



Informe técnico del análisis de variables meteorológicas en la región de Tlacotepec de Benito Juárez y Tepanco de López, Puebla, periodo del primero de enero de 2000 al 25 de septiembre de 2023.	2
Tlacotepec de Benito Juárez	2
<i>Introducción</i>	2
<i>Desarrollo metodológico</i>	3
<i>Análisis de imágenes satelitales</i>	4
<i>Elevación</i>	9
<i>Precipitación</i>	11
<i>Temperaturas</i>	14
<i>Temperatura máxima</i>	14
<i>Temperatura mínima</i>	18
<i>Radiación solar</i>	21
Tepanco de López	24
<i>Introducción</i>	24
<i>Desarrollo metodológico</i>	24
<i>Análisis de imágenes satelitales</i>	25
<i>Elevación</i>	29
<i>Precipitación</i>	30
<i>Temperaturas</i>	31
<i>Temperatura máxima</i>	31
<i>Temperatura Mínima</i>	32
<i>Radiación Solar</i>	33
Conclusiones	34

Informe técnico del análisis de variables meteorológicas en la región de Tlacotepec de Benito Juárez y Tepanco de López, Puebla, periodo del primero de enero de 2000 al 25 de septiembre de 2023.

El presente estudio analiza las variables de la dinámica meteorológica en dos zonas de estudios, la región de Tlacotepec de Benito Juárez y Tepanco de López, en el estado de Puebla; se procesaron variables significativas de precipitación, radiación solar y temperaturas máximas y mínimas, se analizaron imágenes satelitales tipo radar y superespectrales de la constelación Sentinel, PlanetScope, Maxar/Airbus y Landsat 8, esto para contar con la mayor información posible de los años analizados; se procesaron 96 imágenes con periodos que abarcaron primavera, verano, otoño e invierno.

La distancia entra las dos comunidades es de 19.5 km, nada significativo en cuanto a diferencias de datos meteorológicos históricos, el proceso y desarrollo técnico se realizó con software especializado, toda la información se extrapolo e interpolo para dar una mayor certeza en los resultados obtenidos; el procesamiento de las imágenes satelitales no detecta ningún tipo de contaminante atmosférico que pudieran ser causa de alteración en las nubes.

Se desarrolla cartografía de isolíneas meteorológicas así como un análisis y descripción gráfica de las variables procesadas para determinar su comportamiento con modelos.

Se presenta el desarrollo de cada zona de estudio:

Tlacotepec de Benito Juárez

Introducción

En el estudio técnico se analizaron las variables meteorológicas en dicho municipio, usando 24 puntos de referencia, donde principalmente predomina la agricultura mecanizada continua (44.27%) y la agricultura con tracción animal continua (3.62%) (INEGI). Tanto los pronosticadores como los usuarios de la información meteorológica necesitan anticipar los cambios en las condiciones meteorológicas que puedan ocurrir y comprender qué tipo de eventos esperar tanto a corto como a largo plazo. Los mapas o gráficos meteorológicos son herramientas que proporcionan información sobre las condiciones y patrones meteorológicos a gran escala espacial, lo que nos ayuda a



responder a estas interrogantes. Estos mapas, que representan los cambios en la presión, temperatura, viento y otros parámetros atmosféricos en una región determinada, nos permiten obtener información valiosa acerca de los sistemas atmosféricos, sus movimientos y su evolución.

Desarrollo metodológico

Se generó cartografía meteorológica de la zona con 24 puntos (ver figura1).

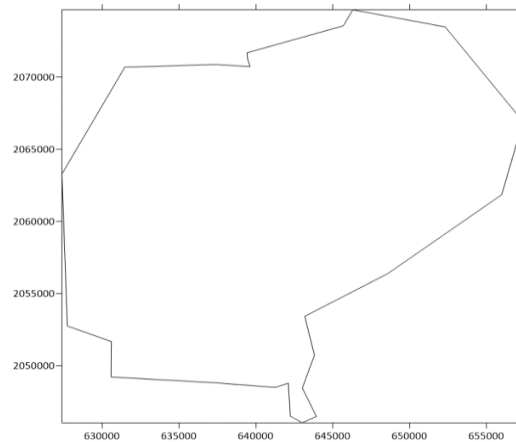
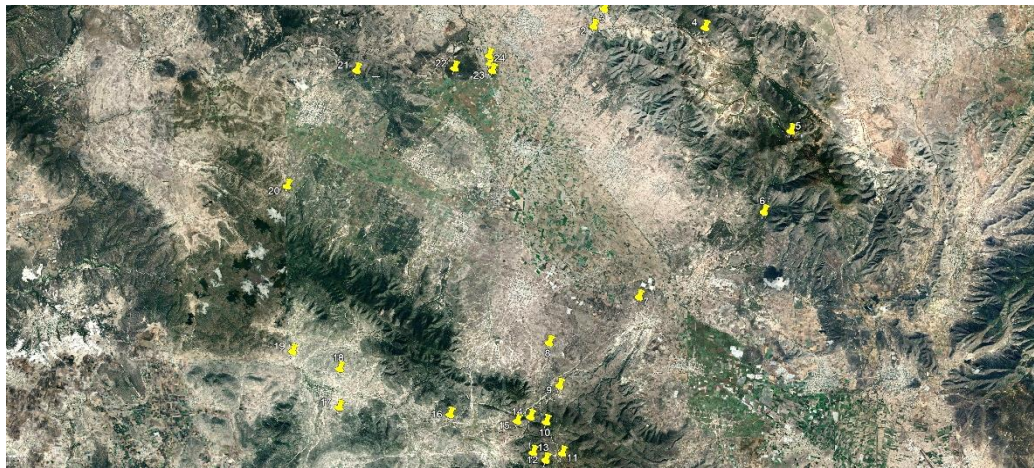


Figura 1. Zona de estudio aplicando imagen satelital extraída de Maxar/Airbus.



En la tabla 1 se presentan las coordenadas geográficas y UTM de la zona.

Punto	Coordenadas UTM X	Coordenadas UTM Y	Coordenadas UTM Z	Latitud en decimales	Longitud en decimales
1	639420	2071684	1987	18.708536	-97.654908
2	645685	2073550	2130	18.736080	-97.624779
3	646303	2074664	2219	18.751363	-97.615562
4	652311	2073475	2427	18.747728	-97.562098
5	657372	2066918	2789	18.690899	-97.511512
6	655988	2061847	2154	18.641884	-97.521194
7	648560	2056367	1911	18.573911	-97.627516
8	643175	2053422	2057	18.573911	-97.627516
9	643807	2050726	2185	18.538303	-97.625168
10	643019	2048452	2350	18.538303	-97.625168
11	643931	2046483	2387	18.538303	-97.625168
12	643010	2046042	2411	18.538303	-97.625168
13	642230	2046510	2278	18.538303	-97.625168
14	642109	2048785	2257	18.538303	-97.625168
15	641249	2048493	2319	18.538303	-97.625168
16	637249	2048822	2075	18.529495	-97.702213
17	630584	2049215	2039	18.529495	-97.702213
18	630601	2051668	2015	18.548602	-97.717998
19	627733	2052750	1915	18.560489	-97.73032
20	627381	2063288	1983	18.638935	-97.638146
21	631467	2070682	2094	18.720510	-97.748158
22	637351	2070870	2009	18.638935	-97.638146
23	639625	2070730	1977	18.638936	-97.638146
24	639469	2071208	1982	18.727633	-97.677109°

Tabla 1. Coordenadas UTM y Geográficas utilizadas para la zona de estudio.

Análisis de imágenes satelitales

El estudio técnico de modelos meteorológicos se realizó con el software especializado de USGS Explorer, se descargaron 96 imágenes que comprenden los años 2000-2023 dividiendo cada año en sus 4 estaciones climáticas (primavera, verano, otoño e invierno). El procesamiento de imágenes satélites de la misión óptica Landsat 8 con resolución espacial de 30 cm y cobertura de nubosidad menor a 10 %, no detecta presencia de contaminantes que puedan alterar las características físicas de las nubes. (ver figuras 2 a 6).



Figura 2. Imagen satelital del año 2000 (julio 25-verano lado izquierdo y diciembre 25-invierno lado derecho), no detecta presencia de contaminantes que puedan alterar las características físicas de las nubes.

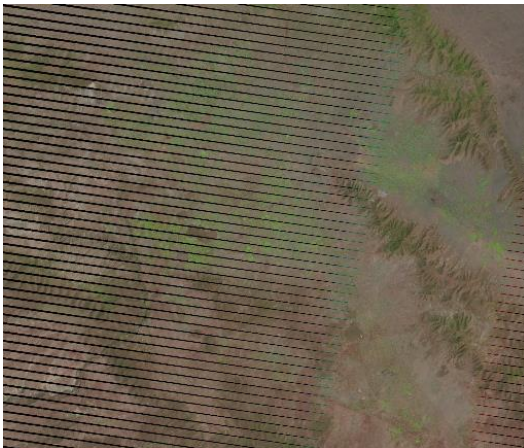


Figura 3. Imagen satelital del año 2005 (agosto 18-verano lado izquierdo y diciembre 27-invierno lado derecho), no detecta presencia de contaminantes que puedan alterar las características físicas de las nubes. del 2005.



Figura 4. Imagen satelital del año 2010 (julio 25-verano lado izquierdo y diciembre 24-invierno lado derecho), no detecta presencia de contaminantes que puedan alterar las características físicas de las nubes.

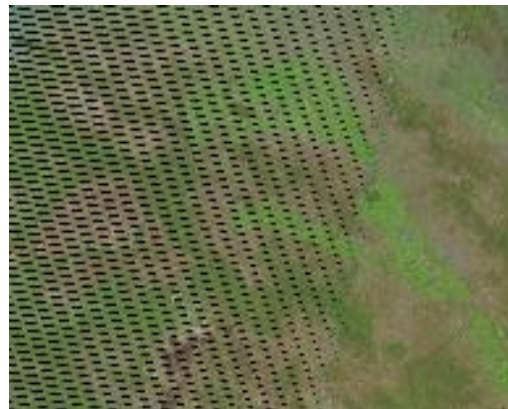


Figura 5. Imagen satelital del año 2015 (septiembre 11-verano lado izquierdo y diciembre 29-invierno lado derecho), no detecta presencia de contaminantes que puedan alterar las características físicas de las nubes.

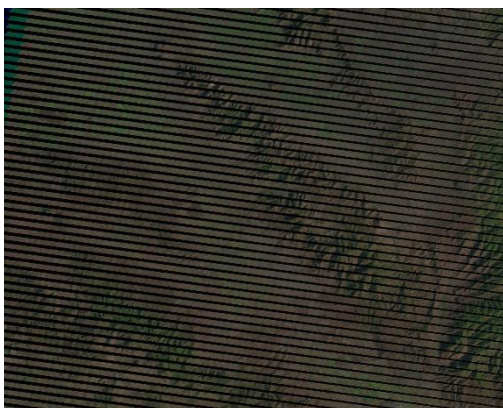


Figura 6. Imagen satelital del año 2023 (abril 25-primavera lado izquierdo y septiembre 25-otoño lado derecho), no detecta presencia de contaminantes que puedan alterar las características físicas de las nubes.

El proceso y análisis de los datos históricos de la zona de estudio, fue muy importante para entender el comportamiento dinámico atmosférico de las variables meteorológicas de temperatura máxima y mínima, precipitación y radiación solar.

El proceso de interpolación y extrapolación de datos abarcaron el periodo del primero de enero de 2000 al 25 de septiembre de 2023.

Posteriormente se realizó el desarrollo de modelos en 2D y 3D con las bases de datos, el proceso de los modelos fue utilizando la robusta plataforma del software Golden Surfer. Mediante este proceso se logró extraer información esencial, incluyendo perfiles detallados, análisis minuciosos de vectores, interpolación precisa, generación de modelos tridimensionales para una representación visual más completa, y la identificación de picos y depresiones geográficas que tienen un impacto relevante en la región.

Una vez que completo este procedimiento de análisis, incorporamos la información recopilada de manera coherente y estructurada en el programa correspondiente. Como resultado, obtuvimos una representación visual y geoespacial que nos permitió observar con claridad y precisión la delimitación exacta del municipio en estudio, lo que es crucial para futuras investigaciones y toma de decisiones relacionadas con esta área geográfica. Los datos promedio anuales de las variables utilizadas se presentan en la tabla 2.



Año	Coordenadas UTM X	Coordenadas UTM Y	Coordenadas UTM Z	Temp. Max °C	Temp. Min °C	Precipitación (mm)	Radiación solar (W/m ²)
2000	639420	2071684	1987	25.6	9.1	480.1	6777
2001	645685	2073550	2130	25.8	10.5	410.8	7020
2002	646303	2074664	2219	26.4	10.3	446.7	7003
2003	652311	2073475	2427	25.9	11.4	580.3	5999
2004	657372	2066918	2789	25.7	10.1	585.2	5675
2005	655988	2061847	2154	25.2	10.7	381.7	6887
2006	648560	2056367	1911	25.3	9.9	360.5	6989
2007	643175	2053422	2057	25.1	10.1	460.3	6001
2008	643807	2050726	2185	25.6	10.9	570.7	6006
2009	643019	2048452	2350	25.9	10.3	430.2	7889
2010	643931	2046483	2387	26.7	9.4	454.2	7564
2011	643010	2046042	2411	26.6	9.3	701.7	6009
2012	642230	2046510	2278	25.5	9.1	409.9	7891
2013	642109	2048785	2257	25.7	9.2	338.8	6781
2014	641249	2048493	2319	25.4	11.1	705.5	6002
2015	637249	2048822	2075	26.2	9.9	667.6	6669
2016	630584	2049215	2039	26.6	9.1	470.7	6981
2017	630601	2051668	2015	25.4	9.5	498.2	7808
2018	627733	2052750	1915	25.1	9.3	220.1	5999
2019	627381	2063288	1983	27.1	9.2	500.4	6698
2020	631467	2070682	2094	26.6	9.1	318.3	7891
2021	637351	2070870	2009	26.4	9.3	318.9	6967
2022	639625	2070730	1977	26.6	9.1	540.1	7902
2023	639469	2071208	1982	25.9	9.6	315.1	6989

Tabla 2. Datos utilizados para el estudio (coordenadas UTM y variables meteorológicas).

Elevación

A partir de este mapa base se introdujeron las variables meteorológicas de la tabla 2, para identificar su comportamiento a través de los años, empezando por la elevación del terreno natural que es representada por curvas de nivel. Entre más se acerca a la tonalidad café se representa la altitud más baja, por el contrario, al acercarse al amarillo alcanza su punto máximo (ver figura 7).

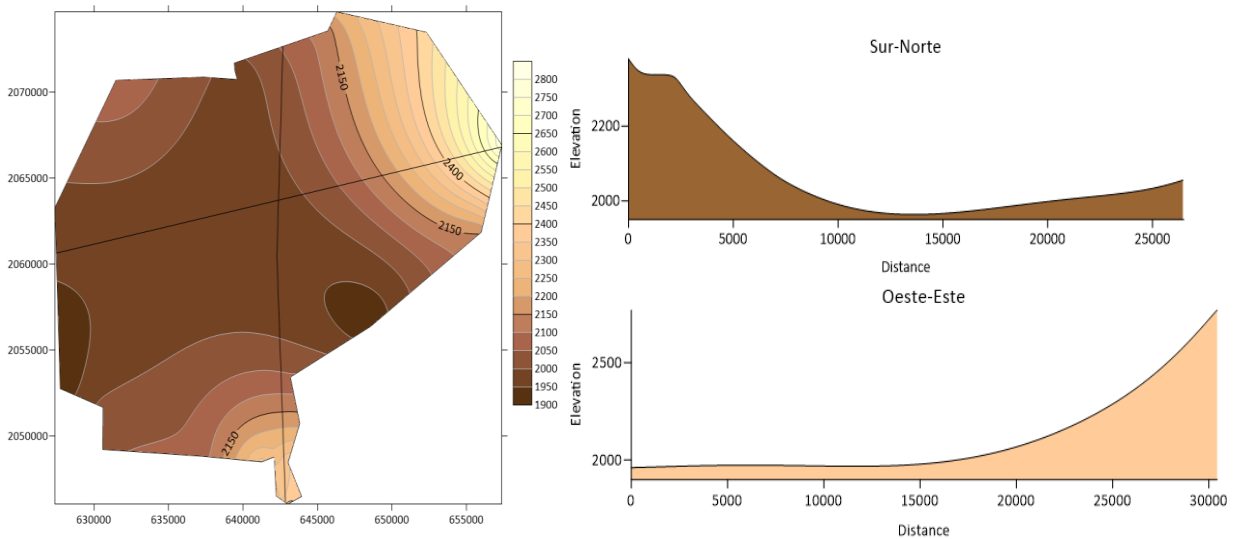


Figura 7. Curvas de nivel del municipio con perfiles de elevación de sur a norte y oeste a este, las partes más bajas indican la posible dirección de escorrentía del agua.

Al analizar detenidamente los perfiles topográficos de la región, se hace evidente que en las áreas ubicadas al sur y al este del municipio se encuentran las elevaciones más altas, formando picos notables. En contraste, la zona central de la región muestra una marcada uniformidad en lo que respecta a la altitud, sin variaciones significativas en el terreno. Las imágenes que se han presentado anteriormente proporcionan una visión más profunda del comportamiento geográfico de la región en cuestión.

En la figura 8, se representan los vectores que indican la dirección en la que la elevación del terreno experimenta cambios. Estos vectores también varían en tamaño, lo que nos brinda información sobre la magnitud de estos cambios altimétricos. Este análisis refuerza la observación previa de que en las áreas al sur y al este del municipio se encuentran las elevaciones más notables, mientras que en el centro se mantiene una uniformidad altimétrica.

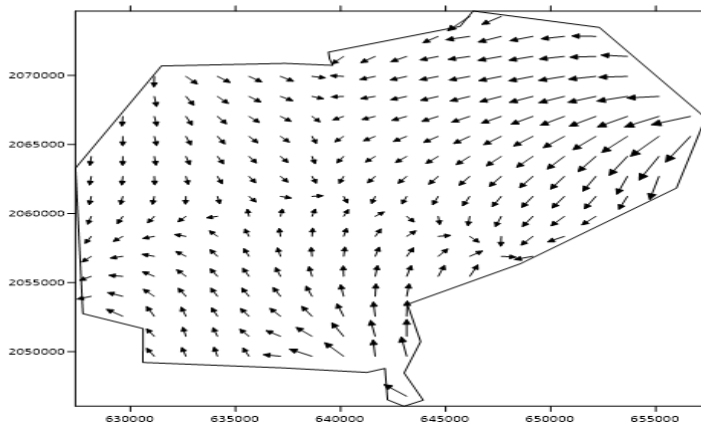


Figura 8. Comportamiento vectorial de las elevaciones.

Por otro lado, en la figura 9, se presenta un modelo tridimensional que aporta una representación visual aún más rica del terreno. En este modelo, el color azul se utiliza para resaltar las áreas donde el terreno alcanza sus puntos más altos, mientras que el color verde se utiliza para identificar las depresiones. Esta representación permite una comprensión más completa de la topografía de la zona y es esencial para la planificación de proyectos, la gestión de recursos y la toma de decisiones relacionadas con la geografía y el terreno en esta región.

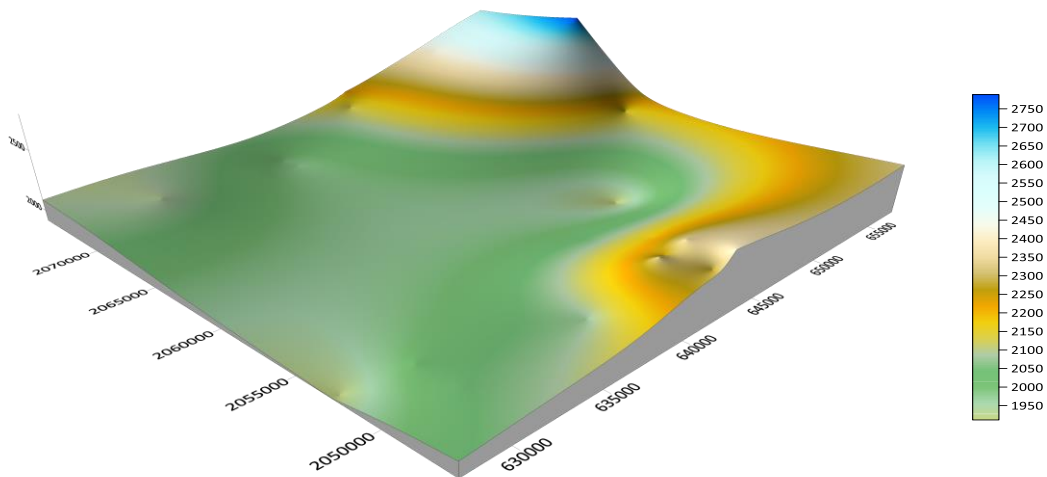


Figura 9. Modelo 3D de las elevaciones que nos indica las características del terreno con respecto al deslizamiento de las precipitaciones.

Precipitación

La figura 10 proporciona una representación gráfica de la precipitación (isoyetas) en el municipio a lo largo de un período de 24 años, comenzando en el año 2000 (punto 1), marcado con un punto rojo y llegando hasta el año 2023 (punto 24), marcado con un punto morado. Esta gráfica permite observar y analizar cómo ha variado la precipitación a lo largo del tiempo, lo que puede revelar patrones climáticos, tendencias de sequía o lluvia, y otros cambios importantes en las condiciones meteorológicas a lo largo de los años.

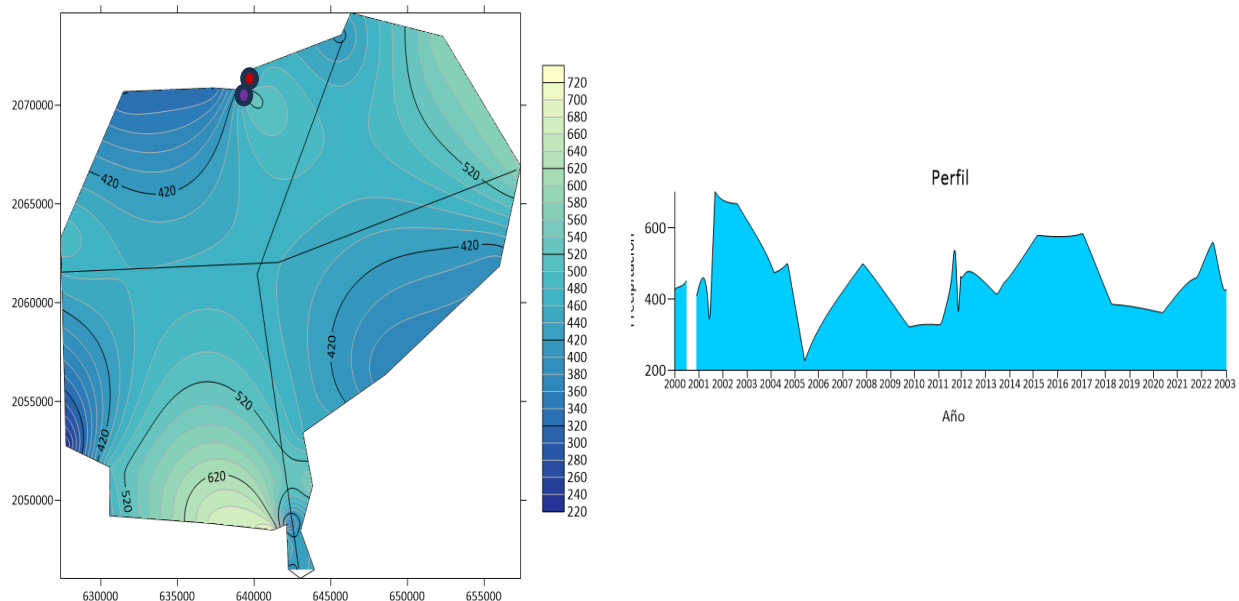


Figura 10. En la escala de la cartografía de isoyetas, el color amarillo claro indica la precipitación mayor y el azul fuerte la menor (lado izquierdo), y del lado derecho el perfil de precipitación acumulado por año de estudio de norte a sur y de este a oeste, aplicando el método kriging.

Los resultados gráficos revelan que, en general, la precipitación exhibe un comportamiento uniforme a lo largo de los años estudiados. Sin embargo, es importante destacar la presencia de valores atípicos, como se evidencia claramente en el año 2018, donde la precipitación alcanzó su nivel más bajo, situándose en 220.1 mm. Por otro lado, se identifican los años 2011, 2014 y 2015 como los más favorables en cuanto a precipitación durante la última década. Estos años registraron datos que oscilaron entre los 617 mm y 705 mm, lo que indica un patrón de lluvias significativamente superior en comparación con otros períodos (ver figura 11).

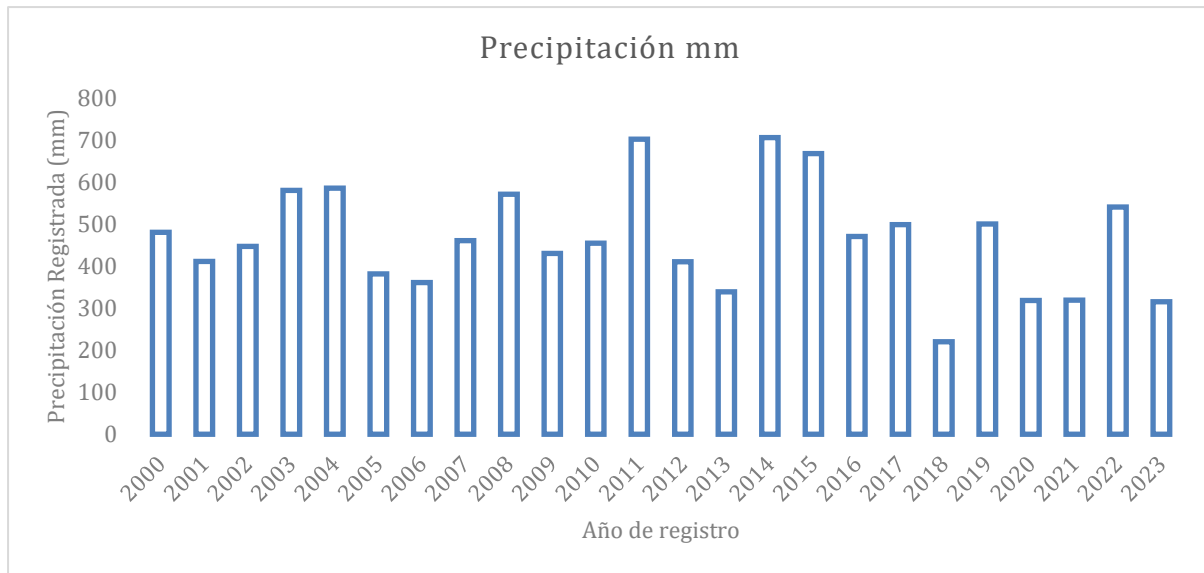


Figura 11. Gráfica de precipitación anual.

Por otro lado, al analizar la figura 12, se presenta un formato de dispersión y se complementa con una línea de tendencia que se sitúa en un rango de valores entre 400 mm y un poco más de 500 mm. Esta línea de tendencia proporciona una representación visual de la tendencia central de la precipitación a lo largo de los años, 10 años con tendencia a la alza y 14 años con tendencia a la baja; donde el año 2023 presenta una tendencia baja con tan solo 315.1 mm de precipitación acumulada.

En contraste con el año 2018, el año 2014 se destacó como el período de tiempo con el mejor rendimiento de precipitación en el municipio, registrando un impresionante total de 705.1 mm. Esta cifra indica que el municipio experimentó un año especialmente húmedo en 2014, lo que podría haber beneficiado a la agricultura, la recarga de fuentes de agua y la vegetación en general. Es importante destacar que estos extremos en la precipitación pueden tener efectos significativos en la economía local, la seguridad hídrica y la calidad de vida de los habitantes del municipio. Por lo tanto, comprender estas variaciones es fundamental para la planificación y la toma de decisiones a nivel municipal en relación con el clima y los recursos naturales.

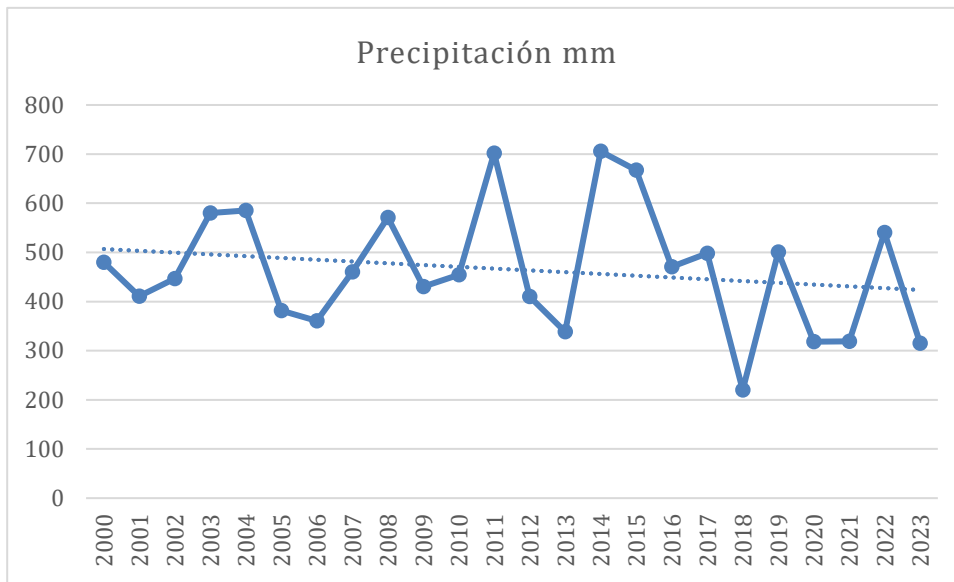


Figura 12. Esta línea de dispersión proporciona una representación visual de la tendencia central de la precipitación a lo largo de los años, 10 años con tendencia a la alza y 14 años con tendencia a la baja; donde el año 2023 presenta una tendencia baja con tan solo 315.1 mm de precipitación acumulada.

Además de las isolíneas que representan la precipitación, se utilizó la representación con vectores para analizar el comportamiento de las lluvias en la región. En esta representación, las flechas nos proporcionan información valiosa sobre la dirección y la magnitud de esta. Las flechas más pequeñas indican áreas con menor precipitación, mientras que las flechas más grandes señalan áreas con una precipitación más abundante (ver figura 13).

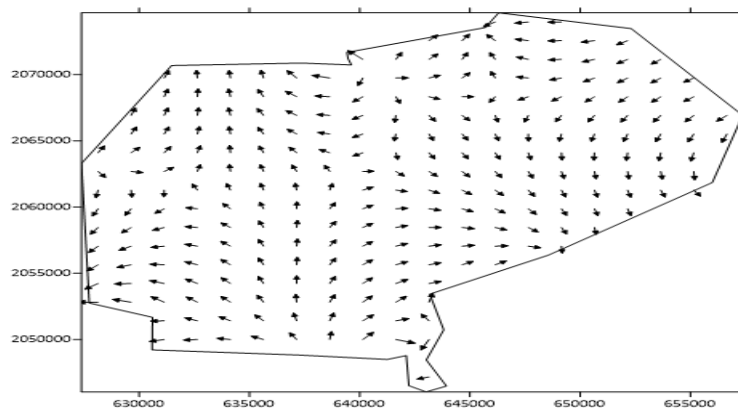


Figura13. Modelo vectorial que muestra la tendencia de la precipitación en la zona de estudio.

Por otro lado, el mapa tridimensional agrega una dimensión adicional a nuestro análisis climático, ya que destaca con un pico que representa la máxima precipitación y se representa con un color azul, lo que sugiere un período de lluvias excepcionalmente abundantes en esa zona (ver figura 14).

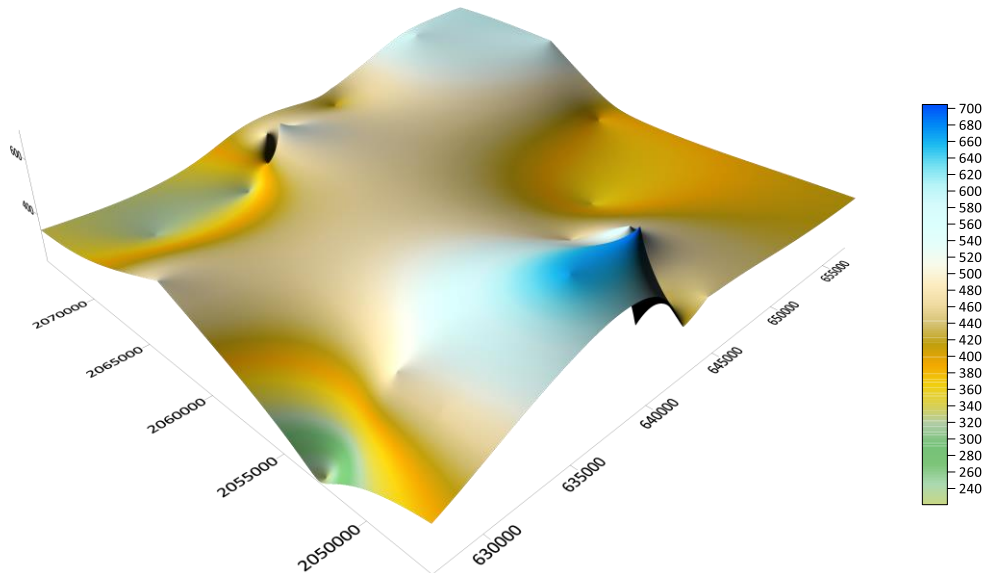


Figura 14. El color azul y ubicada al sureste, indica un aumento de precipitación en los años estudiados de forma significativa, igual que una disminución hacia el norte, centro y oeste de la zona.

Temperaturas

Temperatura máxima

Para profundizar en el análisis de las variables climáticas, en particular las relacionadas con la temperatura, se optó por segmentar estas mediciones en dos categorías distintas: temperatura máxima y temperatura mínima. La figura 15 representa las temperaturas máximas a lo largo de un período de 24 años.

Se representa un conjunto de isolíneas que traza las variaciones en la temperatura máxima registrada en la región de estudio durante el período considerado. Estas isolíneas se generan mediante la interpolación de datos recopilados a lo largo de datos históricos de información satelital meteorológica, lo que permite una representación espacialmente continua de la temperatura máxima e identificar patrones de temperatura, áreas con tendencias al alza o la baja, y zonas con cambios estacionales notables.

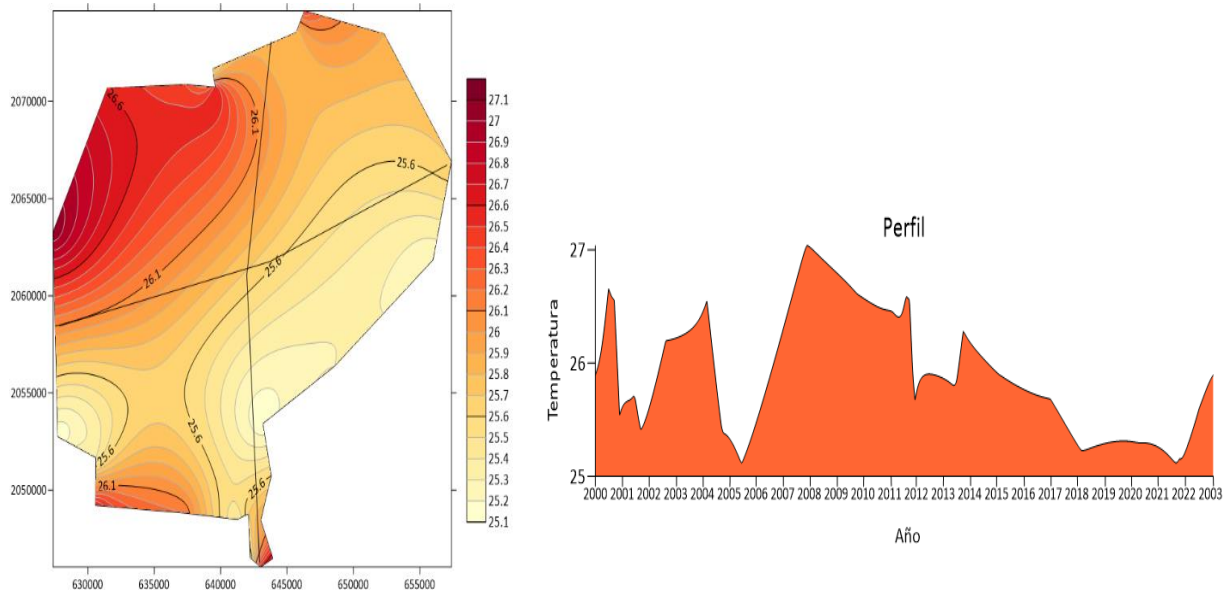


Figura 15. En la escala de la cartografía de temperaturas o isotermas máximas, el color rojo oscuro indica la temperatura máxima y el amarillo claro la temperatura menor (lado izquierdo), y del lado derecho el perfil de isotermas máximas acumulado por año de estudio de norte a sur y de este a oeste con el método kriging.

El análisis de estas isolíneas de temperatura máxima a lo largo del tiempo es esencial para comprender las dinámicas climáticas de la región y su relación con fenómenos climáticos globales o locales. Además, puede servir como una herramienta valiosa en la planificación de actividades que son sensibles a las variaciones de temperatura, como la agricultura, la gestión de recursos hídricos y la adaptación al cambio climático.

A través del análisis de las isolíneas de temperatura máxima, se observa un patrón en el comportamiento térmico de la región. A partir del año 2019, se registra un incremento notorio en la temperatura máxima, alcanzando su punto máximo de 27.1 °C para dicho año; este aumento pronunciado puede atribuirse a las influencias del cambio climático que afectan a nivel mundial.

Este fenómeno es coherente con las tendencias observadas en muchas regiones del planeta, donde se ha documentado un aumento gradual de las temperaturas debido al calentamiento global, causado principalmente por la emisión de gases de efecto invernadero derivados de actividades humanas, como la quema de combustibles fósiles y la deforestación, así como la actividad del volcán Popocatepetl (ver figura 16).

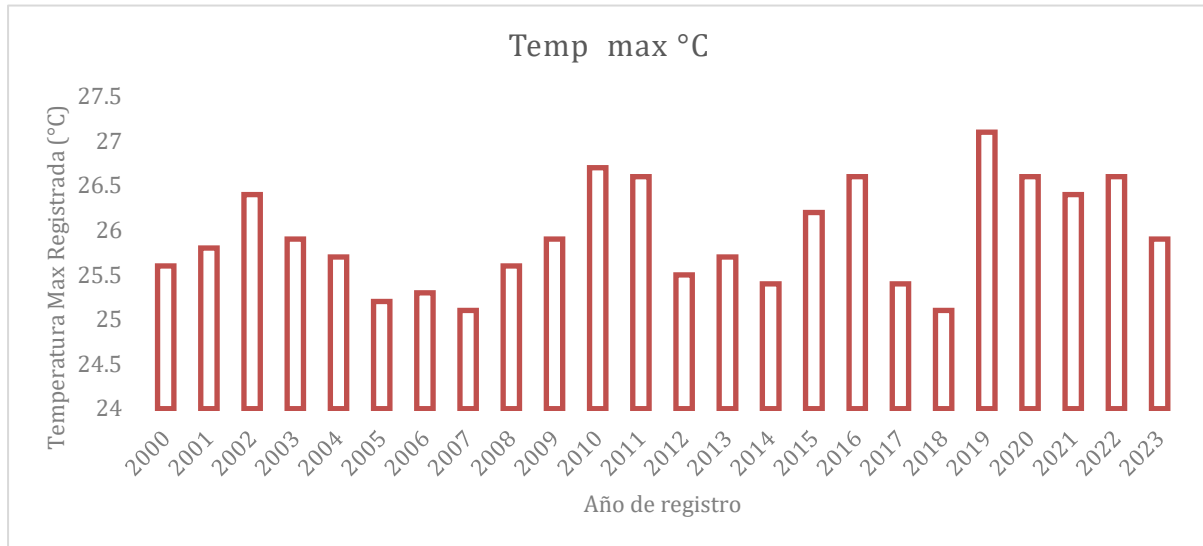


Figura 16. Se observa que las temperaturas máximas tienen un comportamiento de oscilación, esto significa que las temperaturas varían de forma significativa con tendencia a una disminución en el año 2023.

En la figura 17, el formato de dispersión tiende levemente a aumentar, aunque para el año 2023 se nota una tendencia mínima.

Los años previos (4), se comportaron con temperaturas promedio a los 27 °C.

Este análisis revela una dinámica térmica significativa en la región, donde la temperatura máxima muestra un comportamiento más estable en la primera década, seguido de un aumento notable en la segunda década. Estos hallazgos pueden ser indicativos de cambios climáticos locales o regionales y son esenciales para la comprensión de la variabilidad térmica en el área estudiada, lo que a su vez puede tener implicaciones importantes en la toma de decisiones en sectores como la agricultura, la gestión del agua y la adaptación al cambio climático.

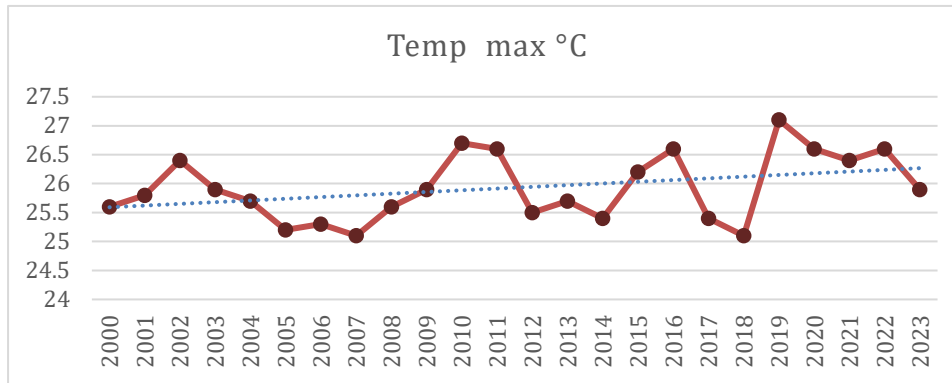


Figura 17. La gráfica de dispersión presenta un comportamiento dinámico, es decir los primeros 12 años tienen un patrón que se repite los siguientes 12 años.

En la figura 18, se ve el comportamiento vectorial de las temperaturas máximas, se aprecia la dirección en la zona de estudio.

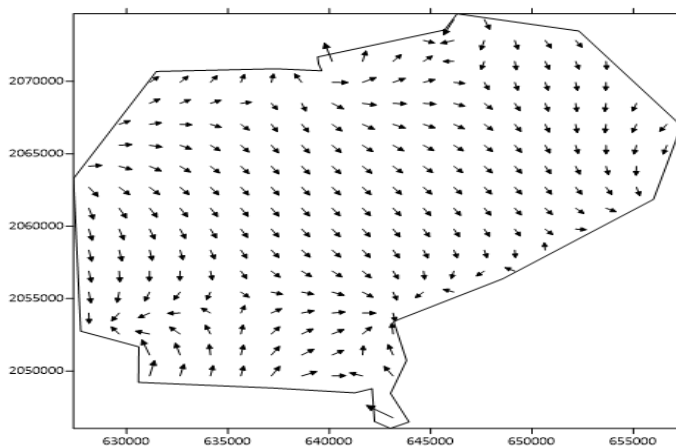


Figura 18. El análisis dimensional de los vectores refleja la dirección sobre la superficie analizada.



La figura 19 presenta el modelo 3D de las isotermas máximas.

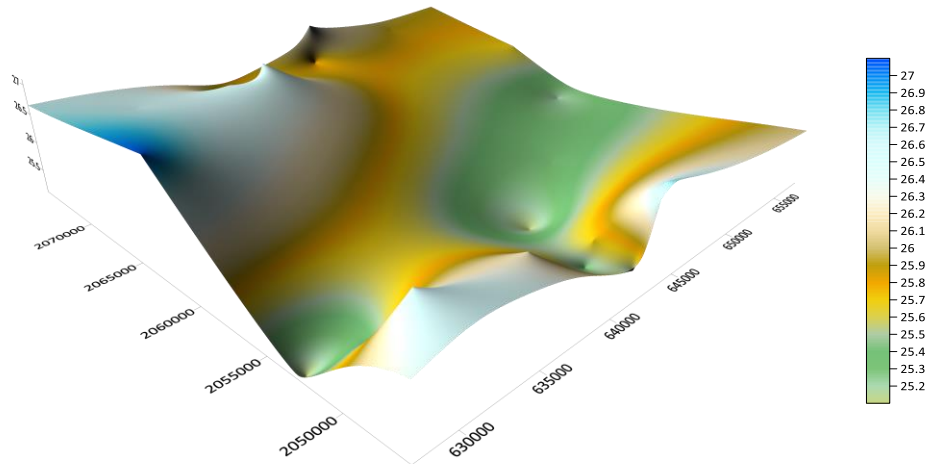


Figura 19. En color azul la temperatura máxima y en verde la mínima de las isotermas máximas de la zona de estudio.

Temperatura mínima

Se analiza el comportamiento dinámico de las temperaturas mínimas que son indicativo de las oscilaciones térmicas en el ambiente, es decir entre las ondas cálidas y frías (ver figura 20).

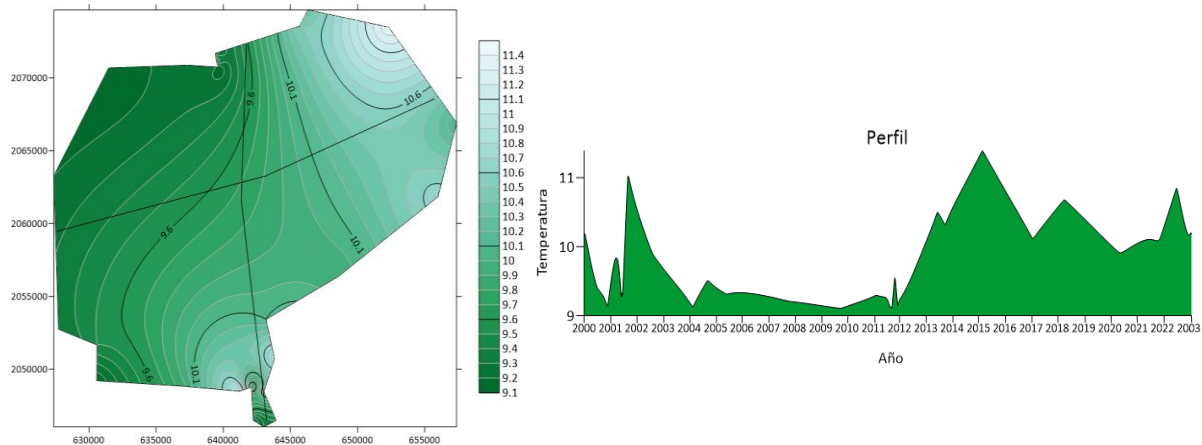


Figura 20. Temperaturas o isotermas mínimas, el color verde claro indica la temperatura máxima y el verde oscuro la temperatura mínima (lado izquierdo), y del lado derecho el perfil de isotermas mínimas acumulado por año de estudio de norte a sur y de este a oeste con el método kriging.



La gráfica de la figura 21, muestra la tendencia de las temperaturas mínimas, donde los años 2003 y 2014 tienen un promedio aproximado de 11.2 °C, los siguientes años presentan oscilaciones que van de los 9.1 °C a los 9.9 °C.

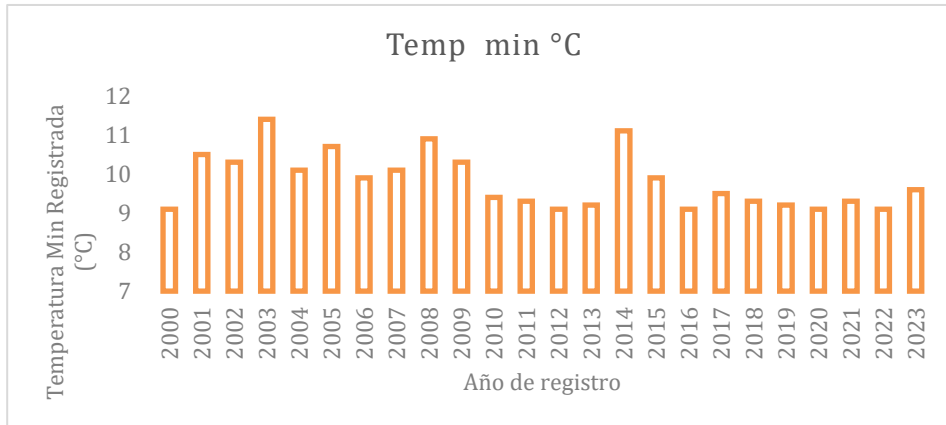


Figura 21. El año 2023 presenta una temperatura mínima de 9.6 °C, los años previos a la baja, esto sugiere que los rangos de temperatura tienden a comportarse de forma casi lineal.

En la figura 22, se presenta la gráfica de dispersión de la temperatura mínima que representa la relación o distribución de valores a lo largo de un conjunto de datos en el periodo de los 24 años.

Se identifican 15 años por debajo de la media y 9 años por arriba de esos datos, con una clara tendencia a la baja.

Esta información proporciona una comprensión profunda de las condiciones climáticas extremas en la zona de estudio. El análisis de estos valores mínimos puede ser esencial para identificar posibles eventos de congelación o temperaturas inusualmente frías que pueden tener un impacto significativo en la agricultura, la ecología local o la vida cotidiana de las personas en la región.

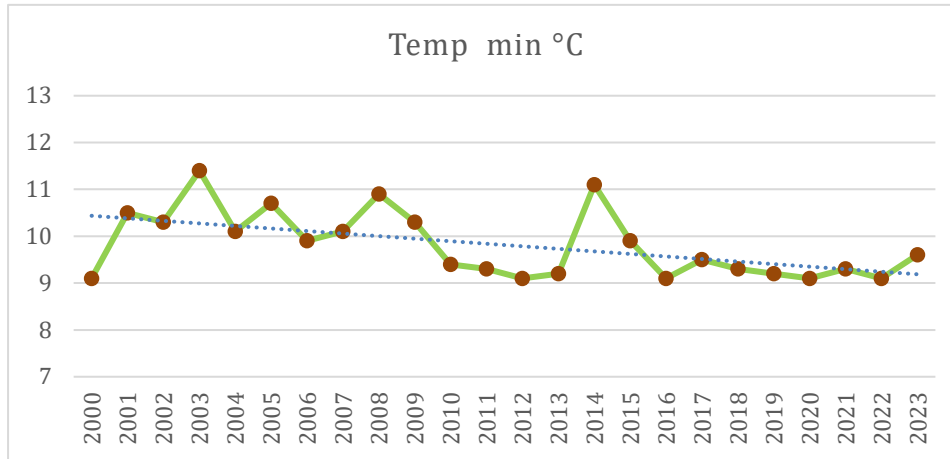


Figura 22. Dispersión de los datos dentro de los años analizados en la zona de estudio.

El análisis vectorial (ver figura 23), representa el comportamiento de la tendencia en la región sobre la superficie de estudio.

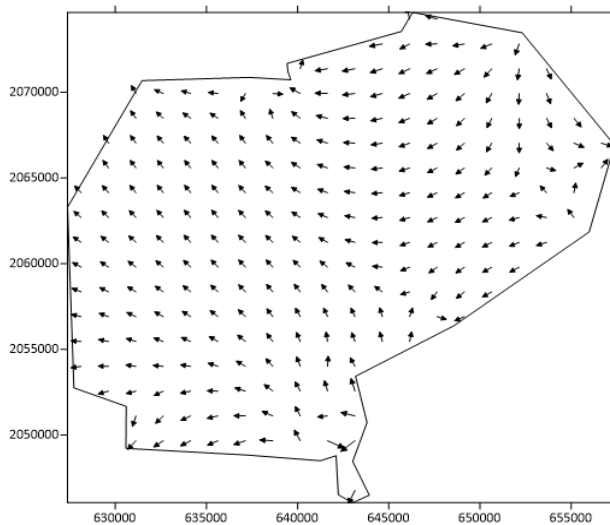


Figura 23. Tendencia del análisis vectorial de las temperaturas mínimas sobre la superficie de estudio.

La figura 24 representa el modelo 3D de las temperaturas mínimas.

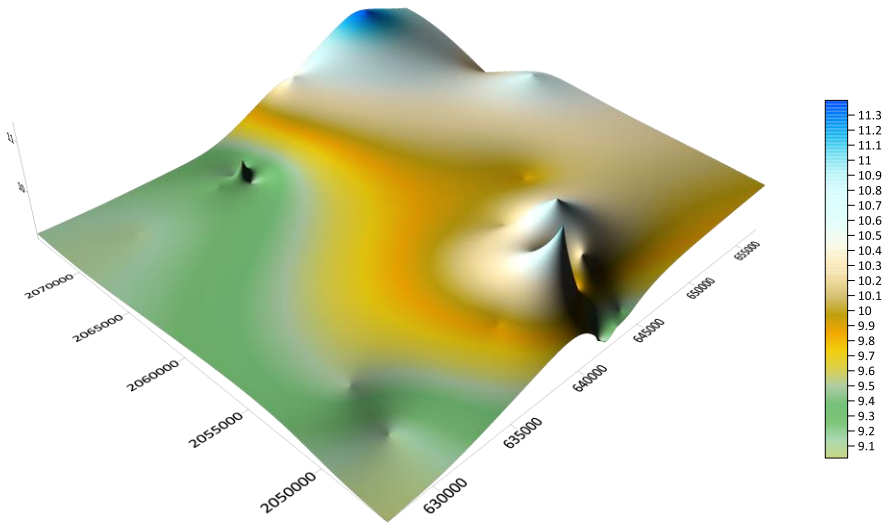


Figura 24. En color azul la temperatura máxima y en verde la mínima de las isotermas mínimas de la zona de estudio.

Radiación solar

La radiación solar procesada y analizada para la región, es importante porque se correlaciona con la temperatura, la cual a su vez es un indicativo de la probabilidad de precipitación. En la figura 25 se presenta la zona de estudio y el perfil de norte a sur y de este a oeste, proceso con el método de interpolación y extrapolación.

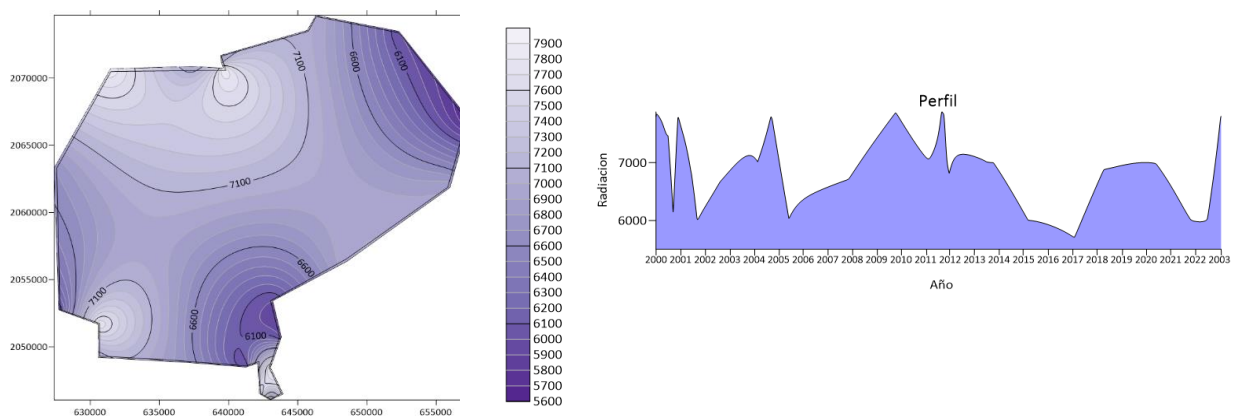


Figura 25. Radiación solar, el color claro la máxima radiación acumulada anual y el morado fuerte la mínima (lado izquierdo), y del lado derecho el perfil de radiación solar acumulado por año de estudio de norte a sur y de este a oeste con el método kriging.



La figura 26 representa la gráfica de la radiación solar, se observa que la cantidad de energía solar que se propaga sobre la zona de estudio tiene oscilaciones durante el periodo analizado, es muy importante porque es el motor que determina la dinámica de los procesos atmosféricos y el clima.

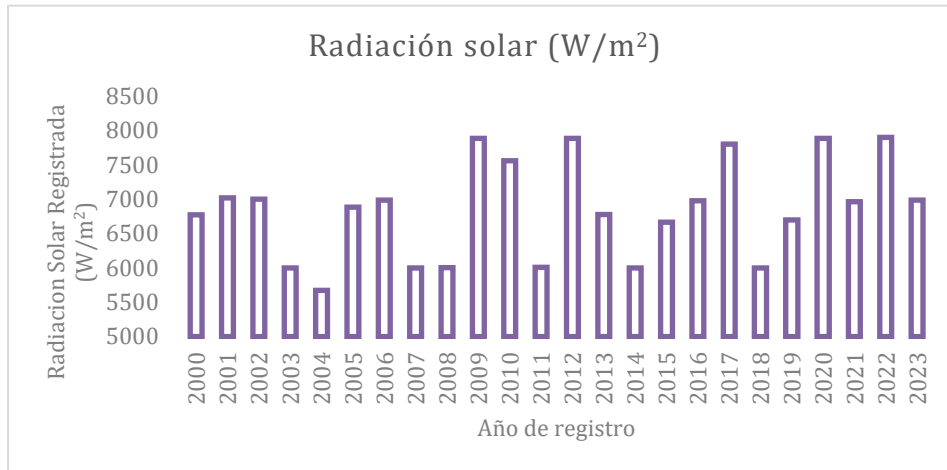


Figura 26. La gráfica muestra un comportamiento anormal en el año 2004, los demás años presentan rangos dentro la dinámica atmosférica razonables.

En el análisis de la dispersión de datos (ver figura 27), se observan 12 años por arriba de los 7000 W/m² y 12 años por debajo de ese rango. El año 2023 tiende a ser un año con radiación solar baja.

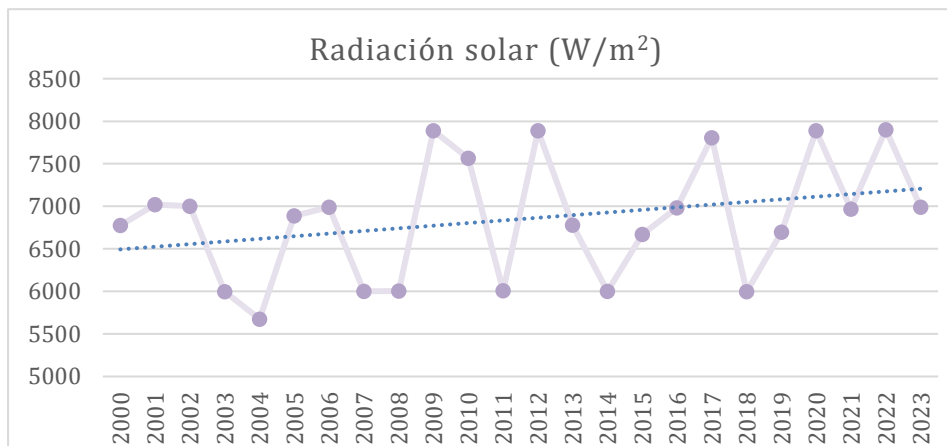


Figura 27. Dispersión de datos, la tendencia del año 2023 es a la baja.

Para una comprensión más detallada de la radiación solar, fundamental recurrir al diagrama vectorial, ya que nos proporciona una representación visual efectiva de la distribución de esta, se observa con mayor claridad la dirección hacia la cual se encuentra la radiación en la zona de estudio (ver figura 28).

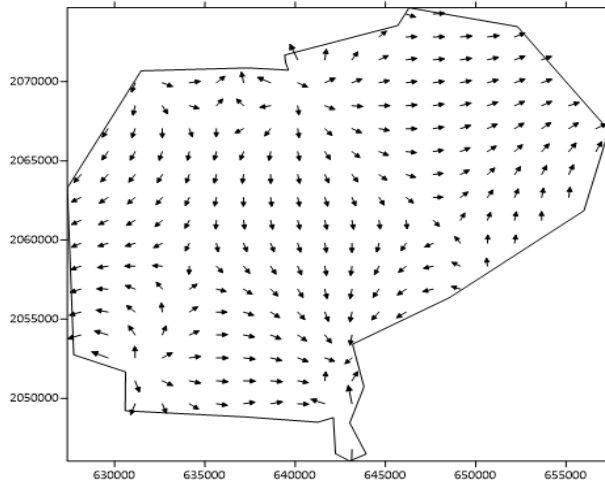


Figura 28. Análisis del comportamiento vectorial de la radiación solar.

En las áreas de mayor altitud, el impacto de la radiación solar es menor, en las partes bajas es mayor.

En esta zona de estudio se detectó que la radiación solar en la superficie incide directamente en las condiciones meteorológicas de la zona.

Es muy importante señalar que esta variable es probable que sea la causante de la falta de lluvia en la región en los últimos años (ver figura 29).

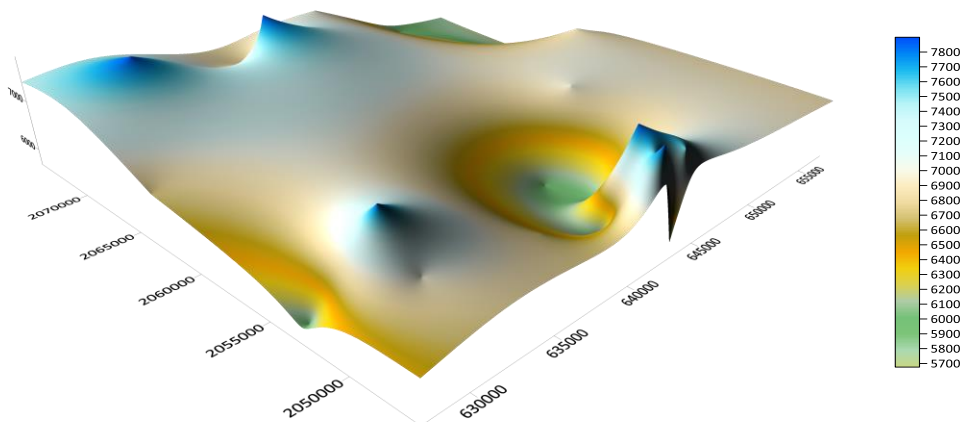


Figura 29. Rango de radiación solar en la zona de estudio.



Tepanco de López

Introducción

En el estudio técnico se analizaron las variables meteorológicas en dicho municipio, usando 24 puntos de referencia; tanto los pronosticadores como los usuarios de la información meteorológica necesitan anticipar los cambios en las condiciones meteorológicas que puedan ocurrir y comprender qué tipo de eventos esperar tanto a corto como a largo plazo. Los mapas o gráficos meteorológicos son herramientas que proporcionan información sobre las condiciones y patrones meteorológicos a gran escala espacial, lo que nos ayuda a responder a estas interrogantes. Estos mapas, que representan los cambios en la presión, temperatura, viento y otros parámetros atmosféricos en una región determinada, nos permiten obtener información valiosa acerca de los sistemas atmosféricos, sus movimientos y su evolución.

Desarrollo metodológico

Se generó cartografía meteorológica de la zona con 24 puntos (ver figura 30)

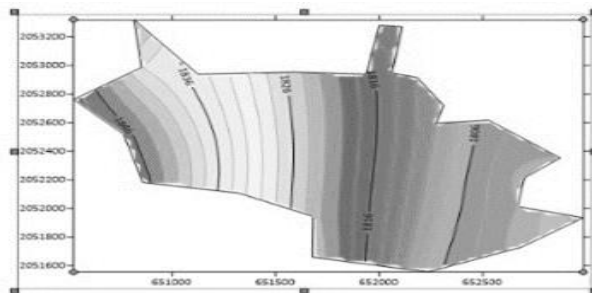
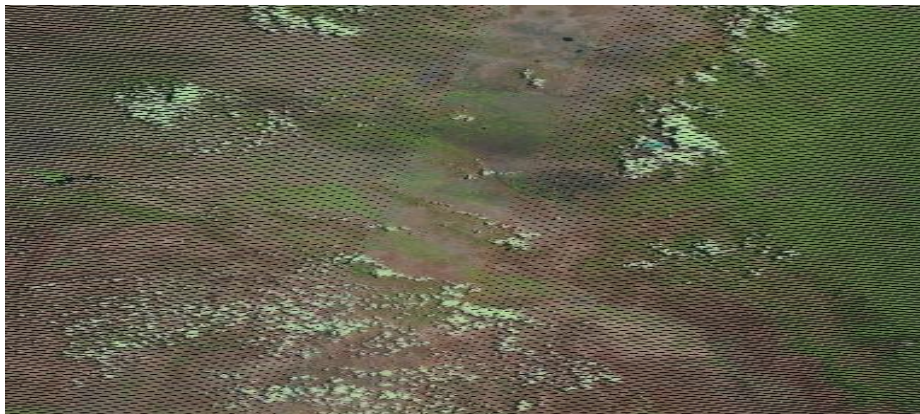


Figura 30. Zona de estudio aplicando imagen satelital extraída de PlanetScope.



En la tabla 3 se presentan las coordenadas geográficas y UTM de la zona.

Punto	Coordenadas UTM X	Coordenadas UTM Y	Coordenadas UTM Z	Latitud en decimales	Longitud en decimales
1	652000	2053281	1812	18.555242	-97.561585
2	652110	2053270	1813	18.555242	-97.561585
3	652061	2052946	1814	18.555242	-97.561585
4	652183	2052915	1812	18.555416	-97.562356
5	652311	2052719	1809	18.555416	-97.562408
6	652275	2052596	1810	18.556956	-97.559344
7	652529	2052617	1805	18.556956	-97.559344
8	652875	2052353	1802	18.557589	-97.560290
9	652701	2052214	1801	18.557589	-97.560290
10	652668	2052013	1802	18.558506	-97.561565
11	652986	2051935	1797	18.558506	-97.561565
12	652688	2051730	1801	18.558506	-97.561565
13	652236	2051556	1807	18.561534	-97.562064
14	651678	2051659	1824	18.561534	-97.562064
15	651681	2051944	1823	18.561534	-97.562064
16	651320	2052108	1833	18.561534	-97.562064
17	650858	2052182	1847	18.561534	-97.562064
18	650524	2052762	1849	18.561534	-97.562064
19	650852	2052986	1838	18.561534	-97.562064
20	650817	2053318	1843	18.561534	-97.562064
21	651125	2052939	1835	18.558506	-97.561565
22	651589	2052953	1825	18.558506	-97.561565
23	651937	2052939	1817	18.554117	-97.558086
24	651998	2052950	1828	18.556666	-97.558868

Tabla 3. Coordenadas UTM y Geográficas utilizadas para la zona de estudio.

Análisis de imágenes satelitales

El estudio técnico de modelos meteorológicos se realizó con el software especializado de USGS Explorer, se descargaron 96 imágenes que comprenden los años 2000-2023 dividiendo cada año en sus 4 estaciones climáticas (primavera, verano, otoño e invierno). Se utilizarán imágenes satélites de la misión óptica Sentinel con resolución espacial de 15 cm y cobertura de nubosidad menor a 10 % (ver figuras 31 a 35).

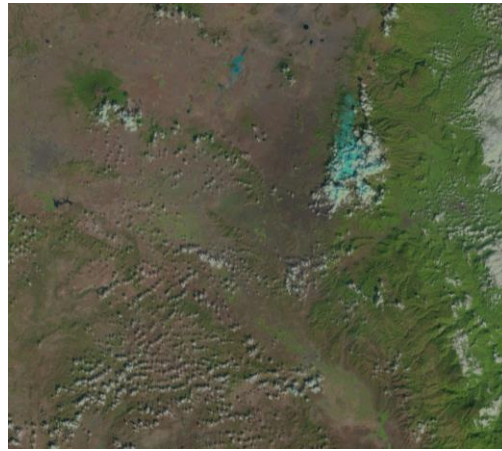
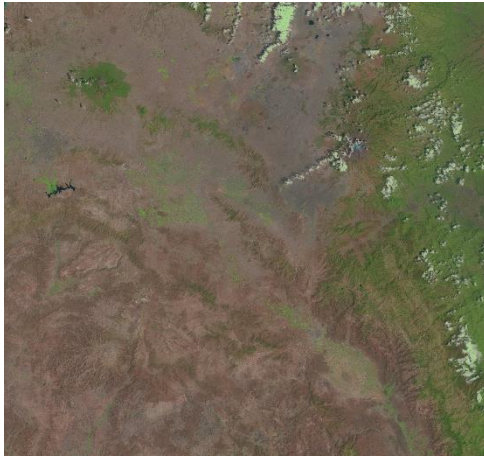


Figura 31. Imagen satelital del año 2000 (marzo 23-primavera lado izquierdo y octubre 15-otoño lado derecho), no detecta presencia de contaminantes que puedan alterar las características físicas de las nubes.

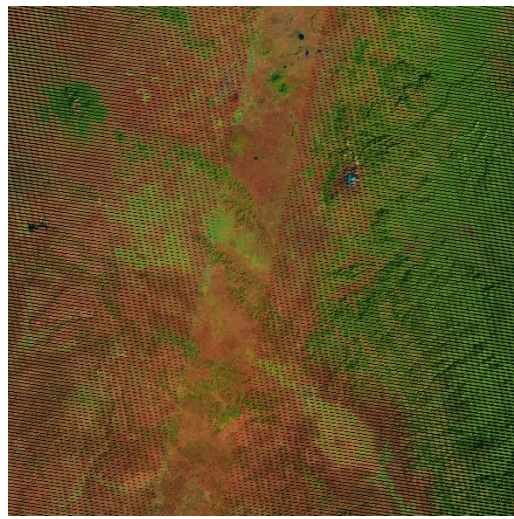
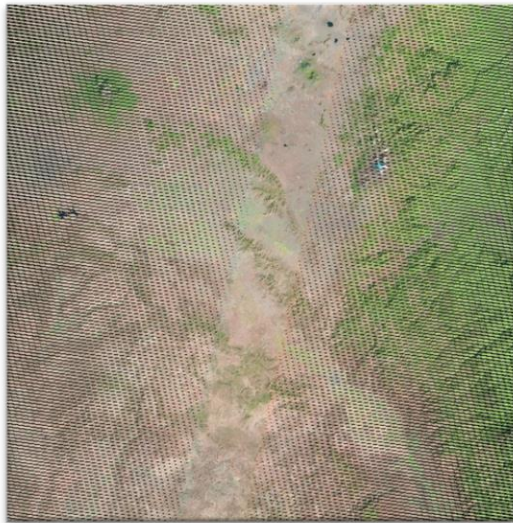


Figura 32. Imagen satelital del año 2005 (abril 18-primavera lado izquierdo y noviembre 2-otoño lado derecho), no detecta presencia de contaminantes que puedan alterar las características físicas de las nubes.

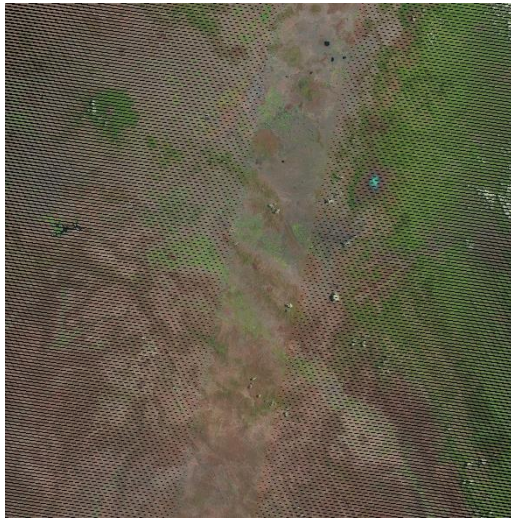


Figura 33. Imagen satelital del año 2010 (junio 2-primavera lado izquierdo y noviembre 13-otoño lado derecho), no detecta presencia de contaminantes que puedan alterar las características físicas de las nubes.

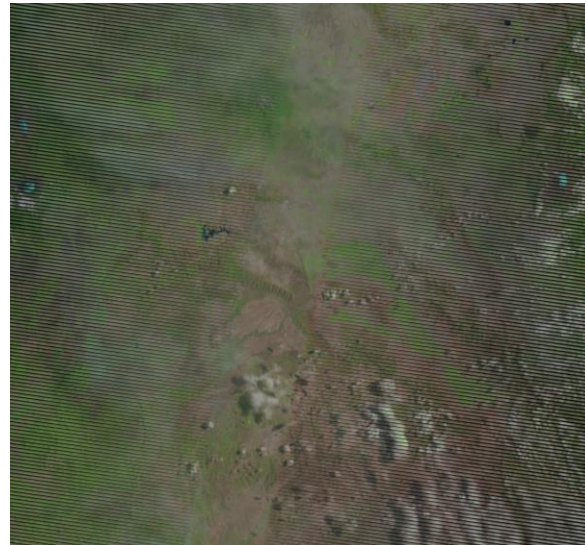
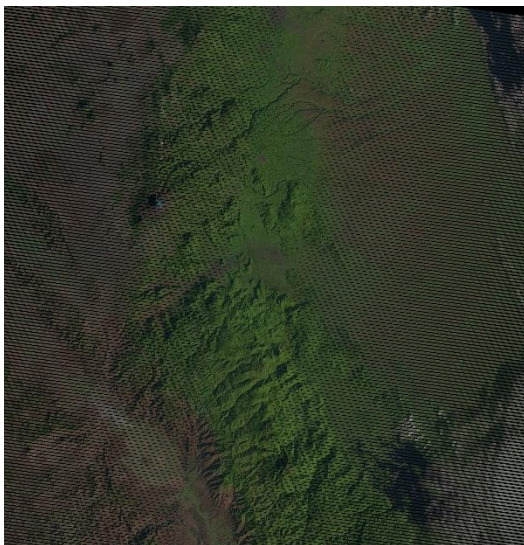


Figura 34. Imagen satelital del año 2015 (junio 29-primavera lado izquierdo y septiembre 30-otoño lado derecho), no detecta presencia de contaminantes que puedan alterar las características físicas de las nubes.

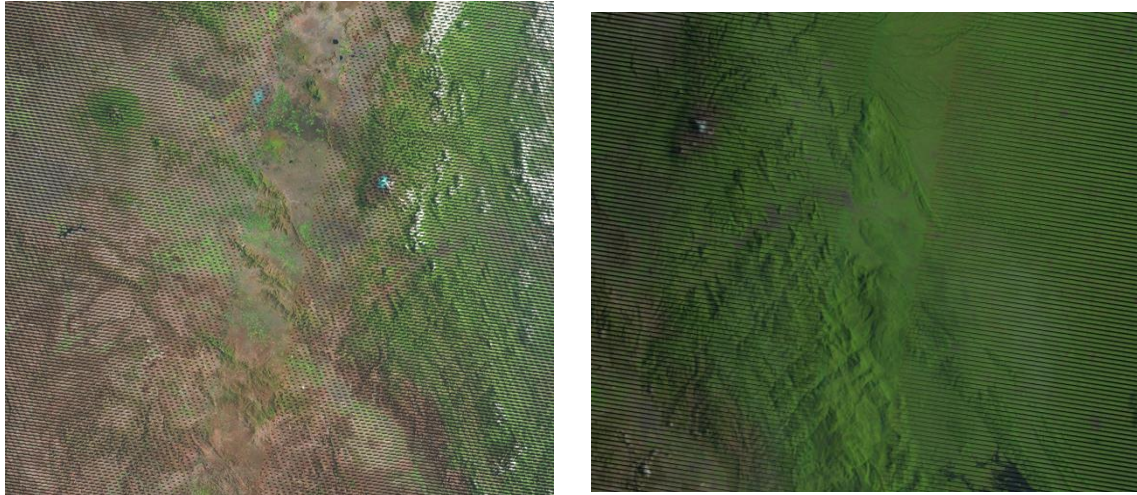


Figura 35. Imagen satelital del año 2023 (mayo 1-primavera lado izquierdo y septiembre 24-otoño lado derecho), no detecta presencia de contaminantes que puedan alterar las características físicas de las nubes..

El proceso y análisis de los datos históricos de la zona de estudio, fue muy importante para entender el comportamiento dinámico atmosférico de las variables meteorológicas de temperatura máxima y mínima, precipitación y radiación solar.

El proceso de interpolación y extrapolación de datos abarcaron el periodo del primero de enero de 2000 al 25 de septiembre de 2023.

Posteriormente se realizó el desarrollo de modelos en 2D y 3D con las bases de datos, el proceso de los modelos fue utilizando la robusta plataforma del software Golden Surfer. Mediante este proceso se logró extraer información esencial, incluyendo perfiles detallados, análisis minuciosos de vectores, interpolación precisa, generación de modelos tridimensionales para una representación visual más completa, y la identificación de picos y depresiones geográficas que tienen un impacto relevante en la región.

Una vez que completo este procedimiento de análisis, incorporamos la información recopilada de manera coherente y estructurada en el programa correspondiente. Como resultado, obtuvimos una representación visual y geoespacial que nos permitió observar con claridad y precisión la delimitación exacta del municipio en estudio, lo que es crucial para futuras investigaciones y toma de decisiones relacionadas con esta área geográfica. Los datos promedio anuales de las variables utilizadas se presentan en la siguiente tabla



Año	Coordenadas UTM X	Coordenadas UTM Y	Coordenadas UTM Z	Temp. Max °C	Temp. Min °C	Precipitación (mm)	Radiación solar (W/m ²)
2000	652000	2053281	1812	26.1	8.3	476.6	6785
2001	652110	2053270	1813	24.5	8.8	412.8	7021
2002	652061	2052946	1814	24.2	9.2	445.1	7007
2003	652183	2052915	1812	25.9	9.5	580.4	6006
2004	652311	2052719	1809	24.4	9.1	580.8	5572
2005	652275	2052596	1810	25.5	8.9	380.1	6789
2006	652529	2052617	1805	25.6	9.3	360.1	6993
2007	652875	2052353	1802	24.3	9.2	458.5	5998
2008	652701	2052214	1801	25.4	8.1	467.5	6001
2009	652668	2052013	1802	24.1	8.8	431.7	7898
2010	652986	2051935	1797	25.8	8.3	542.3	7564
2011	652688	2051730	1801	25.1	8.5	703.4	5990
2012	652236	2051556	1807	25.1	8.6	410.9	7890
2013	651678	2051659	1824	25.5	9.9	339.5	6799
2014	651681	2051944	1823	24.1	10.1	704.6	5998
2015	651320	2052108	1833	27.2	9.9	666.7	6661
2016	650858	2052182	1847	26.6	9.4	466.4	6898
2017	650524	2052762	1849	24.9	8.2	399.2	7870
2018	650852	2052986	1838	26.2	8.1	222.3	5996
2019	650817	2053318	1843	27.1	8.4	502.4	6663
2020	651125	2052939	1835	25.2	8.8	320.2	7891
2021	651589	2052953	1825	25.1	8.4	320.7	6891
2022	651937	2052939	1817	27.7	9.6	542.7	7801
2023	651998	2052950	1828	26.9	9.2	317.6	6987

(ver tabla 4).

Tabla 4. Datos utilizados para el estudio (coordenadas UTM y variables meteorológicas).

Elevación

A partir de este mapa base se introdujeron las variables meteorológicas de la tabla 2, para identificar su comportamiento a través de los años, empezando por la elevación del terreno natural que es representada por curvas de nivel. Entre más se acerca a la tonalidad verde claro se representa la altitud más baja, por el contrario, al acercarse al azul fuerte alcanza su punto máximo (ver figura 36).

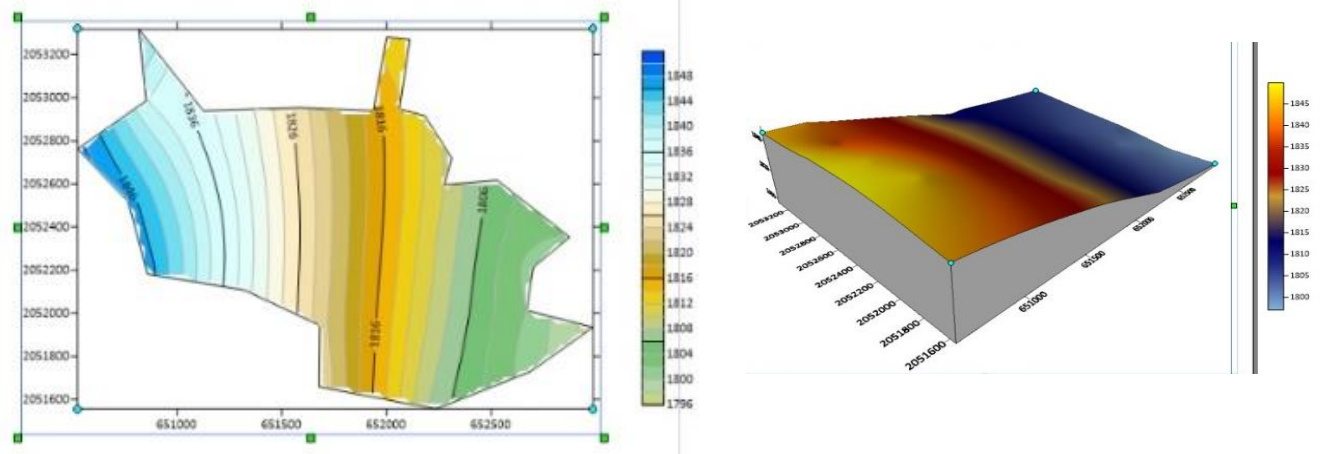


Figura 36. Curvas de nivel del municipio y modelo 3D con pendiente del terreno de elevación de sur a norte y posible dirección de escorrentía del agua.

Precipitación

La figura 37 proporciona una representación gráfica de la precipitación (isoyetas) en el municipio a lo largo de un período de 24 años. Se observa la variación de la precipitación a lo largo del tiempo, lo que puede revelar patrones climáticos, tendencias de sequía o lluvia, y otros cambios importantes en las condiciones meteorológicas a través del tiempo.

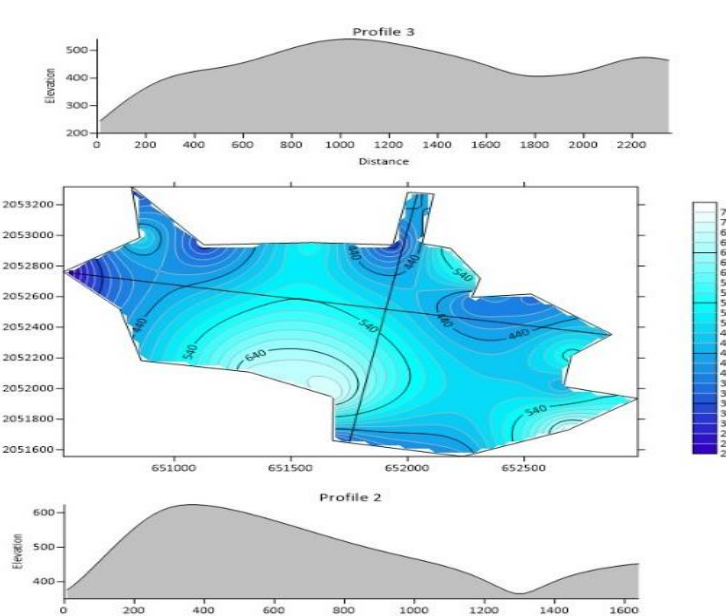


Figura 37. En la escala de la cartografía de isoyetas, el color blanco indica la precipitación mayor y el azul fuerte la menor, los perfiles norte a sur (arriba) y este a oeste (abajo), aplicando el método kriging.



Las precipitaciones, como se mencionó previamente, muestran un comportamiento impredecible, aunque hay años con cantidades significativas de lluvia, generalmente se observa una disminución notable en su frecuencia, estableciendo casi una pauta de alternancia entre períodos de sequía y años esporádicos con precipitaciones excepcionales. Es importante resaltar la marcada tendencia a la baja en la cantidad de milímetros de lluvia (ver figura 38).

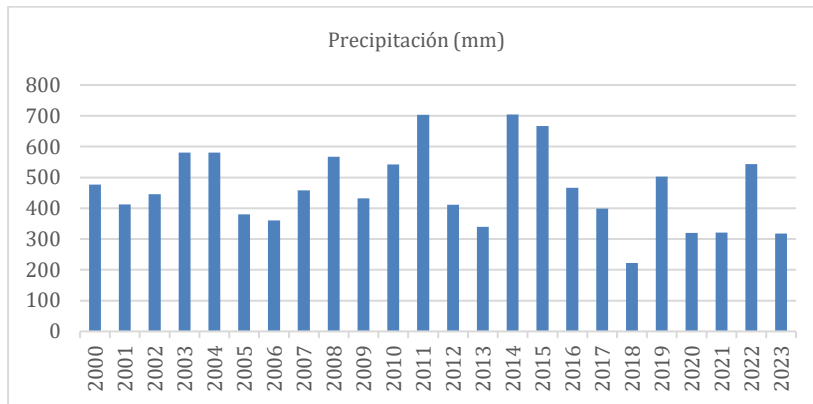


Figura 38. Aunque no parece haber una correlación entre las temperaturas mínimas registradas y las precipitaciones, ocurre lo contrario con las temperaturas máximas. Cuando se produjo el primer pico significativo en la precipitación en 2014, este fenómeno se reflejó de manera similar en las precipitaciones en el año 2014 y 2015.

Temperaturas

Temperatura máxima

El análisis de la temperatura máxima a lo largo de varios años, permite identificar patrones de calentamiento o enfriamiento en la zona de estudio. Los mapas generados con software especializado muestran como las temperaturas máximas han variado estacionalmente y a lo largo de las décadas (ver figura 39).

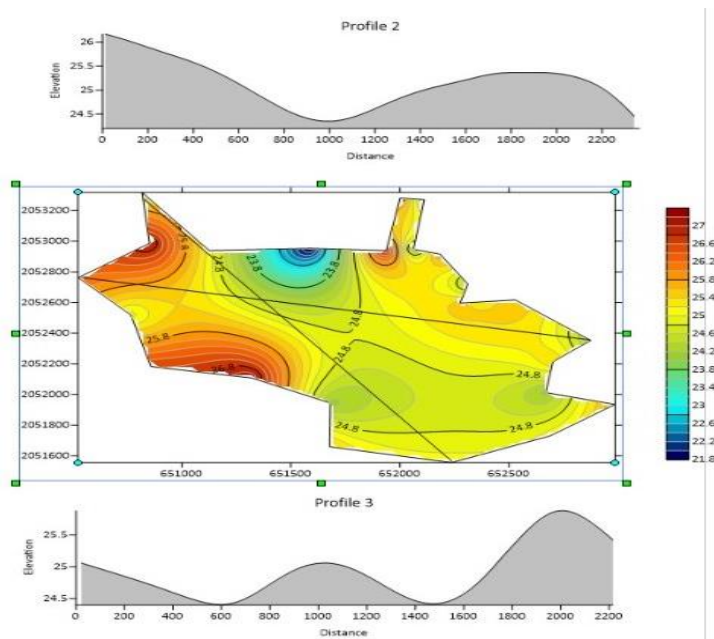


Figura 39. En esta región, el modelo arroja un análisis importante sobre un micro cambio climático y su impacto en la temperatura.

Temperatura Mínima

Al igual que con la temperatura máxima, el análisis de la temperatura mínima a lo largo del tiempo revela patrones de correlación con el calentamiento y enfriamiento del área de estudio. Estos datos son cruciales para comprender las condiciones climáticas nocturnas y su impacto en la agricultura, la salud pública y otros aspectos de la vida cotidiana (ver figura 40).

Se modeló el perfil de norte a sur y de este a oeste, y así determinar en que años la temperatura mínima varía respecto a su orientación respecto a la zona de estudio.

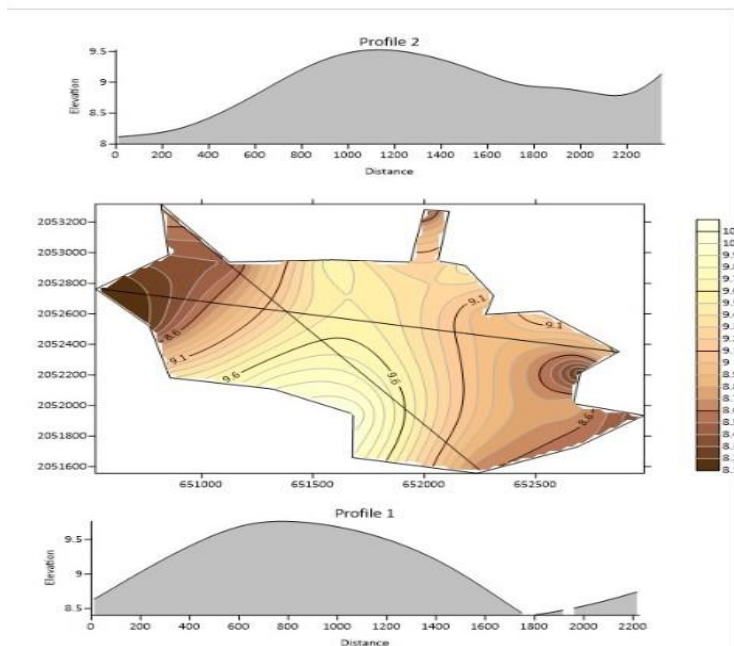


Figura 40. El modelado presenta el color blanco la temperatura mínima y en color café obscuro la temperatura mínima.

Radiación Solar

La radiación solar procesada y analizada para la región, es importante porque se correlaciona con la temperatura, la cual a su vez es un indicativo de la probabilidad de precipitación. En la figura 41 se presenta la zona de estudio y el perfil de norte a sur y de este a oeste, proceso con el método de interpolación y extrapolación.

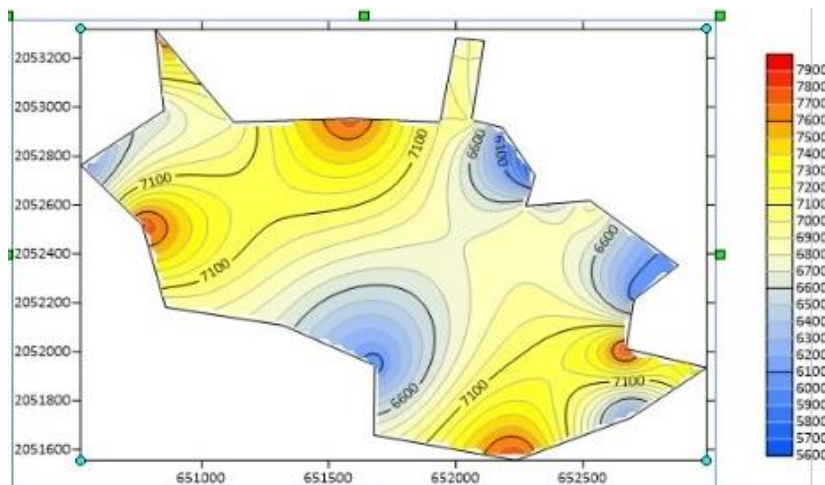


Figura 41. Radiación solar, el color naranja la máxima radiación acumulada anual y el azul fuerte la mínima acumulada, se aplicó el método kriging para interpolar y extrapolar los datos.

En la figura 42 se aprecia la radiación solar anual y su comportamiento gráfico de cada periodo analizado.

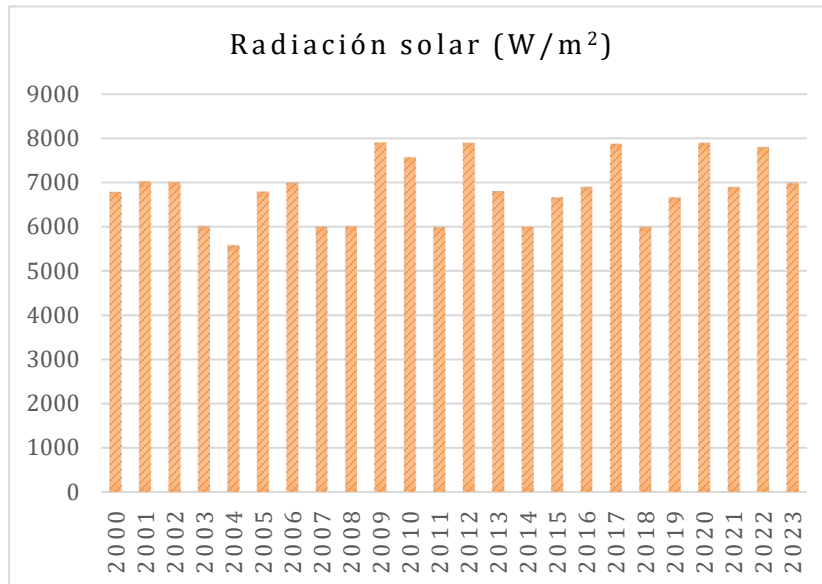


Figura 42. Se observa que durante el periodo analizado, existen 17 años con lecturas arriba de los 6000 W/m², lo que hace suponer una correlación con la disminución de precipitación.

Conclusiones

El análisis meteorológico de las variables de radiación solar, precipitación y temperaturas máximas y mínimas, ha sido esencial para comprender y predecir las condiciones atmosféricas de las dos zonas de estudio; las condiciones que se presentan parecen tener una estrecha relación con actividad antropogénica y volcánica para que las variables presenten rangos de oscilación importante en los 24 años analizados.

La radiación solar nos indica que ha estado influyendo durante al menos los últimos 15 años en la dinámica atmosférica. La temperatura y la precipitación muestran un desarrollo relacionado con las condiciones meteorológicas de cambio climático y calentamiento global mínimas.

El proceso meteorológico dentro de la dinámica atmosférica es un proceso caótico, los estudios realizados por imágenes de satélite y su análisis e interpretación no muestran tendencias a desaparecer, al contrario cada año las condiciones en ese lugar tienen estrecha correlación con el fenómeno de El Niño y La Niña.



El procesamiento de las imágenes satelitales no detecta ningún tipo de contaminante atmosférico que pudieran ser causa de alteración en las nubes, se detectó principalmente polvo y partículas de ceniza volcánica.

En resumen, la carencia de precipitación es un proceso natural por lo arriba descrito. Es importante analizar los datos iniciales que se interpolaron y extrapolaron, ya que los resultados arrojados indican mínimas variaciones meteorológicas pero significativas que a futuro podrán incidir cada vez más en que la zona presente alteraciones de las variables estudiadas.

El año 2023 presenta una temperatura máxima de 25.9 °C menor al año previo, una temperatura menor de 9.6 °C mayor al año previo, una precipitación de 315.1 mm menor al año previo y una radiación solar de 6989 W/m² menor al año previo, es decir tres de las cuatro variables analizadas indican una alteración a las condiciones meteorológicas. Finalmente los datos numéricos de los 24 años analizados que se obtuvieron, nos dan una correlación entre las zonas procesadas y una tendencia de las variables para los siguientes años:

Tlacotepec de Benito Juárez (suma total de los datos anuales de cada variable y su promedio)

	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C	Precipitación (mm)	Radiación solar (W/m ²)
Suma	622.3	235.5	10464.3	164397
Promedio	27	9.8	455	6850

Tepanco de López (suma total de los datos anuales de cada variable y su promedio)

	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C	Precipitación (mm)	Radiación solar (W/m ²)
Suma	612.5	214.6	11152.5	163969
Promedio	25.5	8.9	464.7	6832



Promedio de las variables en la zona de estudio de los años analizados

	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C	Precipitación (mm)	Radiación solar (W/m ²)
Promedio	26.3	9.4	459.9	6841

El análisis numérico de los datos promedio de la zona estudiada se comparan con el año 2023.

	Año	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C	Precipitación (mm)	Radiación solar (W/m ²)
Tlacotepec de Benito Juárez	2023	25.9	9.6	315.1	6989
Tepanco de López	2023	26.9	9.2	317.6	6987
Promedio de los 24 años		26.3	9.4	459.9	6841

Se concluye que los datos procesados y analizados para la zona de estudio se interpretan de la siguiente manera: los modelos arrojan que es posible que siga la tendencia de falta de precipitación, ya que en lo que va del año 2023 ha sido mucho menor al promedio del periodo procesado.

Las variaciones y oscilaciones marcadas de las temperaturas tanto máximas como mínimas, y de la radiación solar, indican que son producto de un cambio climático y calentamiento global en la zona.

La relación existente con las variables analizadas y con el cambio climático y calentamiento global son evidentes.

La falta de precipitación en la región estudiada indica una tendencia a la baja en los últimos 5 años.

Es muy alta la probabilidad que se relacionen estos cambios con actividad volcánica y los fenómenos de El Niño y La Niña, el primero con actividad constante desde 1994 y el segundo y tercero por la presencia confirmada desde el año 2014.



Secretaría
de Educación
Gobierno de Puebla

CONCYTEP
Consejo de Ciencia
y Tecnología del Estado
de Puebla

Responsables

Rogelio Ramos Aguilar, Patricia Máximo Romero, Víctor Galindo López, Máximo Ávila Cruz, María de los Dolores Ramírez Álvarez, Lorena Cárdenas López, Argenis Eduardo Morales González, Thelma Eloísa López Villa, Gabriela Yáñez Pérez, María de la Cruz Vázquez García, Victoriano Covarrubias Salvatori.

Octubre 2023