, M.; Limia, M.; Vega, R.; Vichot, A.; Díaz, O. O.; Pérez, A.; Cangas, R.; Álvarez, L.; Morales, A.; Pérez, J. (2012). Variaciones y cambios del clima. En: Planos, E. O.; Rivero, R. y Guevara, V. Impacto del Cambio Climático y Medidas de Adaptación en Cuba, La Habana, Cuba, pp. 59-120 [http://www.redciencia.cu/geobiblio/paper/2012\\_Planos\\_Impacto%20y%20Adaptacion,%20Libro.pdf](http://www.redciencia.cu/geobiblio/paper/2012_Planos_Impacto%20y%20Adaptacion,%20Libro.pdf)
- Pérez, L. R., Hernández, J. L., Prieto, S. F. (2015). Aplicación de técnicas de interpolación espacial en la estimación de la precipitación en la provincia de Pinar del Río, Cuba. *Revista Geográfica de América Central*, 2 (Especial), 1-19.
- Roura, P., Sistachs, V., Vega, R., Alpizar, M. (2018). Caracterización estadística climatológica de huracanes en Cuba durante el período 1791-2016. *Revista Cubana de Meteorología*, 24(3), 304-312.
- Serrano – Notivoli, R. & Tejedor, E. (2021). From rain to data: A review of the creation on monthly and daily station based gridded precipitation datasets. *Wires Water* 8(6),1-25. <http://doi.org/10.1002/watz.1555>.
- Solano, O., Vázquez, R., Martín, M. E. (2006). Estudio de la extensión superficial anual de la sequía agrícola en Cuba durante el periodo 1951-1990. *Revista Cubana de Meteorología*, 13(2), 41-52.
- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7), 7183-7565. <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>
- Vázquez, R. J & Solano, O. J. (2013). Modelación espacial de la lluvia y la evapotranspiración teniendo en cuenta parámetros geográficos. *Revista Ciencias de la Tierra y el Espacio*, 14(1), 80-90. <https://www.iga.cu/wp-content/uploads/2022/05/08.interpolacio.-agroclimaticaok27.2.13.pdf>
- Vicente, S. M., Saz, M. A. & Cuadrat, J. M. (2003). Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro Valley (Spain): application to annual precipitation and temperature. *Climate research*, 24: 161-180.

Zambrano, M. (2024). *hydroGOF: Goodness-of-fit functions for comparison of simulated and observed hydrological time series*. doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.839854>, R package version 0.5-4, <https://cran.r-project.org/package=hydroGOF>

Zhang, X., Yang, F., Santos, J. L. (2004): RCLimDex (1.0). Manual del usuario. Climate Research Branch Environment Canada. Versión en español: Santos, JL CIIFEN.

M.Sc. Sinaí Barcia Sardiñas. Investigador independiente EE. UU. E-mail: [sinaibs@gmail.com](mailto:sinaibs@gmail.com)  
M.Sc. Dianelly Gómez Díaz. Centro Meteorológico Provincial de Cienfuegos. E-mail: [dianellygomez2310@gmail.com](mailto:dianellygomez2310@gmail.com)  
Lic. Lennis Beatriz Fuentes Roque. Centro Meteorológico Provincial de Cienfuegos. E-mail: [lennis.0320@gmail.com](mailto:lennis.0320@gmail.com)  
M.Sc. Endris Yoel Viera González. Centro Meteorológico Provincial de Cienfuegos. E-mail: [endrisviera@gmail.com](mailto:endrisviera@gmail.com)  
Ing. Leonardo Mejías Seibanes. Centro Meteorológico Provincial de Cienfuegos. E-mail: [Im640724@gmail.com](mailto:Im640724@gmail.com)  
Tec. Raquel Alejandra Angulo Romero. Centro Meteorológico Provincial de Cienfuegos.