

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN METEOROLOGÍA APLICADA**



**“DINÁMICA Y TERMODINÁMICA ATMOSFÉRICA ASOCIADA A
UNA TORMENTA DE GRANIZO EN EL DISTRITO DE HUANCÁN,
HUANCAYO”**

Presentada por:

FRANKLIN DELIO UNSIHUAY TOVAR

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
MAGISTER SCIENTIAE EN METEOROLOGÍA APLICADA**

Lima – Perú

2023

DINÁMICA Y TERMODINÁMICA ATMOSFÉRICA ASOCIADA A UNA TORMENTA DE GRANIZO EN EL DISTRITO DE HUANCÁN, HUANCAYO

INFORME DE ORIGINALIDAD

Vo Bo Asesor Mg.Sc. Eusebio I. Cisneros Tarmeño



FUENTES PRIMARIAS

1	www.scielo.org.co Fuente de Internet	1%
2	worldwidescience.org Fuente de Internet	1%
3	redi.unjbg.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	www.wpc.ncep.noaa.gov Fuente de Internet	1%
5	bdigital.unal.edu.co Fuente de Internet	1%
6	fhuc.web1.unl.edu.ar Fuente de Internet	1%
7	commercial.allianz.com Fuente de Internet	1%
8	pt.scribd.com Fuente de Internet	1%

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN METEOROLOGÍA APLICADA**

**“DINÁMICA Y TERMODINÁMICA ATMOSFÉRICA ASOCIADA A
UNA TORMENTA DE GRANIZO EN EL DISTRITO DE HUANCÁN,
HUANCAYO”**

Presentada por:

FRANKLIN DELIO UNSIHUAY TOVAR

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
MAGISTER SCIENTIAE**

Sustentada y aprobada ante el siguiente Jurado:

Mg.Sc. Jerónimo García Villanueva
PRESIDENTE

Mg. Sc. Eusebio Cisneros Tarmeño
ASESOR

Mg. Sc. Alessandri Canchoa Quispe
MIEMBRO

Dr. Ever Menacho Casimiro
MIEMBRO

DEDICATORIA

A mi esposa e hijos por todo el apoyo incondicional que me brindaron durante mis estudios. También dedico a mi padre (QEPD) y madre por inculcarme los buenos valores, y a mis hermanos que siempre estuvieron conmigo.

AGRADECIMIENTOS

Muy agradecido al Profesor Eusebio Cisneros por la asesoría brindada y su constante ánimo hasta la finalización de la presente tesis

Muy agradecido al Profesor Jerónimo García por su apoyo incondicional brindado en el procesamiento y manejo del modelo WRF y también por su constante aliento para la culminación de la presente tesis

Finalmente agradecer a todos los familiares y amigos que me alentaron para culminar la presente tesis.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1	TORMENTAS ELÉCTRICAS SEVERAS.....	4
2.2	INGREDIENTES PARA LA FORMACIÓN DE UNA TORMENTA	6
2.3	ESTABILIDAD Y DESARROLLO DE UNA NUBE	7
2.3	GRANIZO	8
2.4	CARACTERÍSTICAS DE LAS LLUVIAS EN EL VALLE DEL MANTARO ...	9
2.5	ANTECEDENTES Y TRABAJOS RELACIONADOS CON LA INVESTIGACIÓN	9
2.6	ECUACIÓN DE CONTINUIDAD	11
2.7	DIVERGENCIA Y VORTICIDAD	12
2.7.1	Divergencia y Convergencia	12
2.7.2	Vorticidad.....	13
2.8	PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA	14
2.9	TEMPERATURA POTENCIAL (θ)	15
2.10	TEMPERATURA POTENCIAL EQUIVALENTE (θ_e).....	15
2.11	CARACTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS DE LA PRECIPITACIÓN EN EL VALLE DEL MANTARO	16
2.12	MODELO WEATHER RESEARCH AND FORECASTING (WRF).....	17
2.13	MODELO CONCEPTUAL	18
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	19
3.1	ÁREA DE ESTUDIO.....	19
3.2	MATERIALES, EQUIPOS Y SOFTWARES	20
3.3	MÉTODOS.....	21
3.3.1	Análisis e identificación de las principales variables de la dinámica atmosférica que provocaron la tormenta de granizo en el Distrito de Huancán-Huancayo ...	21
3.3.2	Análisis e identificación de las principales variables de la termodinámica atmosférica que ocasionó la tormenta de granizo en el Distrito de Huancán-Huancayo	22
3.3.3	Identificación y análisis de los impactos potenciales de la tormenta de granizo en el Distrito de Huancán-Huancayo	23
3.3.4	Establecimiento de un modelo conceptual asociado a la tormenta de granizo en el distrito de Huancán – Huancayo	23

IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
4.1	ANÁLISIS E IDENTIFICACIÓN DE LAS PRINCIPALES VARIABLES DE LA DINÁMICA ATMOSFÉRICA QUE PROVOCARON LA TORMENTA DE GRANIZO EN EL DISTRITO DE HUANCÁN-HUANCAYO	27
4.1.1	Análisis de la humedad atmosférica	30
	a. Relación de mezcla y líneas de corriente en el dominio D1.....	30
	b. Relación de mezcla y líneas de corriente en el dominio D2	32
	c. Relación de mezcla y líneas de corriente en el dominio D3.....	35
4.1.2	Análisis de la vorticidad relativa	38
	a. Vorticidad relativa y líneas de corriente en el dominio D1	38
	b. Vorticidad relativa y líneas de corriente en el dominio D2.....	42
	c. Vorticidad relativa y líneas de corriente en el dominio D3.....	45
4.1.3	Análisis de la Divergencia.....	49
	a. Divergencia horizontal y líneas de corriente en el dominio D1	49
	b. Divergencia horizontal y líneas de corriente en el dominio D2.....	52
	c. Divergencia horizontal y líneas de corriente en el dominio D3	55
4.1.4	Análisis de la velocidad vertical.....	59
4.2	ANÁLISIS E IDENTIFICACIÓN DE LAS PRINCIPALES VARIABLES DE LA TERMODINÁMICA ATMOSFÉRICA QUE OCASIONÓ LA TORMENTA DE GRANIZO EN EL DISTRITO DE HUANCÁN-HUANCAYO	61
4.2.1	Análisis de la temperatura potencial.....	61
4.2.2	Análisis de la temperatura potencial equivalente	63
4.2.3	Análisis de la humedad relativa.....	67
4.2.4	Análisis de la imagen de satélite GOES	71
4.2.5	Análisis de la microfísica nocturna	72
4.3	IDENTIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS IMPACTOS POTENCIALES DE LA TORMENTA DE GRANIZO EN EL DISTRITO DE HUANCÁN-HUANCAYO	73
4.4	ESTABLECIMIENTO DE UN MODELO CONCEPTUAL ASOCIADO A LA TORMENTA DE GRANIZO EN EL DISTRITO DE HUANCÁN – HUANCAYO	74
V.	CONCLUSIONES	77
VI.	RECOMENDACIONES.....	78
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
VIII.	ANEXOS	82

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: DEFINICIONES DE PROPIEDADES DEL FLUJO HORIZONTAL	14
TABLA 2: NIVELES (COORDENADA σ) DEL MODELO WRF Y VALORES DE PRESIÓN (HPA) SOBRE HUANCÁN	26
TABLA 3: DATOS DE PRECIPITACIÓN (MM) ACUMULADA EL 13 DE OCTUBRE DE 2019 EN LAS ESTACIONES DE SANTA ANA, HUAYAO Y VIQUES	28
TABLA 4: FORMATO DE ENTREVISTA SOBRE EL IMPACTO DE LA GRANIZADA EN HUANCÁN	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Modelo simplificado que describe los movimientos del aire y otras características asociadas con una tormenta de multicelda intensa que tiene una corriente ascendente inclinada.....	4
Figura 2: Modelo simplificado que representa el ciclo de vida de una tormenta eléctrica de células ordinarias que está casi estacionaria a medida que se forma en una región de cizalladura del viento en niveles bajos	5
Figura 3: Principales tipos de formación de las nubes: (a) calentamiento de la superficie y convección; (b) elevación forzada a lo largo de la barrera topográfica; (c) convergencia del aire en la superficie; (d) elevación a lo largo de frentes	8
Figura 4: Climatología de la precipitación (en mm/mes) Período: 1960 – 2002 en Huayao	16
Figura 5: Ubicación del Distrito de Huancán	19
Figura 6: Dominios utilizados en la simulación D1, D2 y D3, con resoluciones espaciales de 50 km, 10 km y 2 km, respectivamente	20
Figura 7: Características topográficas (altitud en msnm) para el dominio D3	25
Figura 8: Variación de la presión atmosférica según nivel del modelo, sobre el distrito de Huancán	26
Figura 9: Distribución de la precipitación (acumulada en mm) analizada en el dominio D3, para el 13 de octubre de 2019 entre 21:00 y 23:00 UTC	27
Figura 10: Distribución de la precipitación pronosticada (acumulada en mm) en el dominio D3, para el 13 de octubre de 2019 entre 21:00 y 23:00 UTC	28
Figura 11: Comparación entre la precipitación analizada y pronosticada por el modelo WRF, para la ubicación del Distrito de Huancán	29
Figura 12: Relación de mezcla (g/kg) y líneas de corriente en superficie en dominio D1 a las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019	30
Figura 13: Relación de mezcla (g/kg) y líneas de corriente en superficie en dominio D1 a las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019	31
Figura 14: Relación de mezcla (g/kg) y líneas de corriente en 500 hPa para dominio D1, para las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019.....	31
Figura 15: Relación de mezcla (g/kg) y líneas de corriente en 500 hPa para dominio D1 para las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019.....	32
Figura 16: Relación de mezcla (g/kg) y líneas de corriente en superficie para dominio D2 para las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019.....	33
Figura 17: Relación de mezcla (g/kg) y líneas de corriente en superficie para dominio D2 para las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019.....	33
Figura 18: Relación de mezcla (g/kg) y líneas de corriente en 500 hPa para dominio D2 para las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019.....	34

Figura 19: Relación de mezcla (g/kg) y líneas de corriente en 500 hPa para dominio D2 para las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019.....	35
Figura 20: Relación de mezcla (g/kg) y líneas de corriente en superficie para dominio D3 para las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019.....	36
Figura 21: Relación de mezcla (g/kg) y líneas de corriente en superficie para dominio D3 para las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019.....	36
Figura 22: Relación de mezcla (g/kg) y líneas de corriente en 500 hPa para dominio D3 para las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019.....	37
Figura 23: Relación de mezcla (g/kg) y líneas de corriente en 500 hPa para dominio D3 para las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019.....	37
Figura 24: Vorticidad relativa ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en superficie para dominio D1 para las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019.....	38
Figura 25: Vorticidad relativa ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en superficie para dominio D1 para las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019.....	39
Figura 26: Vorticidad relativa ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en 500 hPa para dominio D1 para las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019.....	40
Figura 27: Vorticidad relativa ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en 500 hPa para dominio D1 para las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019.....	40
Figura 28: Vorticidad relativa ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en 300 hPa para dominio D1 para las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019.....	41
Figura 29: Vorticidad relativa ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en 300 hPa para dominio D1 para las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019.....	42
Figura 30: Vorticidad relativa ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en superficie para dominio D2 para las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019.....	43
Figura 31: Vorticidad relativa ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en superficie para dominio D2 para las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019.....	43
Figura 32: Vorticidad relativa ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en 500 hPa para dominio D2 para las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019.....	44
Figura 33: Vorticidad relativa ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en 500 hPa para dominio D2 para las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019.....	44
Figura 34: Vorticidad relativa ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en superficie para dominio D3 para las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019.....	45
Figura 35: Vorticidad relativa ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en superficie para dominio D3 para las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019.....	46
Figura 36: Vorticidad relativa ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente a 500 hPa para dominio D3 para las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019.....	46
Figura 37: Vorticidad relativa ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente a 500 hPa para dominio D3 para las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019.....	47

Figura 38: Vorticidad relativa ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente a 300 hPa para dominio D3 para las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019.....	48
Figura 39: Vorticidad relativa ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente a 300 hPa para dominio D3 para las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019.....	48
Figura 40: Divergencia horizontal ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en superficie para dominio D1 a las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019	49
Figura 41: Divergencia horizontal ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en superficie para dominio D1 a las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019	50
Figura 42: Divergencia horizontal ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en 300 hPa para dominio D1 a las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019	51
Figura 43: Divergencia horizontal ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en 300 hPa para dominio D1 a las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019	51
Figura 44: Divergencia horizontal ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en superficie para dominio D2 a las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019	52
Figura 45: Divergencia horizontal ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en superficie para dominio D2 a las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019	53
Figura 46: Divergencia horizontal ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en 500 hPa para dominio D2 a las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019	53
Figura 47: Divergencia horizontal ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en 500 hPa para dominio D2 a las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019	54
Figura 48: Divergencia horizontal ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en 300 hPa para dominio D2 a las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019	54
Figura 49: Divergencia horizontal ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en 300 hPa para dominio D2 a las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019	55
Figura 50: Divergencia horizontal ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en superficie para dominio D3 a las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019	56
Figura 51: Divergencia horizontal ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en superficie para dominio D3 a las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019	56
Figura 52: Divergencia horizontal ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en 500 hPa para dominio D3 a las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019	57
Figura 53: Divergencia horizontal ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en 500 hPa para dominio D3 a las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019	57
Figura 54: Divergencia horizontal ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en 300 hPa para dominio D3 a las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019	58
Figura 55: Divergencia horizontal ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en 300 hPa para dominio D3 a las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019	58
Figura 56: Distribución de la velocidad vertical (m/s), en 600 hPa para dominio D3 a las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019	59

Figura 57: Perfil de la velocidad vertical (m/s) sobre el distrito de Huancán a las 18:00 UTC, 21:00 UTC, 22:00 UTC y 23:00 UTC, para el 13 octubre de 2019.....	60
Figura 58: Comparación entre la velocidad vertical (m/s) analizada y pronosticada en 600 hPa, el 12 y 13 de octubre de 2019	61
Figura 59: Corte a 12° de latitud sur para dominio D3 de la temperatura potencial (K) a las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019	62
Figura 60: Corte a 12° de latitud sur para dominio D3 de la temperatura potencial (K) a las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019	62
Figura 61: Perfil de temperatura potencia (K), sobre el distrito de Huancán a las 18:00 UTC, 21:00 UTC, 22:00 UTC y 23:00 UTC, para el 13 octubre de 2019.....	63
Figura 62: Corte a 12° de latitud sur para dominio D3 de la temperatura potencial equivalente (K) a las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019	64
Figura 63: Corte a 12° de latitud sur para dominio D3 de la temperatura potencial equivalente (K) a las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019	64
Figura 64: Corte a 12° de latitud sur para dominio D3 de la temperatura potencial equivalente (K) a las 22:00 UTC del 13 de octubre de 2019	65
Figura 65: Variación horaria del perfil de temperatura potencial equivalente (K), sobre el distrito de Huancán	65
Figura 66: Perfil de la temperatura potencial equivalente (K) sobre el distrito de Huancán a las 18:00 UTC, 21:00 UTC, 22:00 UTC y 23:00 UTC.....	66
Figura 67: Variación de la humedad relativa (porcentaje) en superficie para dominio D3 a las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019.....	67
Figura 68: Variación de la humedad relativa (porcentaje) en superficie para dominio D3 a las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019.....	68
Figura 69: Variación de la humedad relativa (porcentaje) en 500 hPa para dominio D3 a las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019	68
Figura 70: Variación de la humedad relativa (porcentaje) en 500 hPa para dominio D3 a las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019	69
Figura 71: Variación vertical de la humedad relativa (por ciento) en 12° S para dominio D3 a las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019.....	70
Figura 72: Variación vertical de la humedad relativa (por ciento) en 12° S para dominio D3 a las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019.....	70
Figura 73: Imagen de satélite GOES 16 del 13 de octubre 2019 a las a) 21:00 UTC y b) 22:00 UTC.....	71
Figura 74: Guía rápida de interpretación de microfísica nocturna RGB.....	72
Figura 75: Microfísica de nubes para el 13 de octubre de 2019: a) 20:00 UTC; b) 21:00 UTC; c) 22:00 UTC y d) 22:30 UTC.....	73

Figura 76: Modelo conceptual en vista de planta de la formación de tormentas en la sierra central del Perú	75
Figura 77: Modelo conceptual en la vertical y a nivel local de la formación de nube cumulonimbos en el distrito de Huancán	76
Figura 78: Imágenes de satélite GOES de las 20:00; 20:30 UTC, 21:00 UTC y 21:30 UTC	82
Figura 79: Imágenes de satélite GOES de las 22:00; 22:30 UTC, 23:00 UTC y 23:30 UTC	83
Figura 80: Imágenes de satélite de microfísica nocturna para el 13 de octubre de 2019 a las 20:00 UTC, 20:20 UTC, 20:40 UTC, 21:00, 21:20 UTC y 21:40 UTC	84
Figura 81: Imágenes de satélite de microfísica nocturna para el 13 de octubre de 2019 a las 22:00 UTC, 22:20 UTC, 22:40 UTC, 23:00 UTC, 23:20 UTC y 23:40 UTC	85

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Imágenes de Satélite GOES 16, Canal 14 cada 30 minutos para el 13 de octubre de 2019 entre las 20:00 UTC y 23:30 UTC	82
Anexo 2: Imágenes de satélite de microfísica nocturna para el 13 de octubre de 2019, cada 20 minutos entre las 20:00 UTC y 00:00 UTC	84
Anexo 3: Reporte complementario N° 2516 - 17/10/2019 / COEN – INDECI	86
Anexo 4: Formato de entrevista a pobladores de Huancán	90
Anexo 5. Reporte de diarios referidos a la caída de techo del local “dos estrellas”	91

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue analizar las condiciones de la dinámica y termodinámica de la atmósfera asociadas a la tormenta de granizo ocurrida el 13 de octubre de 2019 en el distrito de Huancán, provincia Huancayo de la Región Junín, que hizo colapsar un techo con consecuencias fatales de seis personas fallecidas. Para el estudio se recurrió a los datos de análisis y pronóstico del modelo Global Forecast System (GFS) con una resolución de 0.5° y se hicieron simulaciones con el modelo regional Weather Research and Forecasting (WRF) para tres dominios con resoluciones de 50 km (D1), 10 km (D2) y 2 km (D3). En cada dominio se analizaron el flujo de vientos, divergencia, vorticidad relativa y velocidad vertical en superficie, 500 hPa y 300 hPa, además de la variación vertical de la temperatura potencial y potencial equivalente, complementados con los análisis de las imágenes del satélite GOES 16. Para conocer los impactos del granizo, se entrevistaron a 35 pobladores de la zona. Los resultados muestran que a nivel regional y sinóptico hay advección de humedad en superficie y 500 hPa proveniente del noreste de la zona de estudio, predominando además convergencia en superficie y divergencia en 300 hPa. A la hora de ocurrencia del evento, la velocidad vertical del viento en el dominio D3 sobre la zona de estudio alcanzó 4 m/s y la atmósfera fue potencialmente inestable; condiciones que favorecieron la convección profunda. Los impactos más significativos de la granizada mencionados por los pobladores fueron la rotura y colapso de techos; y la caída de flores y hojas de las plantas de cultivos de la zona. Del mismo modo se puede decir que el modelo WRF fue capaz de detectar la convección hasta con 24 horas de anticipación. Finalmente, en el modelo conceptual se consideran como factores para la convección, la advección de humedad en superficie y 500 hPa, la convergencia y divergencia en superficie y 300 hPa, la circulación ciclónica en 300 hPa, la velocidad vertical y la variación vertical de la temperatura potencial equivalente.

Palabras clave: WRF, tormenta, granizo, advección, convección

ABSTRACT

The objective of the present investigation was to analyze the conditions of the dynamics and thermodynamics of the atmosphere associated with the hail storm that occurred on October 13, 2019 in the district of Huancán, Huancayo province of the Junín Region, which caused a roof to collapse with fatal consequences of six dead people. For the study, analysis and forecast data from the Global Forecast System (GFS) model with a resolution of 0.5° were used and simulations with the regional Weather Research and Forecasting (WRF) model for three domains with resolutions of 50 km (D1), 10 km (D2) and 2 km (D3) were projected. In each domain, the wind flow, divergence, relative vorticity and vertical velocity at the surface, 500 hPa and 300 hPa, were analyzed, in addition to the vertical variation of the potential and equivalent potential temperature, complemented with the analyzes of the GOES 16 satellite images. In order to understand hail impacts, 35 residents of the area were interviewed. In addition, the results show that at a regional and synoptic level there is advection of moisture on the surface and 500 hPa from the northeast of the study area, predominating convergence on the surface and divergence at 300 hPa as well. At the time of the event, the vertical wind speed in domain D3 over the study area reached 4 m/s and the atmosphere was potentially unstable; conditions that favored deep convection. The most significant impacts of the hailstorm mentioned by the residents are the breakage and collapse of roofs, and plants crops falling flowers and leaves of the area. Likewise, it can be stated that the WRF model was able to detect convection up to 24 hours in advance. Finally, advection of humidity at the surface and 500 hPa, convergence and divergence at the surface and 300 hPa, cyclonic circulation at 300 hPa, vertical velocity and the equivalent potential temperature vertical variation are considered factors in the conceptual model.

Keywords: WRF, storm, hail, advection, convection

I. INTRODUCCIÓN

Una tormenta severa es definida como aquella tormenta que es susceptible de producir daños materiales importantes, muertes o ambos. Generalmente, las tormentas severas vienen acompañadas de lluvias intensas, vientos fuertes y pueden producir granizo, rayos y truenos, inundaciones repentinas e incluso tornados. Si se presentan sobre el océano, también producen oleaje alto y marejada intensa (Prieto *et al.* 2019). En ese mismo contexto (Alfonso 1994), define las tormentas locales severas (TLS), como aquellas tormentas que presentan al menos uno de los siguientes fenómenos meteorológicos: trombas marinas, tornados, granizos de cualquier tamaño y vientos lineales superiores a 96 km/h.

El granizo es un fenómeno meteorológico que afecta en forma negativa a distintas actividades socioeconómicas que el ser humano desarrolla en diferentes localidades del mundo, las que pueden ser en la zona urbana y rural. Generalmente sus efectos son muy localizados tanto espacial como temporalmente, pero pueden ocasionar pérdidas muy importantes en la agricultura, infraestructura (en edificaciones y viviendas, en sistemas de agua y desagüe, las carreteras, entre otras), e incluso la pérdida de vidas humanas (Peña y Pabón 2020).

El 13 de octubre del 2019, en el distrito de Huancán, provincia de Huancayo que pertenece a la Región Junín, ocurrió una tormenta de granizo que hizo colapsar el techo de un local con consecuencias fatales de seis personas fallecidas, las mismas que fueron reportadas por los diferentes diarios. (Diario La República, El Comercio, RPP Noticias, Cadena TV Huancayo, Diario Correo de Huancayo, entre otros). También hubo muchos daños materiales en las viviendas de los pobladores de dicho Distrito.

La cuenca del río Mantaro (donde se encuentra el Distrito de Huancán) es altamente vulnerable a fenómenos meteorológicos extremos relacionados con la variabilidad climática, y de acuerdo con proyecciones recientes, esta vulnerabilidad se vería incrementado en los próximos años debido al cambio climático (IGP 2005b). Los fenómenos meteorológicos extremos constantemente generan desastres “naturales” que causan daños a la población del país y a sus principales actividades económicas. A pesar de ello, las investigaciones en el

país relacionadas a los aspectos físicos, su utilización y aplicación en la prevención de desastres son limitadas.

Por otro lado, los meteorólogos alrededor del mundo siempre han tenido como objetivo simular el estado de la atmósfera de tal manera que sea muy similar a las observaciones de los próximos días. Las ecuaciones que gobiernan o caracterizan el comportamiento de los fluidos se conocen desde hace más de 100 años, por lo que, los meteorólogos podrían ser capaces de resolver las ecuaciones para obtener los pronósticos del tiempo, pero sólo en los últimos 60 años (aunque con imperfecciones), han podido simular estos procesos. Incluso en la actualidad eventos como precipitaciones intensas, nieve y tormentas locales no son pronosticados adecuadamente por los modelos operacionales de tiempo (Roebber & Bosart 1998).

Las precipitaciones significativas en el Valle del Mantaro climáticamente se inician a mediados de septiembre y terminan entre marzo y abril, los cuales son esperados por los agricultores para el desarrollo de la gran siembra o también lo que ellos llaman la gran campaña agrícola. A esto habría que añadirles los riesgos asociados a eventos extremos como es el caso de la ocurrencia de granizo que afecta negativamente a sus cultivos.

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación, se recurrió al modelo regional Weather Research and Forecasting (WRF, por sus siglas en inglés), el cual permite a los investigadores realizar simulaciones con datos reales o ideales y ofrece capacidades de predicción operativa. Para las simulaciones, como fuente de información inicial se usó la información proveniente del modelo Global Forecast System (GFS, por sus siglas en inglés), que es un modelo numérico de predicción meteorológica el cual son procesadas y ejecutadas en distintas resoluciones horizontales y verticales.

Este trabajo de investigación permite conocer los mecanismos físicos que explica el desarrollo de la tormenta de granizo en el Distrito de Huancán, así como su posible pronóstico para las cuestiones operativas relacionados con las actividades de prevención con la finalidad de minimizar los daños que puedan ocasionar.

El objetivo general de esta tesis fue analizar las condiciones dinámicas y termodinámicas de la atmósfera asociadas a la tormenta de granizo ocurrida el 13 de octubre del 2019 sobre el distrito de Huancán, provincia de Huancayo; por consiguiente, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Analizar e identificar las principales variables de la dinámica atmosférica que provocaron la tormenta de granizo en el Distrito de Huancán-Huancayo
- Analizar e identificar las principales variables de la termodinámica atmosférica que ocasionó la tormenta de granizo en el Distrito de Huancán - Huancayo
- Identificar y analizar los impactos potenciales de la tormenta de granizo en el Distrito de Huancán – Huancayo
- Establecer un modelo conceptual asociado a la tormenta de granizo en el Distrito de Huancán - Huancayo

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 TORMENTAS ELÉCTRICAS SEVERAS

Las tormentas eléctricas son las tormentas convectivas que se forman con el aire ascendente. Por lo tanto, el nacimiento de una tormenta eléctrica generalmente involucra aire cálido y húmedo que se eleva en un entorno condicionalmente inestable. El aire ascendente puede ser una parcela de aire que varía en tamaño, desde un globo grande hasta un área relativamente grande, o sea se puede levantar una capa entera, o una parcela de aire. Siempre que el aire ascendente sea más cálido (menos denso) que el aire que lo rodea, hay una fuerza de flotación dirigida hacia arriba que actúa sobre él (Ahrens & Henson 2019).

Una tormenta es un fenómeno que genera relámpagos y truenos. Eso con frecuencia produce ráfagas de viento, fuertes lluvias y granizo. La tormenta puede ser producida por un solo cumulonimbos, cubrir e influir sólo en un área pequeña, o puede estar asociado con un sistema de nubes cumulonimbos que cubren un área grande. (Ahrens & Henson, 2019)

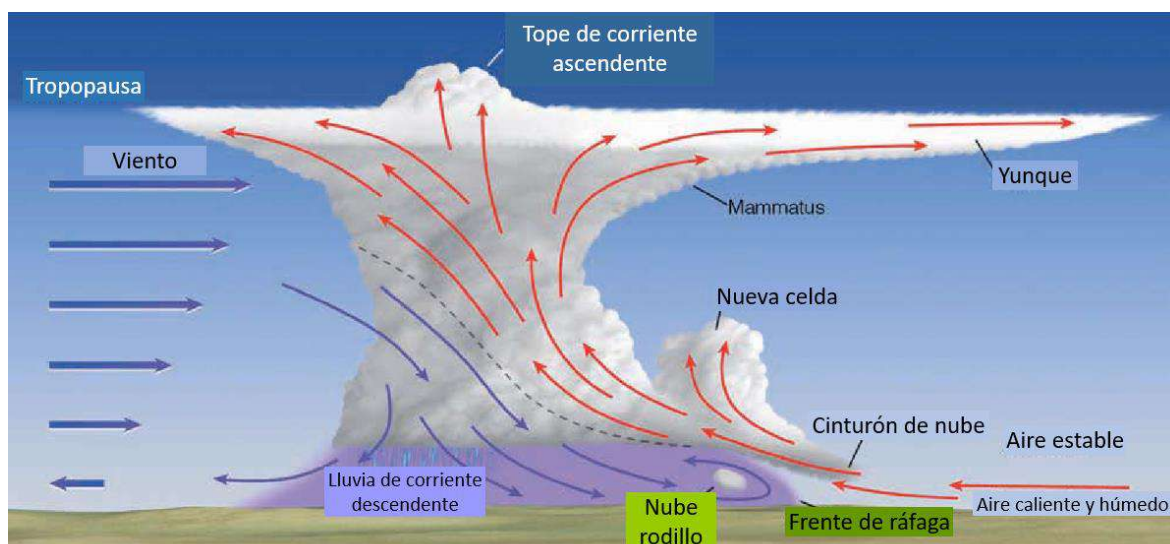


Figura 1: Modelo simplificado que describe los movimientos del aire y otras características asociadas con una tormenta de multicelda intensa que tiene una corriente ascendente inclinada

Fuente: Ahrens & Henson (2019)

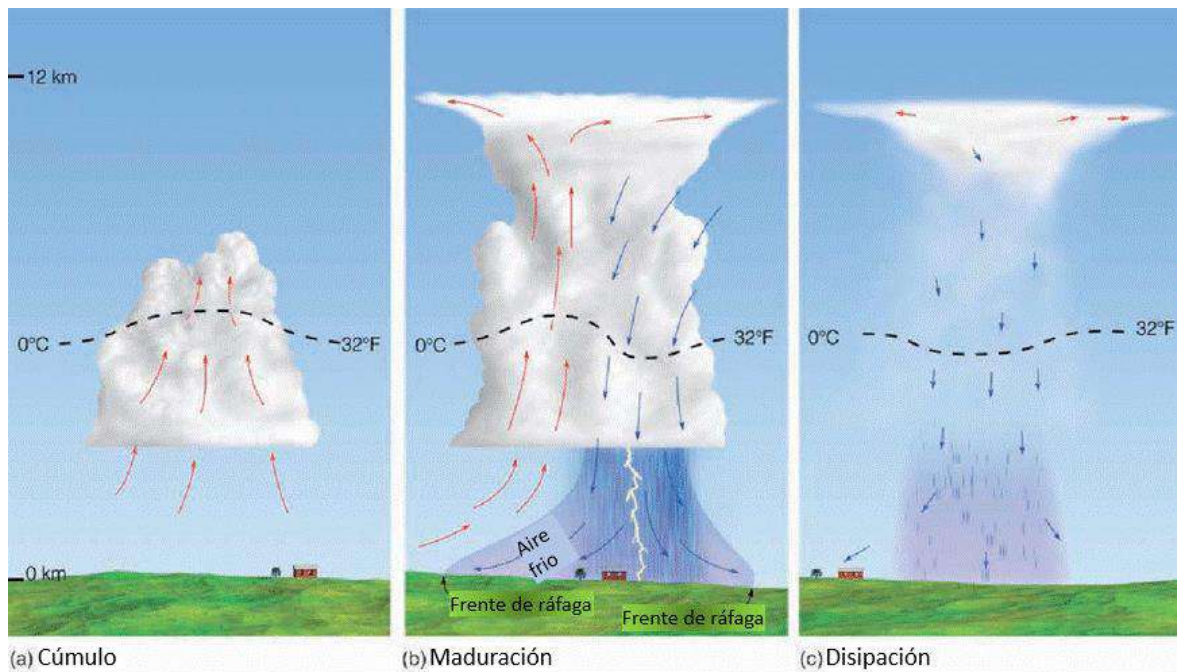


Figura 2: Modelo simplificado que representa el ciclo de vida de una tormenta eléctrica de células ordinarias que está casi estacionaria a medida que se forma en una región de cizalladura del viento en niveles bajos

Fuente: Ahrens & Henson (2019)

De acuerdo con la definición del Servicio Nacional de Meteorología (*National Weather Service, NWS*) de los EE. UU., las tormentas locales severas (TLS) producen una o más de las siguientes condiciones:

- tornados
- vientos mínimos de 25 m/s o 50 nudos (kt)
- granizo de 25 mm de diámetro

Una tormenta es un sistema atmosférico local con un cumulonimbo que produce rayos, truenos, vientos racheados, lluvias fuertes y, a veces, granizo. Si categorizamos las tormentas aisladas de acuerdo con su tamaño, estructura, duración e intensidad, podemos identificar tres tipos :

- las tormentas ordinarias o unicelulares

- las tormentas multicelulares
- las supercélulas (un fenómeno raro en las regiones tropicales)

Estas últimas solamente ocurren bajo condiciones extraordinarias en el trópico, pero provocan condiciones de tiempo severo peligrosas.

(https://www.meted.ucar.edu/tropical/synoptic/local_storms_es/navmenu.php)

2.2 INGREDIENTES PARA LA FORMACIÓN DE UNA TORMENTA

Las tormentas son el resultado de la convección que forma las nubes de tipo cúmulos. El ingrediente principal de la convección en los cúmulos es el aire húmedo, más cálido que su entorno, que asciende debido a su menor densidad respecto del aire que lo rodea. Cuando esa burbuja de aire ascendente se enfría hasta su punto de saturación, se forma un cúmulo, es decir, una célula convectiva. La formación de tormentas es probable cuando hay suficiente humedad, aire inestable y ascenso. (<https://www.meted.ucar.edu>)

- Para la formación de tormentas existen muchas posibles fuentes de humedad, como los grandes cuerpos de agua, la humedad acumulada en la superficie después de una tormenta anterior, la evaporación de suelos húmedos y la evapotranspiración de la vegetación.
- Se dice que la atmósfera es inestable si una burbuja o parcela de aire elevada sigue ascendiendo. Esto es más probable cuando la tropósfera media a alta es fría (más densa) y la atmósfera inferior es cálida o húmeda (menos densa).
- El ascenso que provoca la convección puede ser originado por el calentamiento de la superficie terrestre, los frentes, la topografía, las líneas secas, las brisas marinas, el frente de racha de una tormenta anterior, la convergencia en niveles bajos y la divergencia en altura.

Para medir el potencial de formación de tormentas se recurren a diversos índices de estabilidad, como el índice de elevación (o de ascenso), que se conoce por sus siglas en inglés, LI (*Lifted Index*). El índice de elevación es dado por la diferencia entre la temperatura observada en el nivel de 500 hPa y la temperatura de una burbuja cerca de la superficie que asciende adiabáticamente hasta dicho nivel. Cuanto más inestable sea la atmósfera, tanto más negativo será el valor de LI. (<https://www.meted.ucar.edu>)

2.3 ESTABILIDAD Y DESARROLLO DE UNA NUBE

Según Ahrens & Henson (2019), la temperatura del aire en una parcela de aire ascendente no saturado disminuye a razón de la adiabática seca ($\approx 10 \text{ }^\circ\text{C/km}$), mientras que la temperatura del aire en una parcela de aire saturado ascendente disminuye a razón de la tasa adiabática húmeda ($\approx 5 \text{ }^\circ\text{C/km}$).

La tasa de enfriamiento de la adiabática seca y la adiabática húmeda son diferentes debido al hecho de que el calor latente se libera en una parcela de aire saturado ascendente. En una atmósfera estable, una porción de aire elevado será más frío (más pesado) que el aire que lo rodea. Debido a esto, la porción de aire levantado tenderá a hundirse de nuevo a su posición original. En una atmósfera inestable, una porción de aire elevada estará más caliente (más liviana) que el aire que la rodea y, por lo tanto, continuará elevándose hacia arriba, alejándose de su posición original. La atmósfera se vuelve más estable (se estabiliza) a medida que el aire de la superficie se enfría, el aire en lo alto se calienta, o una capa de aire se hunde (disminuye) sobre una vasta área. La atmósfera se vuelve más inestable (se desestabiliza) a medida que el aire de la superficie se calienta, el aire en el aire se enfría o una capa de aire se mezcla o se eleva (Ahrens & Henson, 2019).

Existe una atmósfera condicional o potencialmente inestable cuando la tasa de disminución de la temperatura del aire se encuentra entre la tasa adiabática húmeda y la tasa adiabática seca. La atmósfera es normalmente más estable a primera hora de la mañana y más inestable por la tarde.

Las nubes en capas tienden a formarse en una atmósfera estable, mientras que las nubes cumuliformes tienden a formarse en una atmósfera condicionalmente inestable.

Sabemos que la mayoría de las nubes se forman a medida que el aire se eleva y se enfría y su vapor de agua se condensa. Dado que el aire normalmente necesita un "disparador" para que comience a moverse hacia arriba, ¿qué es lo que hace que el aire se eleve para que se puedan formar nubes? Los siguientes mecanismos son principalmente responsables del desarrollo de la mayoría de las nubes que observamos:

- a) calentamiento superficial y convección libre
- b) elevación a lo largo de la topografía

- c) ascenso generalizado debido a la convergencia del aire de la superficie
- d) levantamiento a lo largo de los frentes

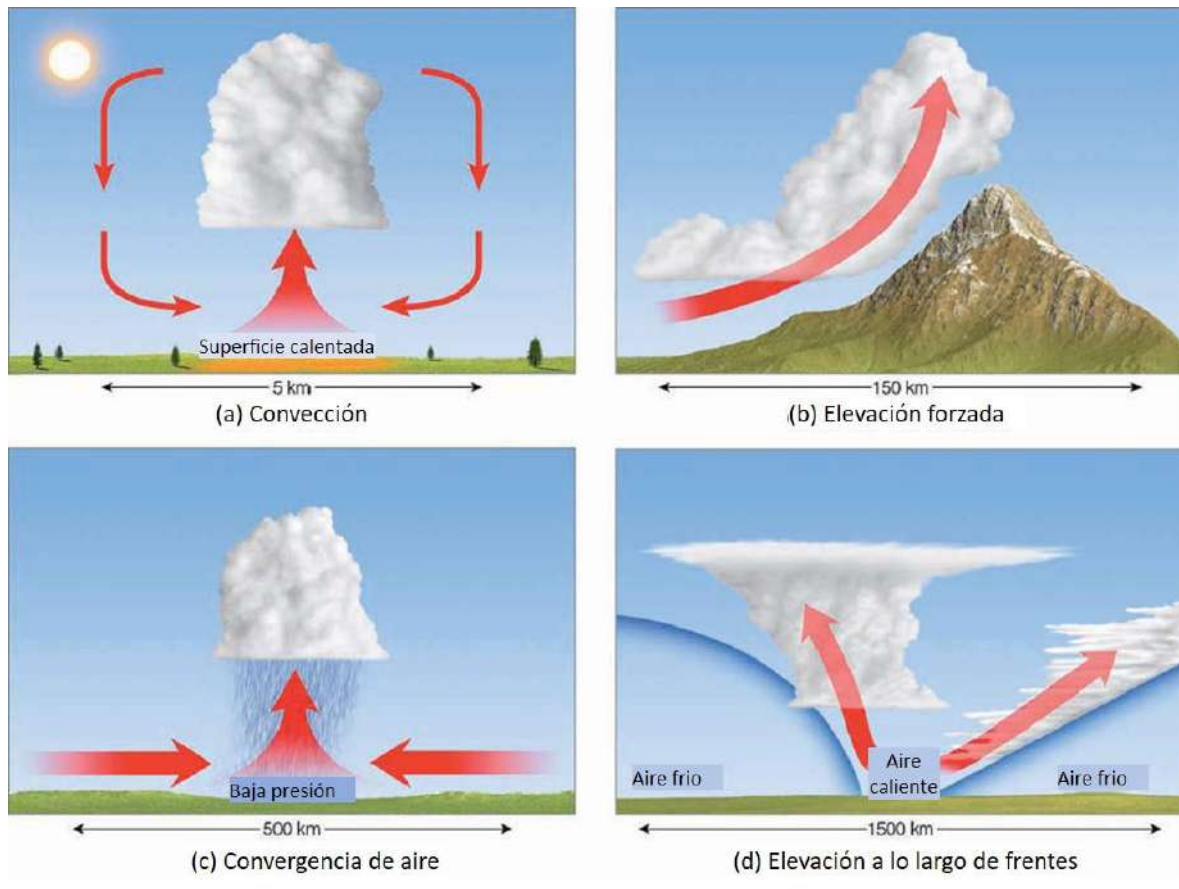


Figura 3: Principales tipos de formación de las nubes: (a) calentamiento de la superficie y convección; (b) elevación forzada a lo largo de la barrera topográfica; (c) convergencia del aire en la superficie; (d) elevación a lo largo de frentes

Fuente: Ahrens & Henson (2019)

2.3 GRANIZO

Peña y Pabón (2019) utilizando datos históricos de registros de periódicos nacionales, regionales, de archivos y bases de datos especializadas, identificaron 468 granizadas en diferentes regiones Colombia. Analizó el comportamiento de diferentes variables (índices de inestabilidad, viento, humedad relativa, la altura de la isoterma de 0 °C y precipitación) de simulaciones horarias generadas por el modelo Weather & Research Forecasting (WRF) en cada evento de granizada, estableciendo umbrales en los que tales granizadas ocurrieron para tener un elemento de estimación de probabilidad de granizada. Ajustaron los datos por

orografía, pendiente, altitud a nivel del mar y la dirección del viento, y generaron series de probables granizadas para una grilla de 10x10 km, las cuales se validaron frente a las registradas. Con estas series se establecieron los patrones espaciales y el ciclo anual de las granizadas para construir la climatología de este fenómeno en Colombia. Obtuvieron que las zonas con mayor probabilidad de granizadas se encuentran en zonas montañosas (cordillera Occidental, cordillera Central y cordillera Oriental) y en la Sierra Nevada de Santa Marta, especialmente en los departamentos de Antioquia, Caldas, Quindío, Valle del Cauca, Cauca, Norte de Santander, Santander, Cundinamarca y Boyacá.

2.4 CARACTERÍSTICAS DE LAS LLUVIAS EN EL VALLE DEL MANTARO

Villalobos *et al.* (2019), al realizar el análisis diferenciado de las características de los eventos de lluvia que se forman en cuatro zonas diferentes de la cuenca del Mantaro afirman que en las tres zonas correspondientes a Los Andes, el ciclo diario de las precipitaciones tiene un máximo en horas de la tarde, con continuidad hacia horas de la noche, mientras que, en la zona de transición, donde los totales de lluvia son menores, el máximo se desplaza hacia la madrugada. En gran parte del día y para todo el valle del Mantaro, las precipitaciones convectivas y estratiformes están relativamente equilibradas, lo que es consistente con el hecho de que ambos tipos de precipitaciones están asociadas generalmente a sistemas de nubes convectivas con componente orográfica en el forzamiento que las origina, de modo que la lluvia posee características convectivas y estratiformes en diferentes etapas de su evolución. Los porcentajes de ocurrencia de lluvias convectiva y estratiforme en sub-áreas de Los Andes Centrales del Perú están en proporción 30 y 70 por ciento respectivamente, y su contribución al acumulado de lluvia es de 63.3 y 36.7 por ciento respectivamente. En cambio, en la región de transición Amazonia-Andes, la distribución es el 31 por ciento convectiva y 69 por ciento estratiforme, pero sus contribuciones al acumulado de lluvia son más equilibradas (46 y 54 por ciento respectivamente)

2.5 ANTECEDENTES Y TRABAJOS RELACIONADOS CON LA INVESTIGACIÓN

Estrada *et al.* (2019), en la investigación que se basa en el estudio de una Tormenta Local Severa, ocurrida en la ciudad de Camagüey el 5 de mayo del 2018, concluyen que la

cizalladura en la vertical entre los 300 y 500 hPa sobre la provincia de Camagüey unido al fuerte calentamiento e influencia de una vaguada puede dar lugar a la formación de convección profunda donde se pueden producir Tormentas locales severas (TLS). Un flujo del viento del sureste o sur en niveles bajos principalmente entre 500 y 850 hPa, combinado con un flujo del norte, noreste o del suroeste a oeste por encima y temperaturas frías con suficiente humedad en 850 hPa, son condiciones muy favorables para las ocurrencias de TLS, aun cuando existan días en que ocurran y no son reportadas por la población.

García *et al.* (2007), manifiestan que la aparición de los fenómenos severos en el tiempo meteorológico (tornados, granizos y vientos lineales con rachas destructoras) está relacionada con cambios importantes en la morfología de las tormentas eléctricas. Las tormentas que alcancen ese estado son consideradas como un tipo especial de tormentas eléctricas llamadas tormentas eléctricas locales severas (TELS). El desarrollo de las TELS en la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) es una realidad y se debe ser considerado en la protección de la sociedad, debido a las pérdidas de vidas, daños materiales y cuantiosas afectaciones que ocurren como consecuencia de éstas. Al no contar con una cronología de las TELS en la ZMG fue necesaria la compilación de estas como base para realizar su climatología. Entre los resultados obtenidos se destaca que las TELS ocurren desde mayo hasta noviembre, principalmente en los meses de junio, julio y agosto. En mayor proporción se presenta durante horas de la tarde o de la noche, pero un grupo nada despreciable también ocurre durante la madrugada. Los autores también mencionan, que las TELS constituyen un elemento importante del clima de la ZMG que no puede ser ignorado desde el punto de vista científico y mucho menos en la práctica, por los efectos que produce en muchas ocasiones.

Balbastro y Sonzogni (2008), determinaron que, en varias ocasiones, tormentas que se desarrollaron sobre la región central de la República Argentina han producido daños de variada magnitud en estructuras livianas, particularmente galpones y silos. La magnitud de los daños va desde el desprendimiento de algunas chapas de la cubierta hasta la destrucción total de las mismas. Por lo general estas tormentas afectan áreas bastante extensas, del orden de cientos de kilómetros de extensión, dependiendo del sistema meteorológico que los provocó. En algunos casos los daños han llegado a la destrucción de la casi totalidad de las construcciones de estos tipos en una o varias localidades, con cuantiosas pérdidas materiales e incluso pérdidas de vidas humanas.

Las tormentas locales severas (TLS) en Cuba no poseen un destacado lugar respecto a los huracanes, ya que son netamente locales y no afectan grandes territorios, de esta forma el efecto de un suceso individual se reduce casi siempre a unas decenas de kilómetros cuadrados y parecen ser insignificantes si se les compara con los desastres ocasionados por los ciclones tropicales. Sin embargo, cuando se les analiza en conjunto, resultan ser considerables por el impacto socioeconómico que suelen producir sobre todo en las pérdidas de vidas humanas, los daños a las propiedades y a la agricultura (Aguilar y Carnesoltas 2005).

El granizo, es una forma de precipitación que se produce cuando corrientes ascendentes de aire en la tormenta eleva las gotas de lluvia a zonas atmosféricas extremadamente frías donde se congelan y forman bolas de hielo. El granizo cae cuando la corriente ascendente de aire ya no puede soportar el peso del hielo o cuando se debilita. Cuanto más fuerte sea la corriente ascendente de aire, más grande puede ser el granizo. Por lo general, el granizo tiene el tamaño de una arveja o de hasta una canica, pero las grandes tormentas pueden crear granizos más grandes. El granizo más pesado de aproximadamente 1 kg (2,2 lb) se registró en Gopalganj, Bangladesh, el 14 de abril de 1986. No obstante, también se registraron granizos de 3,4 kg (7,5 lb) en Hyderabad, India, en 1939. (Allianz Global Corporate & Specialty 2018)

2.6 ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

La relación matemática que expresa la conservación de la masa de un fluido se llama ecuación de continuidad, en cual en su forma deducida y derivada por el método Euleriano el cual en su forma de divergencia de masa se expresa por (Holton & Hakim, 2013):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

Una forma alternativa de la ecuación de continuidad se obtiene aplicando la identidad vectorial $\nabla \cdot (\rho U) \equiv \rho \nabla \cdot U + U \cdot \nabla \rho$ y la relación

$$\frac{D}{Dt} \equiv \frac{\partial}{\partial t} + U \cdot \nabla$$

Para conseguir

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} + \nabla \cdot U = 0 \quad (2)$$

Es la forma de divergencia de velocidades de la ecuación de continuidad.

2.7 DIVERGENCIA Y VORTICIDAD

2.7.1 Divergencia y Convergencia

Divergencia: Se define como el producto escalar del operador gradiente (∇) y un vector, que en este caso es el vector velocidad del viento (V), o sea $\nabla \cdot V$, donde:

$$\nabla = \mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial}{\partial z} \quad \text{y} \quad V = u \mathbf{i} + v \mathbf{j} + w \mathbf{k} \quad (3)$$

Siendo \mathbf{i} , \mathbf{j} y \mathbf{k} los vectores unitarios en los ejes x , y y z , respectivamente; y u , v y w , las componentes rectangulares del vector velocidad del viento en los ejes x , y y z , respectivamente. Entonces el gradiente referido al vector velocidad del viento es

$$\nabla \cdot V = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (4)$$

y cuando se hace referencia solamente al gradiente horizontal (∇_H), el término ($\frac{\partial w}{\partial z}$) no se toma en cuenta quedando la ecuación:

$$\nabla_H \cdot V = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \quad (5)$$

La expansión o extensión de un campo vectorial; suele aplicarse a vientos horizontales. Su unidad es s^{-1} . En el presente estudio se analizó la divergencia horizontal en el plano xy . En los cálculos valores positivos están referidos a divergencia propiamente dicho y valores negativos corresponden a convergencia.

Convergencia: Condición atmosférica que existe cuando los vientos causan un flujo de aire entrante en sentido horizontal hacia una región específica. **La divergencia** es el fenómeno opuesto, en el que los vientos causan un flujo de aire saliente en sentido horizontal desde una región específica.

2.7.2 Vorticidad

La vorticidad, la medida microscópica de la rotación en un fluido, es un campo vectorial definido como la curvatura de la velocidad. La vorticidad absoluta ω_a es la curvatura de la velocidad absoluta, mientras que la vorticidad relativa ω es la curvatura de la velocidad relativa. (Holton & Hakim, 2013)

$$\omega_a = \nabla \times V_a \quad \text{y} \quad \omega = \nabla \times V \quad (6)$$

El cual en coordenadas cartesianas es:

$$\omega = \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}, \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (7)$$

La diferencia entre la vorticidad absoluta y relativa es la vorticidad planetaria, el cual es solo la componente vertical local de la vorticidad de la Tierra debido a su rotación.

$$\xi = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad , \quad \eta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} + f \quad (8)$$

Donde f es el parámetro de Coriolis $f = 2\Omega \sin \phi$

Wallace & Hobbs (2006), indican que la **vorticidad** y la **divergencia** son cantidades vectoriales y escalares, respectivamente que se pueden definir no solo en coordenadas naturales, sino también en coordenadas cartesianas (x, y) y para el vector de viento horizontal (V). La **vorticidad** es la suma de la cortante y la curvatura, teniendo en cuenta sus signos algebraicos, y la **divergencia** es la suma de la difluencia y el estiramiento. En el **cuadro 1** se resume desde el punto de vista matemático las definiciones de propiedades del flujo horizontal.

Vorticidad relativa: Matemáticamente, es el rotacional del vector velocidad. En el hemisferio sur, el giro en sentido horario indica vorticidad ciclónica (valores negativos), giro antihorario, indica vorticidad anticiclónica. (valores positivos). Sus unidades están en s^{-1} (https://www.meted.ucar.edu/tropical/textbook_2nd_edition_es/navmenu.php?tab=4&page=1.4.0)

Advección de un escalar: La advección de un escalar por el viento, depende de la intensidad del viento, del gradiente del escalar y del ángulo entre las direcciones de ambos vectores. La intensidad de la advección es directamente proporcional a estos factores.

TABLA 1: DEFINICIONES DE PROPIEDADES DEL FLUJO HORIZONTAL

	Vectorial	Coordenadas Naturales	Coordenadas Cartesianas
Cortante		$-\frac{\partial V}{\partial n}$	
Curvatura		$V \frac{\partial \psi}{\partial S}$	
Difluencia		$V \frac{\partial \psi}{\partial n}$	
Extensión		$\frac{\partial V}{\partial S}$	
Vorticidad relativa ξ	$k \cdot \nabla \times V$	$V \frac{\partial \psi}{\partial S} - \frac{\partial V}{\partial n}$	$\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$
Divergencia $\text{Div}_H V$	$\nabla \cdot V$	$V \frac{\partial \psi}{\partial n} + \frac{\partial V}{\partial S}$	$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$
Deformación			$\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} ; \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$

Fuente: Wallace & Hobbs (2006)

Advección de Vorticidad: Es el proceso por el cual, el componente rotacional del viento (vorticidad), es transportado por un vector, en este caso, el viento total. También puede ser evaluado como el cambio de la vorticidad respecto del tiempo, en un punto dado. En el hemisferio sur (HS) el transporte negativo, implica advección de vorticidad ciclónica, mientras que transporte positivo, implica advección de vorticidad anticiclónica (Gil, *et. al.* s.f.).

2.8 PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA

En conjunto, un sistema puede poseer energía potencial y cinética macroscópica, pero también contiene energía interna debido a la energía cinética y potencial de sus moléculas y átomos. Los incrementos de la energía cinética interna en forma de movimientos moleculares se manifiestan como aumentos de la temperatura del sistema, mientras que los cambios en

la energía potencial de las moléculas son causados por cambios en sus posiciones relativas en virtud de cualquier fuerza que actúe entre las moléculas. (Wallace & Hobbs 2006)

Si no hay cambios en la energía cinética y potencial macroscópica del cuerpo, del principio de conservación de la energía se deduce que la energía interna del sistema debe aumentar en $q - w$. Es decir

$$q - w = u_2 - u_1 \quad (9)$$

donde u_1 y u_2 son las energías internas del sistema antes y después del cambio. En forma diferencial se expresa como:

$$dq - dw = du \quad (10)$$

donde dq es el incremento diferencial de calor agregado al sistema, dw es el elemento diferencial del trabajo realizado por el sistema y du es el incremento diferencial de la energía interna del sistema. Las ecuaciones (9) y (10) son los enunciados de la primera ley de la termodinámica.

2.9 TEMPERATURA POTENCIAL (θ)

Es una variable termodinámica ampliamente utilizada en meteorología que representa la temperatura que una parcela de aire seco, a una presión p (en hPa) y temperatura T (en K), tendría si fuera comprimida o expandida adiabáticamente hasta una presión de referencia p_0 (normalmente 1000 hPa). Matemáticamente se define como: (Wallace & Hobbs 2006)

$$\theta = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{R/c_p} = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{0,286} \quad (11)$$

donde R es la constante específica del aire seco (287 J/kg.K), C_p es el calor específico del aire seco a presión constante (1004 J/kg.K)

2.10 TEMPERATURA POTENCIAL EQUIVALENTE (θ_e)

Es la temperatura que una parcela de aire húmeda (o saturada) tendría si fuera elevada hasta una altura en la que todo el vapor de agua se condensara y abandonara la parcela y fuera luego comprimida adiabáticamente hasta la presión de referencia p_0 (normalmente 1000

hPa). Se puede determinar a partir de la temperatura potencial (θ) (en K) y considerando además el calor latente de vaporización (L_v) y la relación de mezcla de saturación (w_s). Matemáticamente se define como: (Wallace & Hobbs 2006)

$$\theta_e = \theta \exp\left(\frac{L_v w_s}{C_p T}\right) \quad (12)$$

donde C_p es el calor específico del aire seco a presión constante.

2.11 CARACTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS DE LA PRECIPITACIÓN EN EL VALLE DEL MANTARO

Las precipitaciones, en promedio, para toda la cuenca del Mantaro se inician en el mes de julio y se incrementan gradualmente en los meses de agosto y setiembre, haciéndose más significativas a partir de octubre hasta alcanzar valores máximos en febrero (Figura 4). Los meses de máximas precipitaciones son enero, febrero y marzo, en abril la precipitación disminuye bruscamente, para luego alcanzar los valores mínimos en junio. Este patrón se cumple en casi todas las estaciones de la cuenca. El 83 por ciento de la precipitación anual ocurre entre los meses de octubre a abril, de los cuales el 48 por ciento están distribuidos casi equitativamente entre los meses de enero, febrero y marzo (IGP 2005)



Figura 4: Climatología de la precipitación (en mm/mes) Período: 1960 – 2002 en Huayao

Fuente: IGP (2005)

2.12 MODELO WEATHER RESEARCH AND FORECASTING (WRF)

En este trabajo de investigación se usó como una herramienta de análisis el modelo “Weather Research and Forecasting” (WRF), que es considerado como la siguiente generación de sistemas de predicción numérica de tiempo a mesoescala. El modelo es útil para hacer un diagnóstico (estudiar) la atmósfera y como una herramienta para realizar pronósticos. El desarrollo de WRF ha sido un esfuerzo de múltiples agencias para construir un sistema modelo de pronóstico y la asimilación de datos de mesoescala. Entre ellos tenemos la colaboración del Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas de mesoescala (NCAR) y División de Meteorología de Microescala (MMM), Administración Nacional del Océano y Atmósfera (NOAA), Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP), el Laboratorio de Investigación del Sistema Terrestre (ESRL), etc. (Schmitz *et. al.* 2008).

Los usos que puede tener este modelo son (NCAR – MMM, 2009):

- Simulaciones ideales
- Investigación de parametrizaciones
- Investigación en la asimilación de información
- Investigación de pronóstico
- Predicción numérica del tiempo en tiempo real
- Aplicación de modelos acoplados
- Enseñanza

La componente meteorológica de WRF, el ARW (Advanced Research WRF) model, se basa en un núcleo dinámico (la parte del modelo que representa las ecuaciones básicas de la dinámica de la atmósfera) computacionalmente eficiente, apropiado para la simulación de fenómenos meteorológicos característicos que abarcan desde unos pocos metros hasta miles de kilómetros. El modelo posee una serie de opciones para las parametrizaciones físicas que representan procesos importantes como son, por ejemplo, la física de nubes, precipitación, las interacciones suelo – atmósfera y radiación solar.

El modelo es inicializado con datos forzantes, siendo uno de ellos son los datos meteorológicos de modelos globales de pronóstico (Global Forecast Models, GFM), de baja resolución espacial de 1° y una resolución temporal de 6 horas. (Schmitz *et al.* 2008), y otro,

es el uso de suelo y categorías de suelo como datos estáticos. Así mismo, el modelo utiliza un sistema de coordenadas verticales de presión hidrostática que siguen el terreno (Terrain following hydrostatic-pressure vertical coordinate)

2.13 MODELO CONCEPTUAL

Un modelo conceptual es una descripción del esquema fundamental de un fenómeno meteorológico y una identificación de los principales procesos físicos y dinámicos de un sistema de tiempo concreto (Winkler *et al.* 2001, citados en Nieto 2005).

Hacia finales de los años 90 comenzó la compilación de un manual de los modelos conceptuales mejor definidos y aceptados en el mundo científico denominado "*Manual of Synoptic Satellite Meteorology – Conceptual Models*" (Winkler *et al.* 2001, citados en Nieto 2005). Inicialmente fue elaborado por el instituto meteorológico austriaco (ZAMG), con la cooperación posterior de los institutos meteorológicos holandés y finlandés (KNMI y FMI).

Un modelo conceptual completo debe consistir en:

- a) una definición del fenómeno en términos de patrones reconocidos por medio de observaciones, análisis o simulaciones
- b) una descripción de su ciclo de vida en términos de apariencia, tamaño, intensidad y tiempo presente que los acompaña
- c) una identificación de los fenómenos físicos que determinan la formación y evolución de la estructura
- d) una especificación de los campos clave que definen los procesos principales
- e) una guía para la predicción de las condiciones y situaciones meteorológicas usando los campos de diagnósticos y pronósticos que discriminen su desarrollo o no
- f) una guía para la predicción del desplazamiento y evolución de la estructura

Los modelos conceptuales facilitan: 1) una síntesis de la información disponible, 2) una base para aislar fenómenos de tiempo presente y para extraer las señales principales de patrones complejos, 3) una herramienta de apoyo a la predicción numérica, 4) un complemento en la predicción de fenómenos sinópticos y mesoescalares y 5) un complemento esencial en la predicción a muy corto plazo y en la predicción de fenómenos severos.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDIO

El presente estudio corresponde al Distrito de Huancán – Provincia de Huancayo, departamento de Junín, donde su Plaza principal se ubica aproximadamente en la siguiente coordenada geográfica: Latitud: 12° 6' 29" S Longitud: 75° 12' 15" W altitud: 3210 msnm y su extensión está comprendido entre las coordenadas mostradas en la Figura 5.

El distrito de Huancán es uno de los veintiocho distritos que conforman la Provincia de Huancayo, ubicada en el Departamento de Junín, bajo la administración del Gobierno Regional de Junín, en el Perú. Limita por el norte y por el este con el Distrito de Chilca; por el este con el Distrito de Sapallanga; por el oeste con los distritos de Tres de Diciembre y Huamancaca Chico; y, por el sur con el Distrito de Huayucachi.

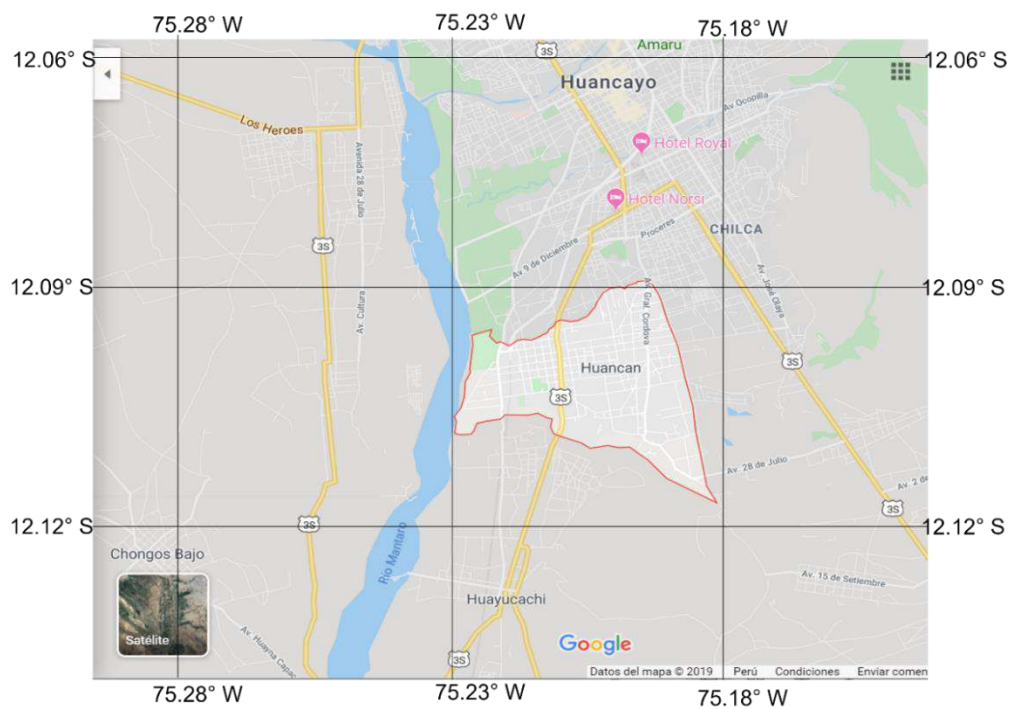


Figura 5: Ubicación del Distrito de Huancán

Fuente: Adaptado de Google maps

Teniendo en cuenta la ubicación del distrito de Huancán, se estableció las áreas de estudio para el modelado y análisis de las condiciones atmosféricas

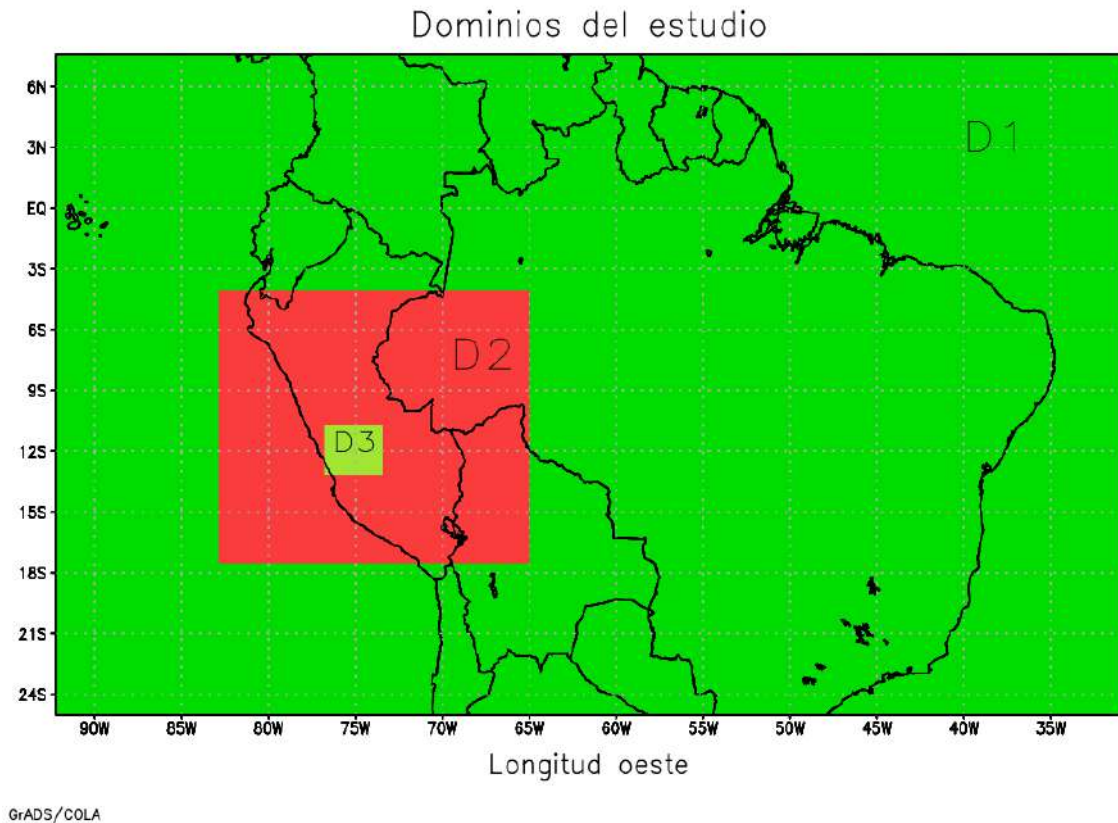


Figura 6: Dominios utilizados en la simulación D1, D2 y D3, con resoluciones espaciales de 50 km, 10 km y 2 km, respectivamente

Fuente: elaboración propia

3.2 MATERIALES, EQUIPOS Y SOFTWARES

- Información proveniente del Modelo Global Forecast System (GFS) Atmospheric Model de la NOAA. Esta información tiene una resolución espacial de $0,5^\circ$ (≈ 55 km) y una resolución temporal de 3 horas. Esta información está en formato GRIB2 y se encuentran disponibles en la página web <http://nomads.ncdc.noaa.gov> (Reanálisis del 12, 13 y 14 octubre de 2019). Para las condiciones iniciales del modelamiento se usó la salida de la corrida de las 00Z del día 12 de octubre, para los niveles de presión de 1000 hPa, 925hPa, 850hPa, 700 hPa, 500 hPa, 400 hPa, 300 hPa y 200 hPa

- Datos de precipitación de las estaciones de Santa Ana, Huayao y Viques, para los días 13 y 14 de octubre de 2019
- Imágenes de satélite de GOES 16 del día 13 de octubre de 2019.
- PC o Laptop
- Softwares: Visualizador de gráficos GRADs, Office 365
- Modelo Regional Weather Research and Forecasting (WRF) versión 4.1.2
- Útiles de escritorio

3.3 MÉTODOS

3.3.1 Análisis e identificación de las principales variables de la dinámica atmosférica que provocaron la tormenta de granizo en el Distrito de Huancán-Huancayo

- Se analizaron las imágenes de satélite provenientes del satélite GOES 16, del día 13 de octubre del 2019, principalmente desde tres (03) horas antes del evento.
- Con los datos provenientes del modelo Global Forecast System (GFS), considerando como condición inicial el 12 de octubre de 2019 a las 00 Z y teniendo en cuenta los dominios D1, D2 y D3, se corrió el modelo regional WRF v4.1.2, en el que se realizó el preprocesamiento (WPS), el procesamiento (ARW system) y el postprocesamiento (WRF Post Processor), para generar los archivos con extensión “xxxx.dat” y “xxxx.ctl”.
- Haciendo uso del software GRADs, se generaron gráficos por cada dominio (D1, D2 y D3) y en diferentes niveles del modelo de las siguientes variables: líneas de corriente, relación de mezcla, humedad relativa, divergencia, vorticidad relativa, velocidad vertical, temperatura potencial, temperatura potencial equivalente, entre otros, para los cuales fueron necesarios usar las ecuaciones de la **tabla 1**, así como las ecuaciones 11 y 12. Del mismo modo, dependiendo de las variables que genera el WRF, fue necesario obtener variables que ayuden a explicar la tormenta de granizo y se desarrollaron scripts en el mismo visualizador GRADs para completar el análisis.
- Para identificar las variables principales asociadas a la tormenta de granizo, se hicieron los análisis correspondientes de las variables: divergencia, vorticidad relativa, velocidad vertical, temperatura potencial equivalente, relación de mezcla, entre otros, en el dominio correspondiente a nivel local y regional.

- Teniendo en cuenta los resultados de los ítems anteriores, que nos explicaban los factores favorables para la ocurrencia de la tormenta de granizo, se analizaron el comportamiento de cada una de ellas en cada dominio (D1, D2 y D3) y a partir del cual se determinó el dominio en el que las condiciones de la dinámica atmosférica son más influyentes en la ocurrencia de la tormenta de granizo, la que puede ser a nivel local y/o regional. Los niveles analizados en el estudio tomando en cuenta las coordenadas verticales del modelo, principalmente fueron: superficie (aproximadamente 680 hPa), nivel 15 (aproximadamente 500 hPa) y nivel 22 (aproximadamente 300 hPa)
- A los resultados del ítem anterior se completaron con la obtención de perfiles verticales de variables atmosféricas asociadas a la estabilidad atmosférica, los cuales estén asociadas a movimientos convectivos profundos.
- Con estos resultados se evaluó la posibilidad de realizar un pronóstico de eventos similares

3.3.2 Análisis e identificación de las principales variables de la termodinámica atmosférica que ocasionó la tormenta de granizo en el Distrito de Huancán-Huancayo

- Con los análisis realizados hasta con 24 horas de anticipación, los cuales están íntimamente asociadas a la tormenta de granizo en el distrito de Huancán-Huancayo, y considerando que el evento fue a nivel local o regional, se hizo un análisis del comportamiento de los perfiles verticales de las variables asociadas a la estabilidad atmosférica como: de temperatura potencial (θ) y temperatura potencial equivalente (θ_e), los cuales nos dan referencias de la existencia de convección profunda. En este caso se hicieron énfasis en evaluar $\left(\frac{\partial\theta}{\partial z}\right)$ y $\left(\frac{\partial\theta_e}{\partial z}\right)$
- Para la evaluación del grado de saturación de la atmósfera, se analizó la distribución de la humedad relativa en el nivel de superficie y 500 hPa, principalmente en el dominio D3. También se analizó el perfil vertical de la humedad relativa considerando la latitud del distrito de Huancán.
- Así mismo, se analizaron las imágenes del satélite GOES 16 y la microfísica nocturna RGB (Red, Green, Blue), para el día 13 de octubre del 2019, en instantes previos, durante e instantes después de la ocurrencia de la tormenta de granizo, con la

finalidad de detectar las nubes de desarrollo vertical, siguiendo la metodología de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

3.3.3 Identificación y análisis de los impactos potenciales de la tormenta de granizo en el Distrito de Huancán-Huancayo

- Para el cumplimiento de este objetivo, se hicieron el mayor número de entrevistas anónimas a los pobladores del Distrito de Huancán – Huancayo, para saber en qué medida les afectó la granizada. Estas entrevistas, también se hicieron en distritos aledaños, pero no para el evento del 13 de octubre, sino para identificar otros eventos de tormentas de granizo, mucho de los cuales no son reportadas ni difundidas por los medios de comunicación ni por las instituciones correspondientes.
- Así mismo de las diferentes instituciones como el Centro de Operaciones de Emergencia se recurrió a información Nacional (COEN), Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, Vivienda y Construcción, Salud, medios de comunicación, entre otros, con lo que nos permitió tener datos o evidencias principalmente cualitativos de los impactos de la tormenta de granizo.
- En cada una de las instituciones se buscaron reportes de daños ocasionados por la tormenta de granizo. Así mismo se detallaron los impactos potenciales adicionales de esta tormenta, teniendo en cuenta las actividades principales que se desarrollan en el distrito de Huancán – Huancayo

3.3.4 Establecimiento de un modelo conceptual asociado a la tormenta de granizo en el distrito de Huancán – Huancayo

- Para este objetivo y según los resultados de los dos primeros objetivos, se identificaron las principales variables meteorológicas que están asociadas o sean favorables a los movimientos verticales ascendentes. Para ello también se tuvo en cuenta las imágenes de satélite con los cuales se pudo aproximar la duración del evento.
- Después de identificar las principales variables de las condiciones atmosféricas y determinar el patrón de circulación asociadas a la tormenta de granizo, se procedió a plantear el modelo conceptual, el cual consistió en obtener ilustraciones idealizadas y que sintetizan e integren la interacción entre las variables que provocaron la tormenta de granizo.

- Se especificaron las variables principales que definen los procesos asociados a la tormenta de granizo
- Se generaron ilustraciones a mano alzada de las variables identificadas en la tormenta de granizo para posteriormente con la ayuda del software Paint, Ilustrador u otro, se procedió a digitalizar.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se inicia con presentación de las generalidades que apoyaron a la ubicación geográfica de la zona de estudio y la coordenada vertical del modelo WRF sobre el distrito de Huancán. Es así en la Figura 7 se muestra las características topográficas para el dominio D3 de la zona de estudio y en el que se ubica (de acuerdo con las coordenadas geográficas) el distrito de Huancán y las estaciones meteorológicas muy cercanas a ella (Santa Ana, Huayao y Viques) que también corresponde a los dominios del Valle del Mantaro. Su altitud varía entre 3000 msnm y 3500 msnm.

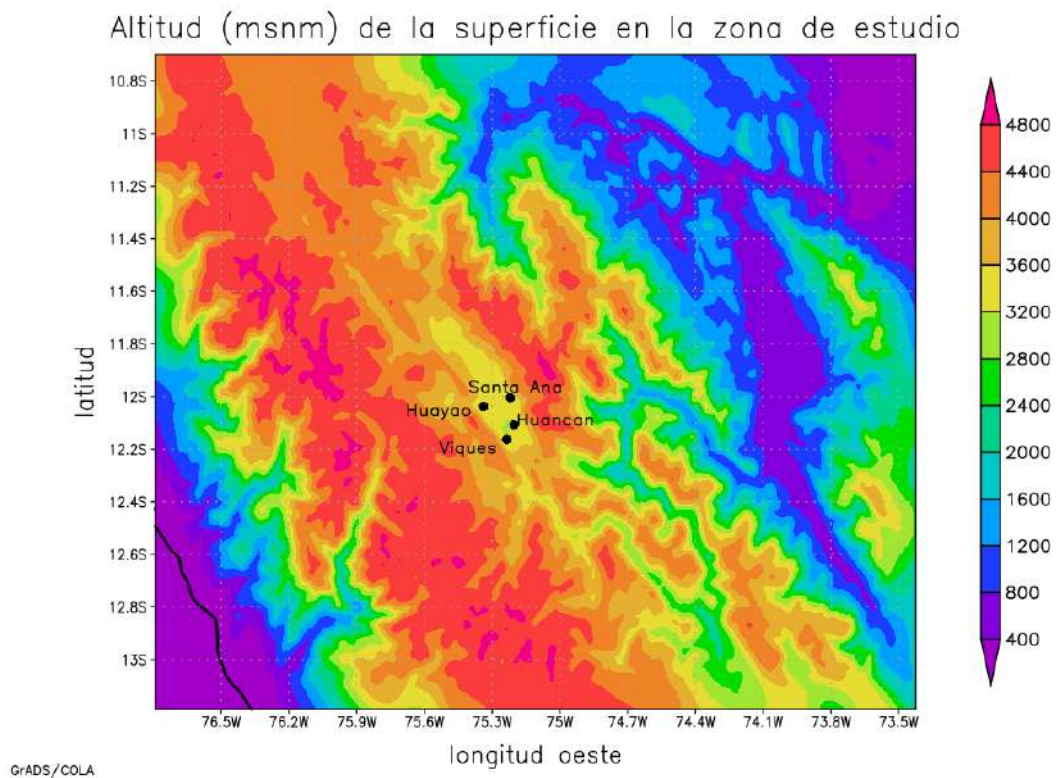
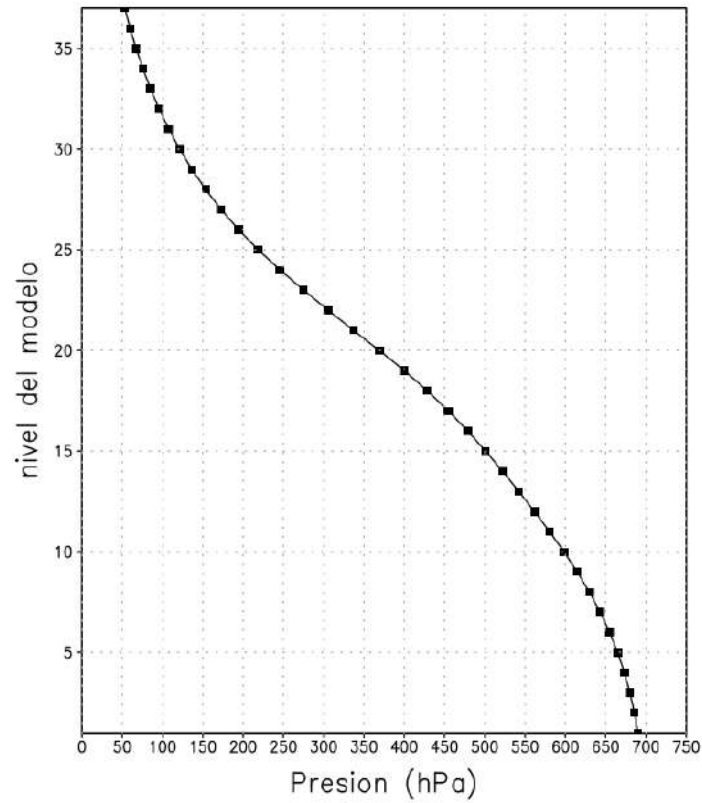


Figura 7: Características topográficas (altitud en msnm) para el dominio D3

Así mismo en la Figura 8, se presenta la coordenada vertical del modelo (37 niveles) en función de la presión atmosférica sobre el distrito de Huancán. De ello se determinaron los niveles y sus correspondientes valores de presión para los análisis de las diferentes variables y que ayuden a explicar los objetivos planteados. Estos niveles principales se muestran en la Tabla 2.

Cabe resaltar que los análisis para las diferentes variables se realizaron principalmente a nivel de superficie, a nivel medio de la tropósfera (500 hPa) y nivel alto (300 hPa).

Variación de la presión según nivel del modelo WRF sobre Huancan



GrADS/COLA

Figura 8: Variación de la presión atmosférica según nivel del modelo, sobre el distrito de Huancán

TABLA 2: NIVELES (COORDENADA σ) DEL MODELO WRF Y VALORES DE PRESIÓN (HPA) SOBRE HUANCÁN

Nivel del modelo	Presión atmosférica (hPa)
1	Superficie (\approx 680 hPa)
10	600
15	500
17	450
22	300
24	250
26	200

Fuente: elaboración propia

4.1 ANÁLISIS E IDENTIFICACIÓN DE LAS PRINCIPALES VARIABLES DE LA DINÁMICA ATMOSFÉRICA QUE PROVOCARON LA TORMENTA DE GRANIZO EN EL DISTRITO DE HUANCÁN-HUANCAYO

De acuerdo con Chumpitaz (2019), referente al reporte complementario N° 2516 del 17/10/2019, a las 16:30 hrs del 13/10/2019 se produjo el colapso de techo del local “2 estrellas” a consecuencia de las intensas lluvias acompañadas de granizo, ocasionando daños a la vida y a la salud de las personas en el distrito de Huancán. Hubo seis fallecidos y 28 personas heridas. Entonces considerando esta información, se presenta en la Figura 9 la distribución de la precipitación obtenida mediante el uso de los datos provenientes del análisis del modelo Global Forecast System (GFS por sus siglas en inglés), el cual fue reanalizado con el modelo regional WRF, para el dominio D3 entre las 21:00 y 23:00 UTC. En dicha Figura se puede apreciar que las áreas con mayores precipitaciones se encuentran ubicadas al nor este del distrito de Huancán, mientras que en el distrito de Huancán y alrededores, se tienen precipitaciones acumuladas menores a 10 mm y hacia oeste y sur oeste con precipitaciones acumuladas también menores a 10 mm.

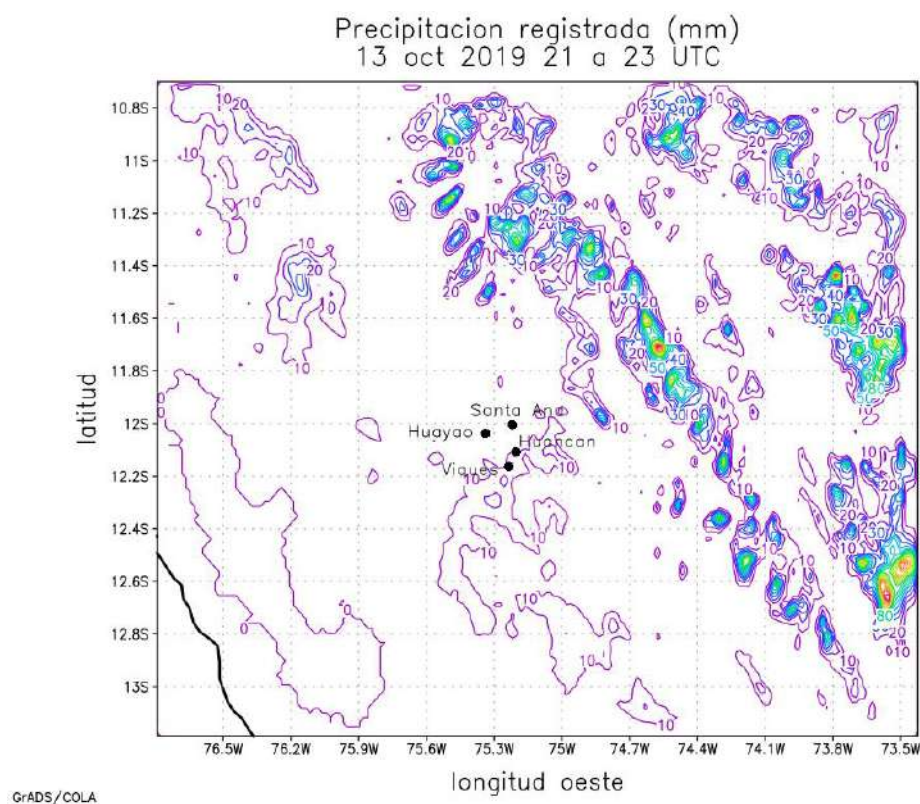


Figura 9: Distribución de la precipitación (acumulada en mm) analizada en el dominio D3, para el 13 de octubre de 2019 entre 21:00 y 23:00 UTC

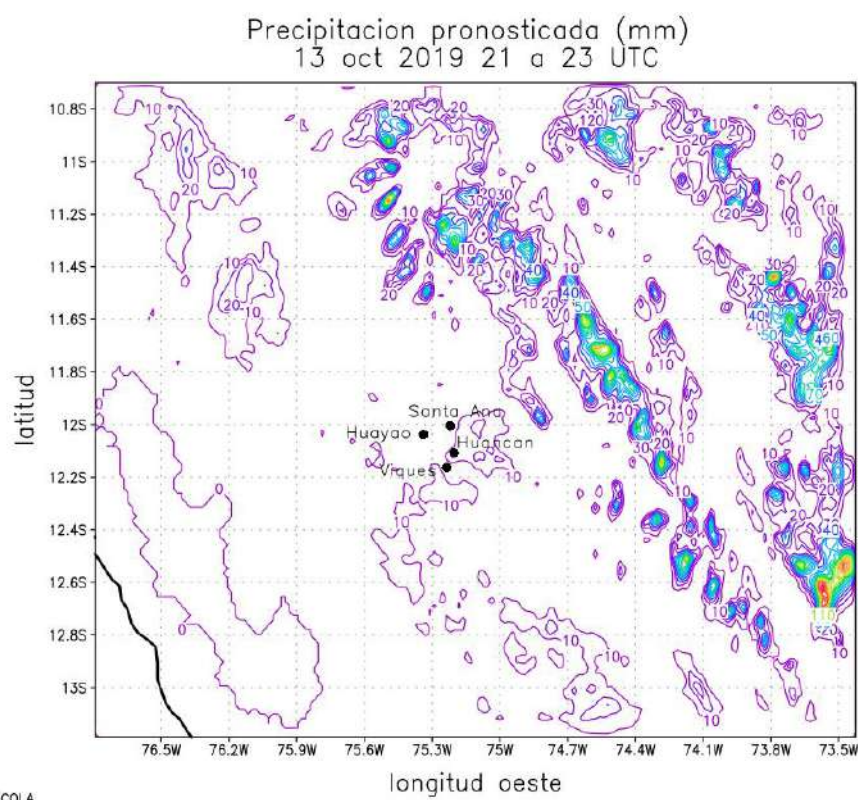


Figura 10: Distribución de la precipitación pronosticada (acumulada en mm) en el dominio D3, para el 13 de octubre de 2019 entre 21:00 y 23:00 UTC

Así mismo, en la Figura 10 se presenta la distribución de la precipitación pronosticada, para el 13/10/2019 entre las 21:00 y 23:00 UTC, tomando como condición inicial los datos del modelo GFS del día 12/10/2019 a las 00:00 UTC. Se puede decir que esta distribución tiene prácticamente las mismas características mostrados en la Figura 9 y también sobre el distrito de Huancán las precipitaciones acumuladas en el período no superan los 10 mm.

TABLA 3: DATOS DE PRECIPITACIÓN (MM) ACUMULADA EL 13 DE OCTUBRE DE 2019 EN LAS ESTACIONES DE SANTA ANA, HUAYAO Y VIQUES

Estación	Latitud (S)	Longitud(W)	Altitud(msnm)	Precipitación (mm/día)
Santa Ana	12° 00' 15''	75° 13' 15''	3295	2.4
Huayao	12° 02' 18''	75° 20' 17''	3360	0.4
Viques	12° 09' 47''	75° 14' 07''	3186	4.8
Huancán	12° 06' 29''	75° 12' 15''	3210	s/d

Fuente: <https://www.senamhi.gob.pe/?p=estaciones>

Para complementar la información y dado que en Huancán no hay una estación meteorológica, en la **Tabla 3** se muestran las precipitaciones acumuladas para el 13 de octubre de 2019, para las estaciones de Santa Ana, Huayao y Viques, donde podemos verificar que en la estación de Viques (que es la más cercana a Huancán según la Figura 9 y está aproximadamente a 7 km), se registró 4.8 mm, el cual tiene coherencia con lo observado en la Figura 9, donde justamente sobre dicha estación se tiene un núcleo de precipitación de 10 mm.

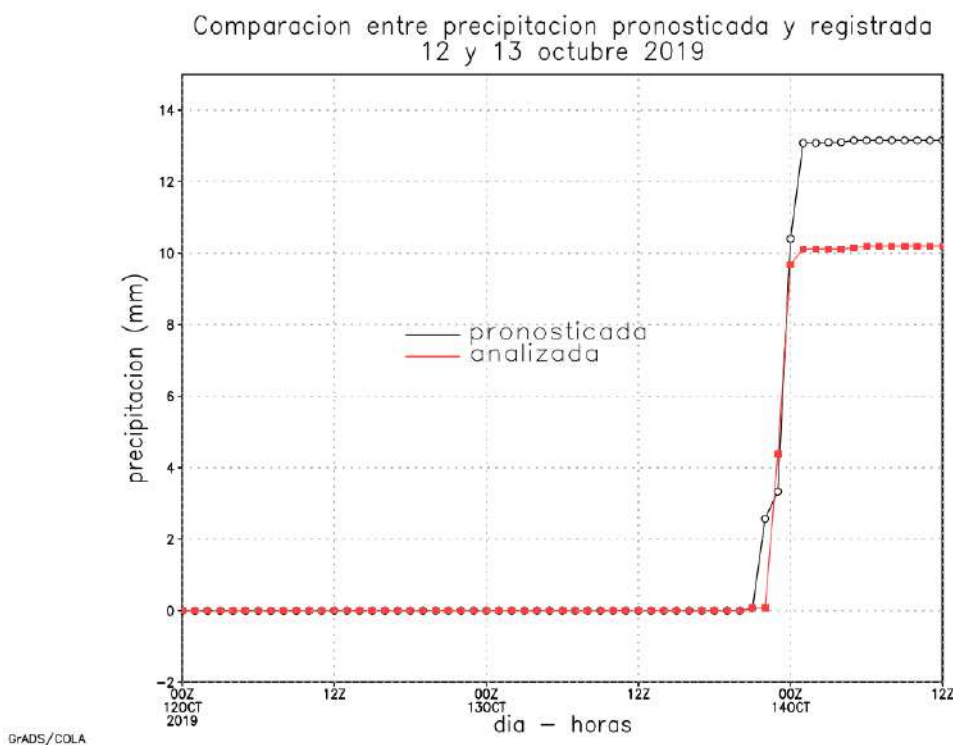


Figura 11: Comparación entre la precipitación analizada y pronosticada por el modelo WRF, para la ubicación del Distrito de Huancán

En la Figura 11, se hace la comparación entre la precipitación horaria analizada y pronosticada para la ubicación del distrito de Huancán por el modelo regional WRF, que tomó como datos de entrada los datos analizados y pronosticados del modelo GFS, con información inicial del día 12 de octubre a las 00:00 UTC (11 de octubre 19:00 HL). En ella se puede observar claramente que la tendencia es la misma y que a las 21:00 UTC se inicia la precipitación aparentemente intensa, acumulándose 10 mm según la analizada y 12 mm

según la pronosticada. Esto significa que el modelo WRF si logra detectar la ocurrencia de precipitación en el momento del colapso del local “2 estrellas”. Se debe aclarar que en este caso lo analizado y pronosticado no hace diferencia en el tipo de precipitación.

4.1.1 Análisis de la humedad atmosférica

a. Relación de mezcla y líneas de corriente en el dominio D1

Para que ocurran precipitaciones (sean líquidas y/o sólidas) debe haber nubes y para que existan nubes en un lugar debe haber humedad y condiciones atmosféricas que desencadenan en movimientos verticales ascendentes. A escala sinóptica para la superficie terrestre mostradas en las Figuras 12 y 13, que corresponden a las 18:00 UTC y 21:00 UTC, respectivamente de la relación de mezcla y líneas de corriente, se puede observar claramente que el mayor contenido de humedad se encuentra al noreste de la sierra central, vale decir en la selva norte, donde la relación de mezcla alcanza valores hasta los 18 g/kg, el cual se puede decir que está asociado a la zona de convergencia intertropical (ZCIT), mientras que la sierra se detectan valores de relación de mezcla que fluctúan entre 4 a 6 g/kg. Así mismo se nota que el flujo de aire es del noreste, el cual favorece la advección de humedad hacia la sierra, obviamente también hacia la región en la que está ubicada el distrito de Huancán.

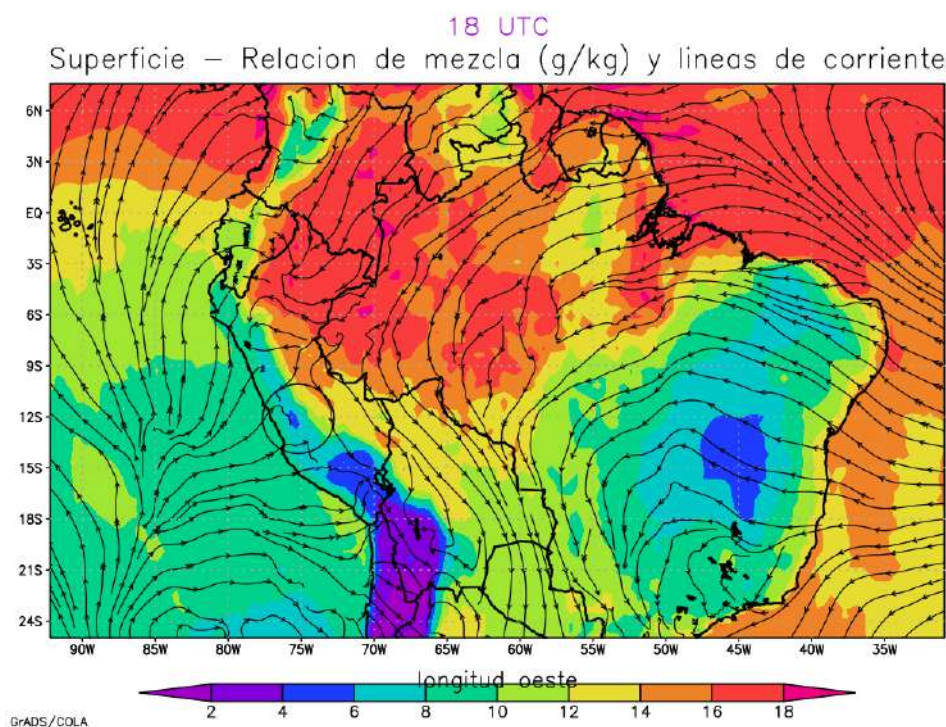


Figura 12: Relación de mezcla (g/kg) y líneas de corriente en superficie en dominio D1 a las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019

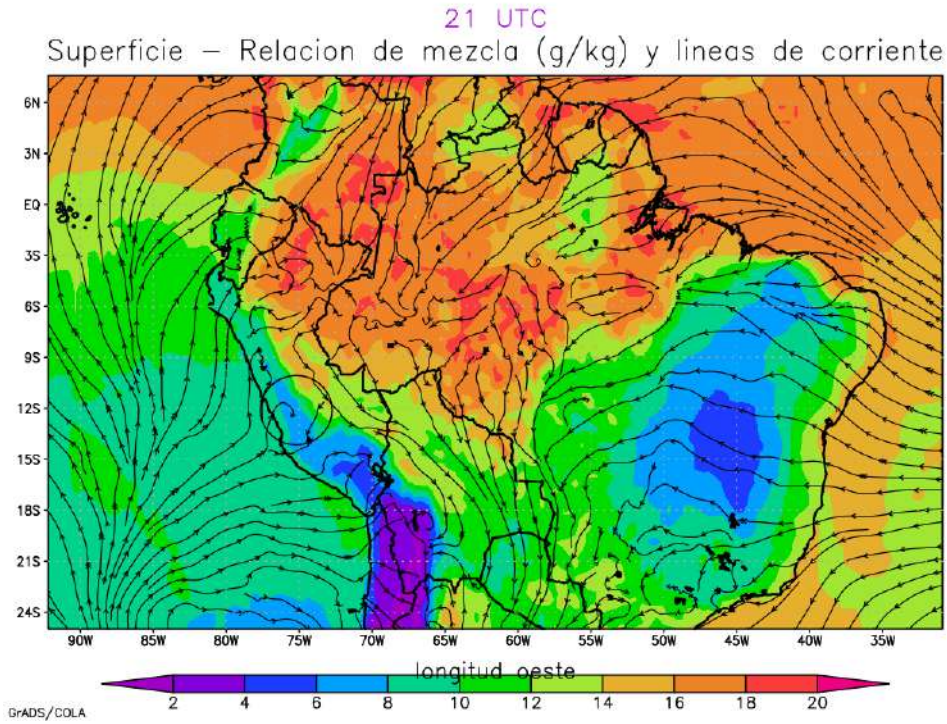


Figura 13: Relación de mezcla (g/kg) y líneas de corriente en superficie en dominio D1 a las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019

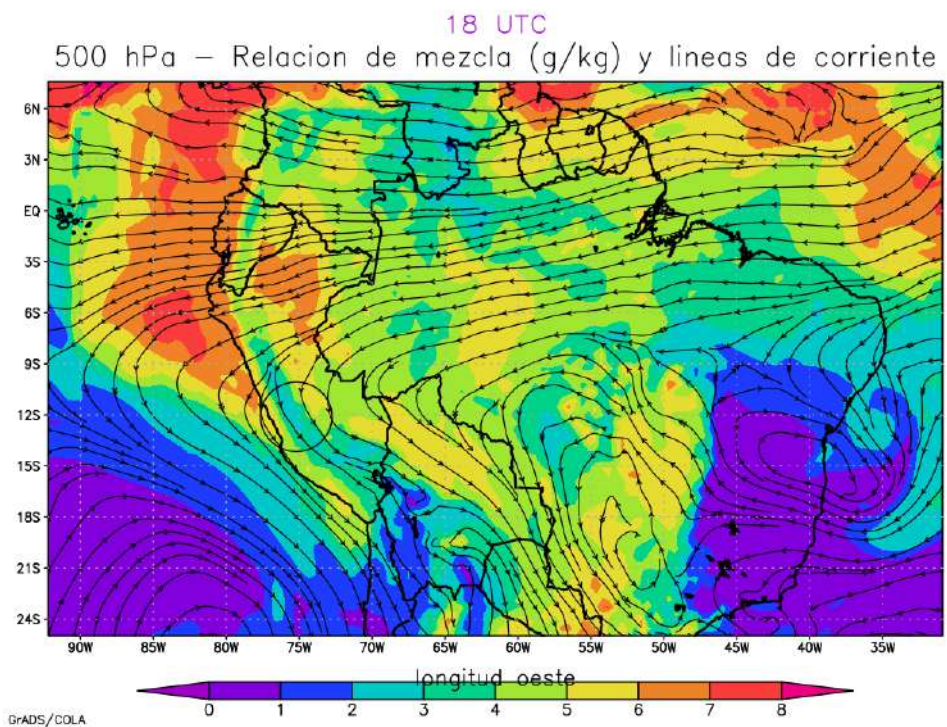


Figura 14: Relación de mezcla (g/kg) y líneas de corriente en 500 hPa para dominio D1, para las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019

De la misma forma en el nivel de 500 hPa, si bien es cierto que la zona de mayor humedad está concentrado al oeste de la costa norte del Perú y el flujo es hacia el oeste, hay aporte de humedad a las 18:00 y 21:00 UTC desde la selva central y norte, donde la relación de mezcla tiene valores entre 5 y 7 g/kg, lo que significa que niveles medios también se tiene advección de humedad desde el noreste de la región u zona de estudio. Estas características se pueden visualizar en las Figuras 14 y 15.

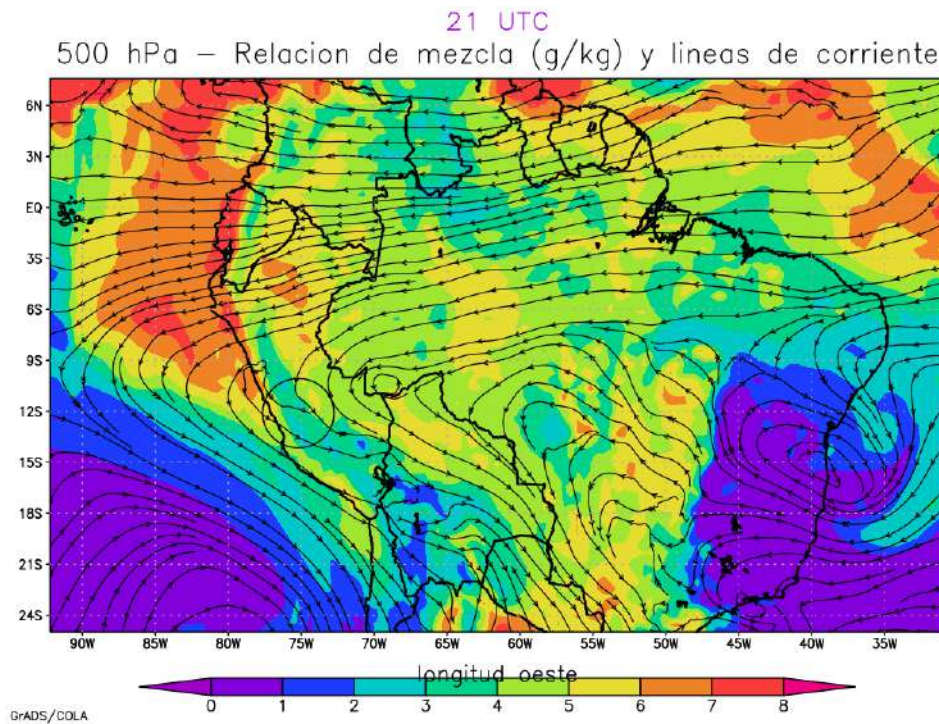


Figura 15: Relación de mezcla (g/kg) y líneas de corriente en 500 hPa para dominio D1 para las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019

b. Relación de mezcla y líneas de corriente en el dominio D2

A nivel regional considerado en el dominio D2, se ratifica el flujo de humedad desde noreste del territorio peruano, tanto a las 18:00 UTC y 21:00 UTC; o sea hay transporte desde la selva norte y central donde la relación de mezcla varía entre 14 y 16 g/kg, hacia la vertiente oriental de la cordillera de los andes, donde se encuentra la zona de estudio. Así mismo hacia las partes altas de la cordillera donde la relación de mezcla está con valores por debajo de 6 g/kg, se nota flujo convergente del noreste y suroeste que supondría que está asociado a movimientos verticales ascendentes y que estaría favoreciendo la formación de nubes las que sería de origen orográfico. Lo explicado en el párrafo se pueden visualizar en las Figuras 16 y 17.

Superficie – Relación de mezcla (g/kg) y líneas de corriente ^{18 UTC}

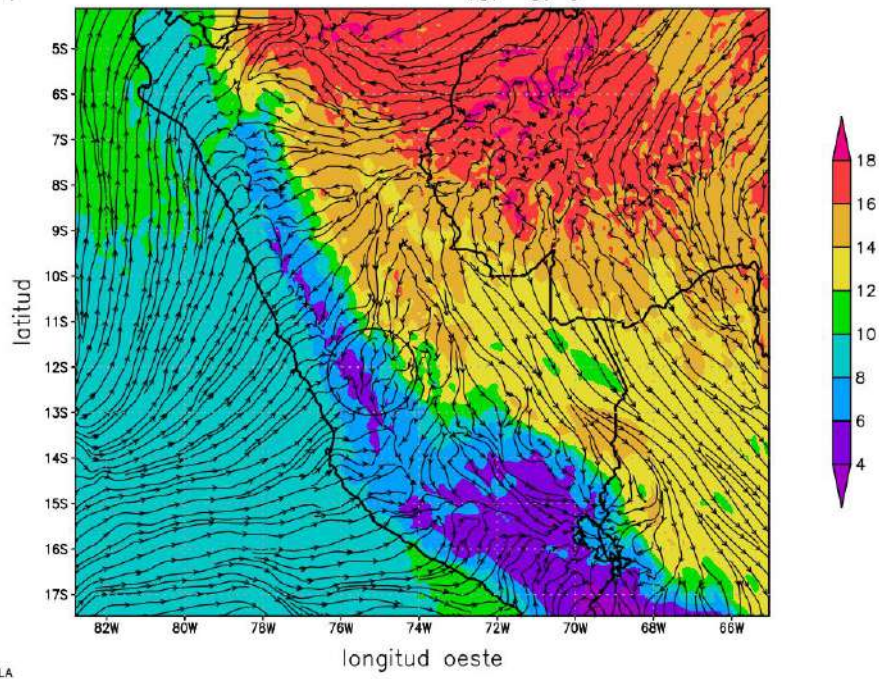


Figura 16: Relación de mezcla (g/kg) y líneas de corriente en superficie para dominio D2 para las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019

Superficie – Relación de mezcla (g/kg) y líneas de corriente ^{21 UTC}

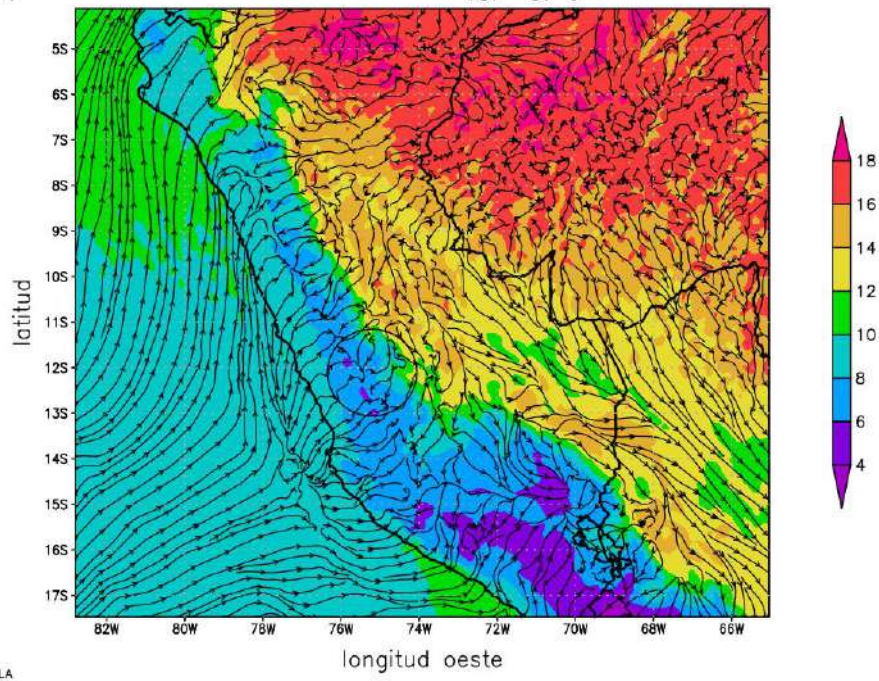


Figura 17: Relación de mezcla (g/kg) y líneas de corriente en superficie para dominio D2 para las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019

Analizando las Figuras 18 y 19, se nota que la relación de mezcla en 500 hPa en la región de la selva a las 18:00 UTC y 21:00 UTC fluctúa entre 5 y 7 g/kg, mientras que la región de estudio varía entre 2 y 4 g/kg, pero notándose que también a este nivel hay advección de humedad desde la región noreste (selva central y norte) a la zona de estudio, que indica que a nivel sinóptico y regional la fuente de humedad se ubica en la región de la selva norte y central para el evento considerado en el estudio.

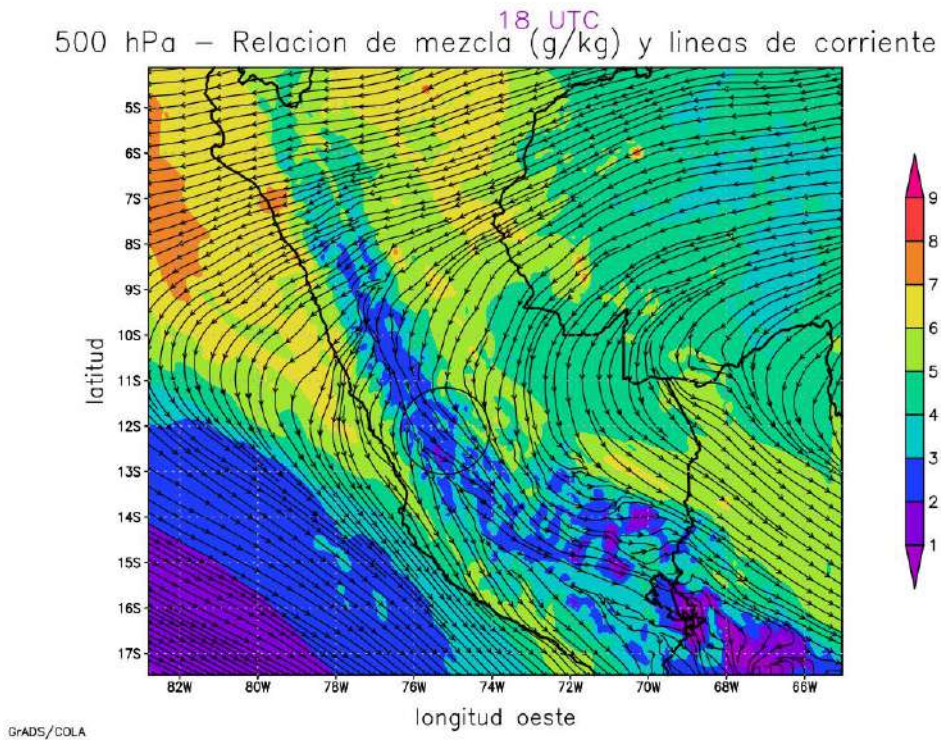


Figura 18: Relación de mezcla (g/kg) y líneas de corriente en 500 hPa para dominio D2 para las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019

A las 21:00 UTC, hora aproximada de la ocurrencia del granizo, se nota una confluencia de los vientos del noroeste y noreste a los 500 hPa, ligeramente al este del distrito de Huancán (Figura 19), lo que estaría indicando que sobre la zona y a esos niveles estaría favoreciendo los movimientos verticales ascendentes, que reforzaría la formación de nubes de desarrollo vertical. Esta característica no se observa a las 18:00 UTC (Figura 18), pero de todas maneras hay aporte o advección de humedad desde el noreste de la zona de estudio.

500 hPa – Relación de mezcla (g/kg) y líneas de corriente ^{21 UTC}

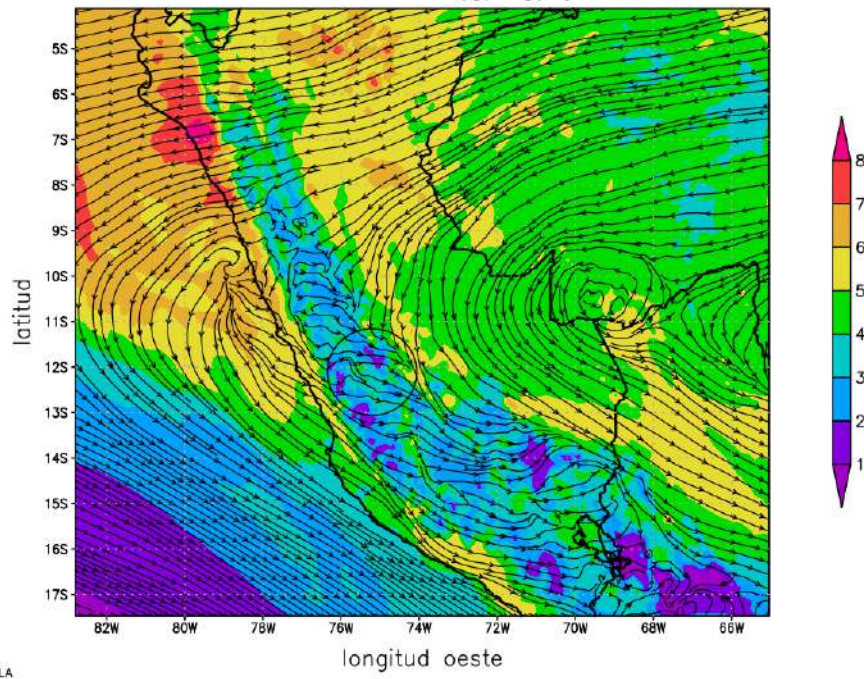


Figura 19: Relación de mezcla (g/kg) y líneas de corriente en 500 hPa para dominio D2 para las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019

c. Relación de mezcla y líneas de corriente en el dominio D3

Recurriendo al dominio D3, donde se muestran más detalles respecto a la distribución de la relación de mezcla (aproximadamente 2 km de resolución), se observan en las Figuras 20 y 21 que son para las 18:00 UTC y 21:00 UTC, respectivamente y a nivel de superficie, que sobre la zona de Huancán se tiene una relación de mezcla que fluctúa entre 6 a 8 g/kg. Bajo estas condiciones a nivel de superficie se nota que el viento fluye siguiendo la topografía, pero se puede rescatar que tanto a las 18:00 UTC y 21:00 UTC, justamente sobre la ubicación del distrito de Huancán se observa una configuración que presenta confluencia de vientos del noreste y sureste y difluencia hacia noroeste y sureste. Por estas características se puede deducir que de alguna forma a nivel de superficie las condiciones atmosféricas estarían siendo favorables para los movimientos convectivos, que este caso sería casi a nivel local. Así mismo es de rescatar que las zonas de mayor contenido de vapor de agua se encuentran hacia el noreste del distrito de Huancán y las zonas con menor contenido de vapor de agua a nivel de superficie se encuentra en las partes más altas ubicadas al oeste de la zona de estudio, donde la relación de mezcla presentó valores menores a 6 g/kg.

Superficie – Relacion de mezcla ^{18 UTC} (g/kg) y lineas de corriente

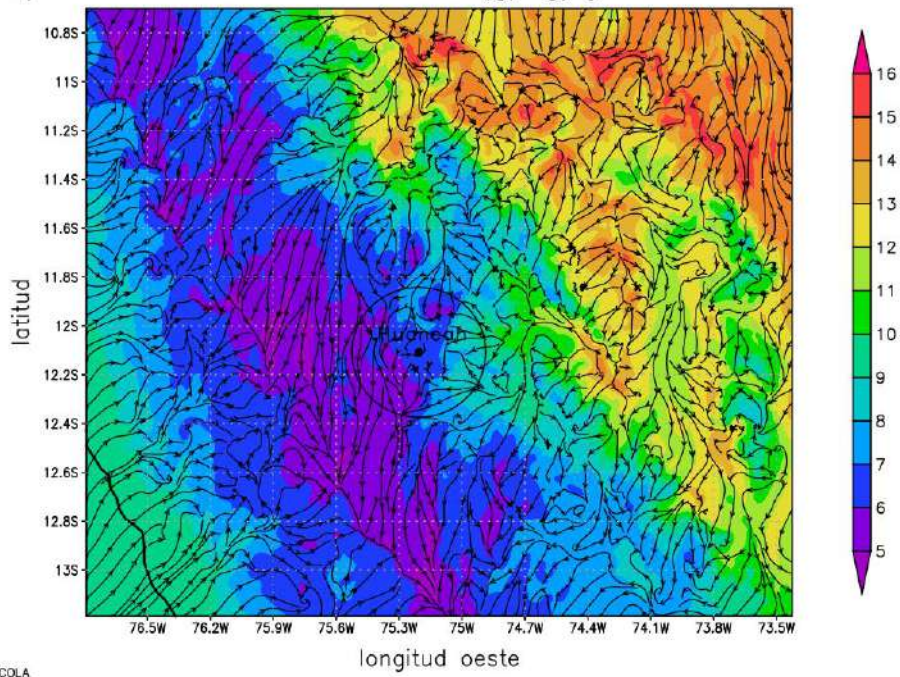


Figura 20: Relación de mezcla (g/kg) y líneas de corriente en superficie para dominio D3 para las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019

Superficie – Relacion de mezcla ^{21 UTC} (g/kg) y lineas de corriente

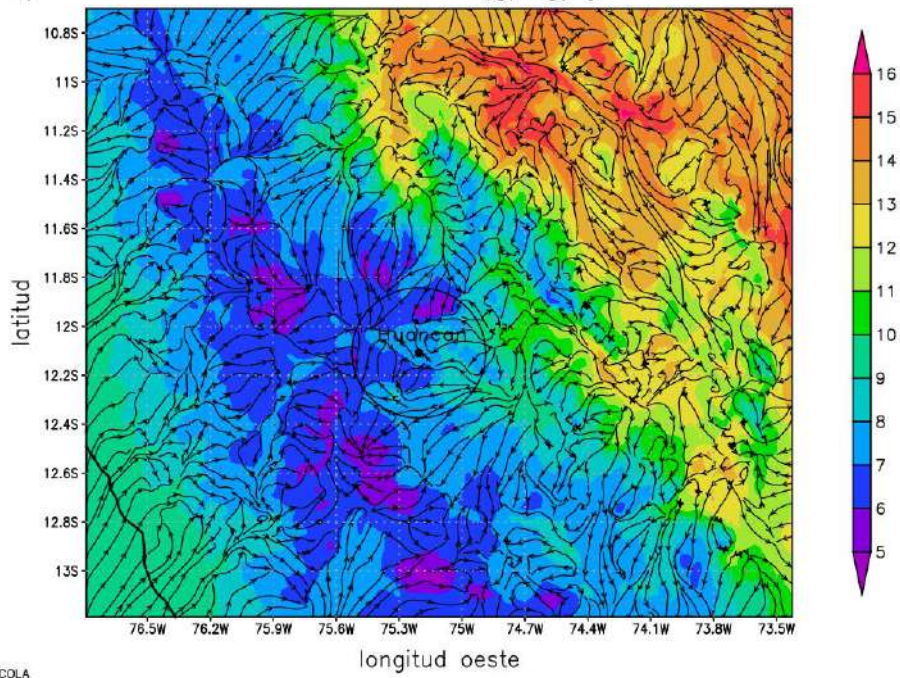


Figura 21: Relación de mezcla (g/kg) y líneas de corriente en superficie para dominio D3 para las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019

500 hPa – Relación de mezcla (g/kg) y líneas de corriente ^{18 UTC}

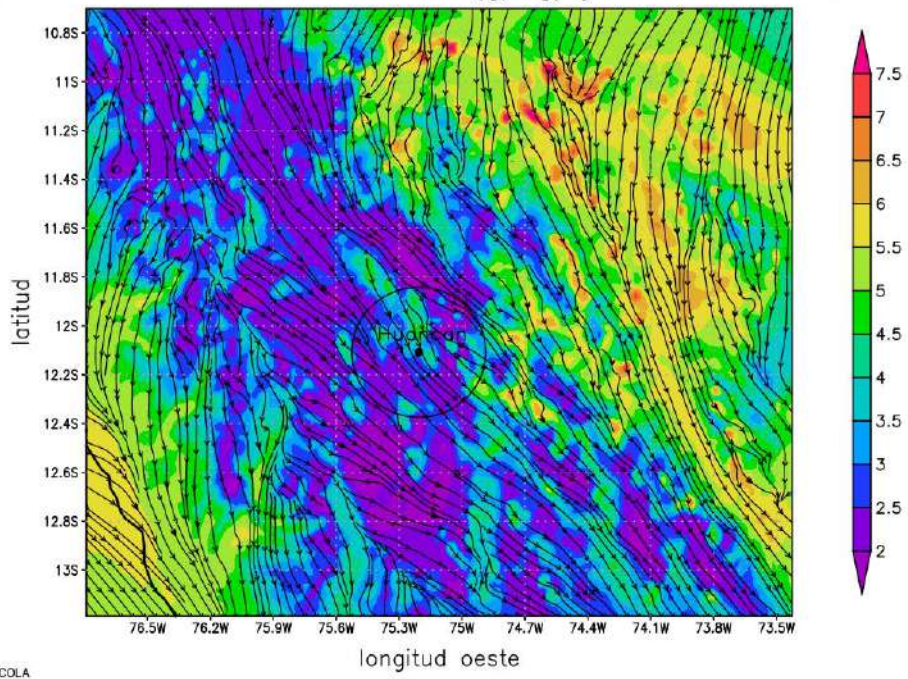


Figura 22: Relación de mezcla (g/kg) y líneas de corriente en 500 hPa para dominio D3 para las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019

500 hPa – Relación de mezcla (g/kg) y líneas de corriente ^{21 UTC}

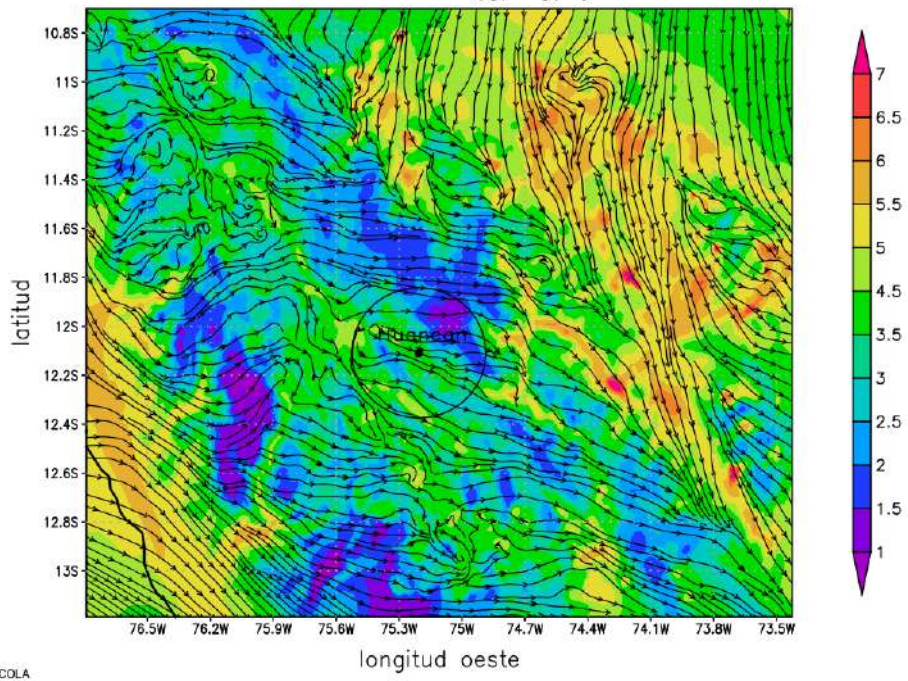


Figura 23: Relación de mezcla (g/kg) y líneas de corriente en 500 hPa para dominio D3 para las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019

En las Figuras 22 y 23 se muestran los detalles de la distribución de humedad atmosférica en el nivel de 500 hPa para las 18:00 UTC y 21:00 UTC, respectivamente, de las cuales se puede apreciar que el contenido de humedad en forma muy general y sobre todo en los alrededores del distrito de Huancán es ligeramente menor a las 18:00 UTC en comparación con las 21:00 UTC. Esto sería explicado que desde las 18:00 UTC hasta las 21:00 UTC (hora del evento de granizo) hubo advección de humedad desde el noreste desde las 18:00 UTC favoreciendo la acumulación de vapor de agua y en consecuencia una condición propicia para la formación de nubes. También se observa, que el flujo principal del viento a las 18:00 UTC a este nivel es del noroeste, en tanto que a las 21:00 UTC es más perturbado, cuya dirección es más cambiante. Por otro lado, a las 21:00 UTC se ubican mayores valores de relación de mezcla al noroeste de Huancán con valores entre 4.5 a 6 g/kg, el cual favorecería el aumento de humedad en los alrededores de la zona de estudio.

4.1.2 Análisis de la vorticidad relativa

a. Vorticidad relativa y líneas de corriente en el dominio D1

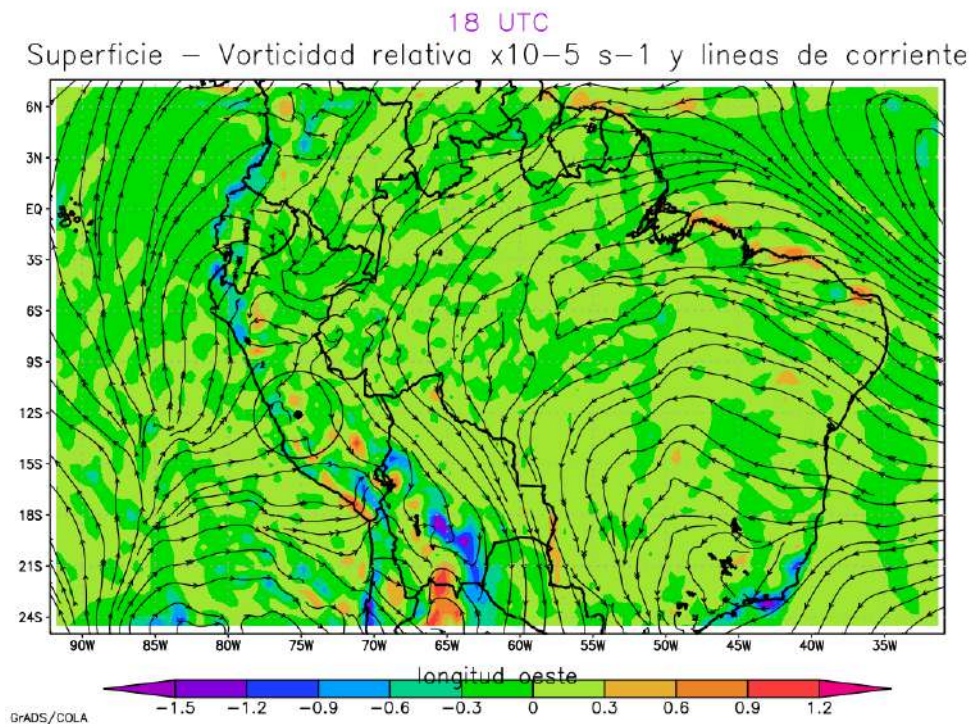


Figura 24: Vorticidad relativa ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en superficie para dominio D1 para las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019

En la Figura 24 se presenta la vorticidad relativa a nivel de superficie para las 18:00 UTC del día del evento y a escala sinóptica (D1). Para la cuantificación de esta variable se usó la

ecuación (8), que en el WRF la función es *hcurl*. En ella se observa que predomina la vorticidad negativa y hacia la zona de estudio existe advección de vorticidad ciclónica, aunque sus valores no son elevados. En cambio, en la Figura 25 que corresponde a las 21:00 UTC, se puede decir que hay predominancia de vorticidad positiva (anticiclónica), pero al noroeste del área de interés se tienen focos de vorticidad ciclónica la misma que estaría asociado a movimientos verticales ascendentes.

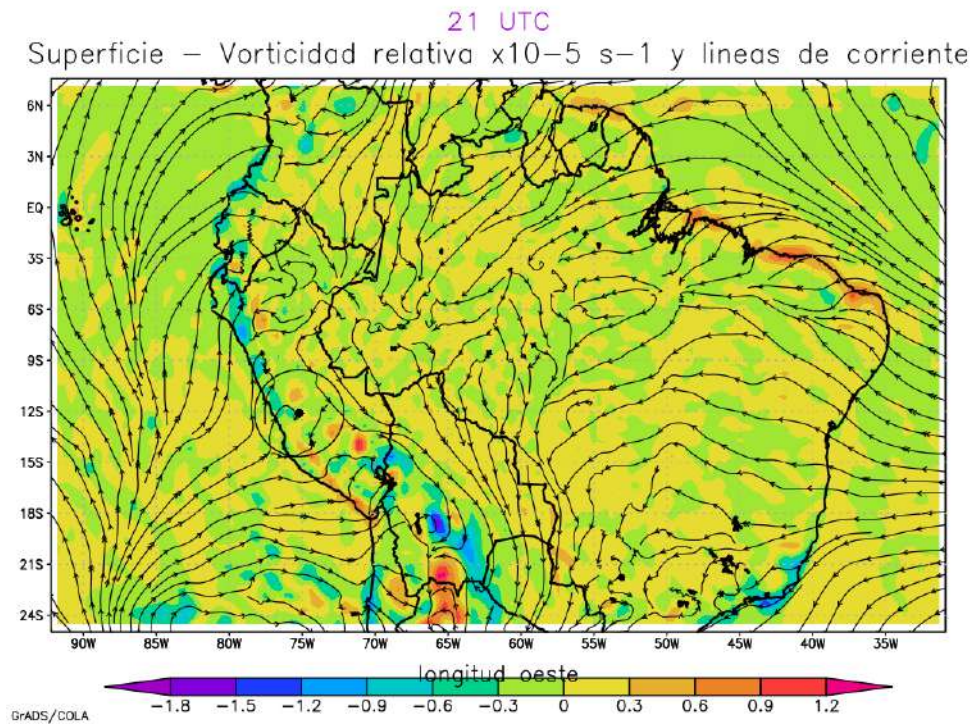


Figura 25: Vorticidad relativa ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en superficie para dominio D1 para las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019

Cuando vamos a niveles medios de la atmósfera (500 hPa), los cuales se muestran en las Figuras 26 y 27, la característica principal tanto a las 18:00 UTC y 21:00 UTC es que predomina la circulación anticiclónica sobre el área de interés y observando lo referente a la vorticidad relativa en ambos instantes se tiene predominantemente vorticidad anticiclónica con valores que alcanzan hasta $0.6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. Sin embargo, existen focos de vorticidad ciclónica con valores de hasta $-0.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, en los lugares muy cercanos al oeste y noroeste del distrito de Huancán. También los flujos de viento muestran a este nivel la existencia de una cuña que pasa sobre la zona de interés con orientación del ESE (este-sur-este) hacia WNW (oeste-nor-oeste), pero sobre océano, se observa una vaguada bien definida con eje de orientación SE (sur-este) a NW (nor-oeste) y que actúa como una especie de “bloqueo” a los flujos provenientes del llano amazónico.

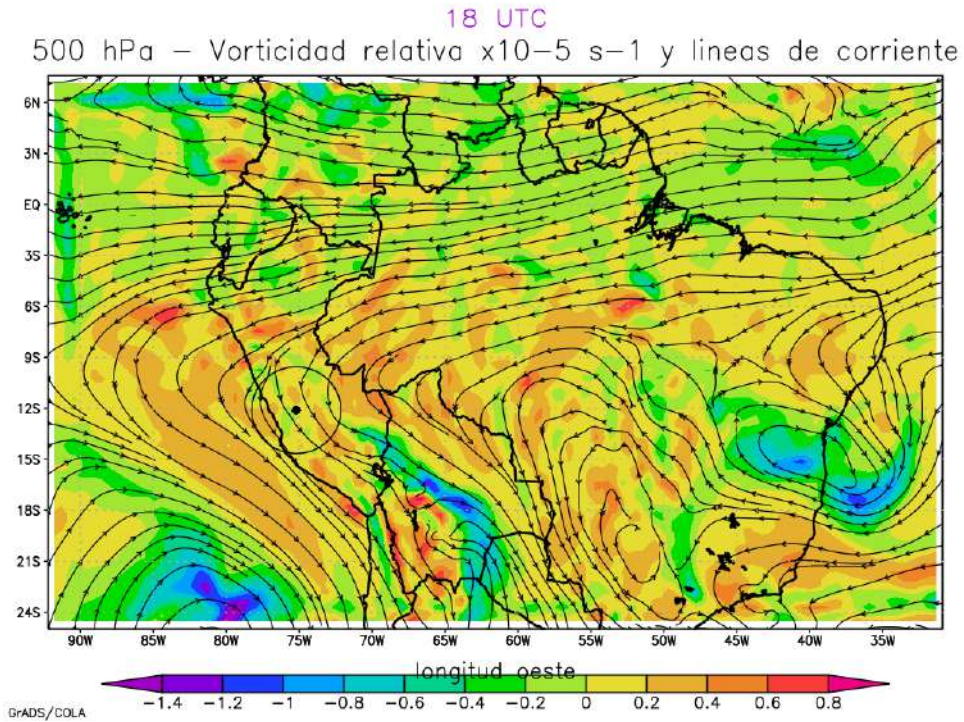


Figura 26: Vorticidad relativa ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en 500 hPa para dominio D1 para las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019

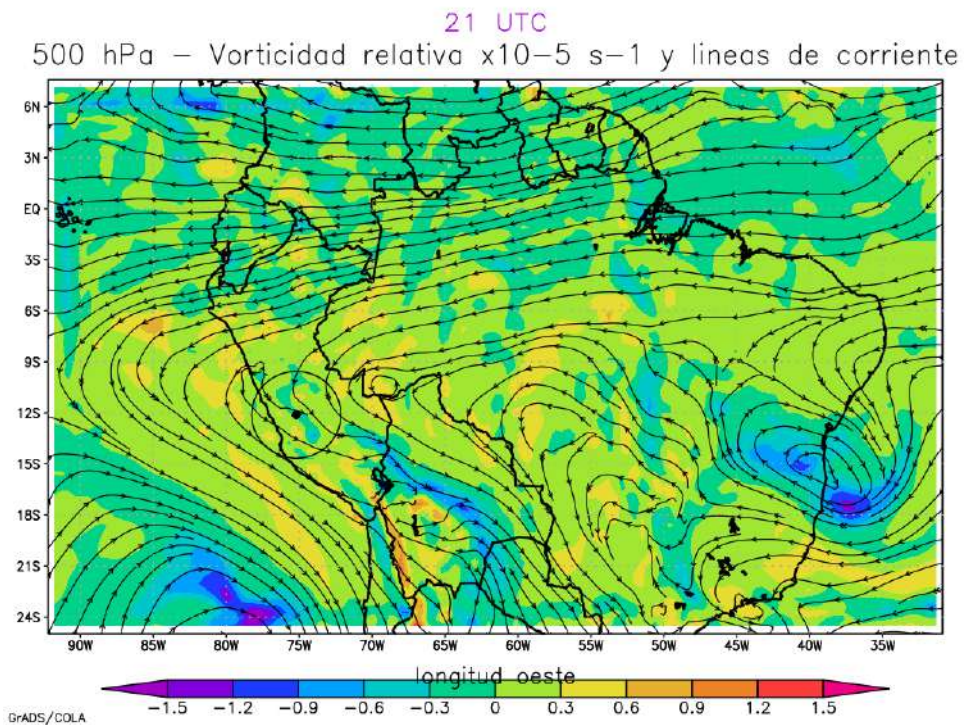


Figura 27: Vorticidad relativa ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en 500 hPa para dominio D1 para las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019

La vorticidad relativa en niveles altos (300 hPa) y a las 18:00 UTC mostrado en la Figura 28, se observa claramente sobre la región de estudio una predominancia de vorticidad positiva con valores de hasta $1.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. Sin embargo, se debe hacer notar que al oeste hay una vaguada asociada a una vorticidad ciclónica con valor de $-0.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ que por advección llegaría hacia Huancán. Así mismo hacia el sur de la latitud 24°S (límite por el sur del dominio D1) y entre 80°W y 85°W , se ubica el eje de una vaguada con vorticidad relativa de $-2.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, en cambio al norte de Huancán se ubica una cuña con eje que atraviesa las regiones de La Libertad, Ancash y Huánuco con valores de vorticidad relativa de $0.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$.

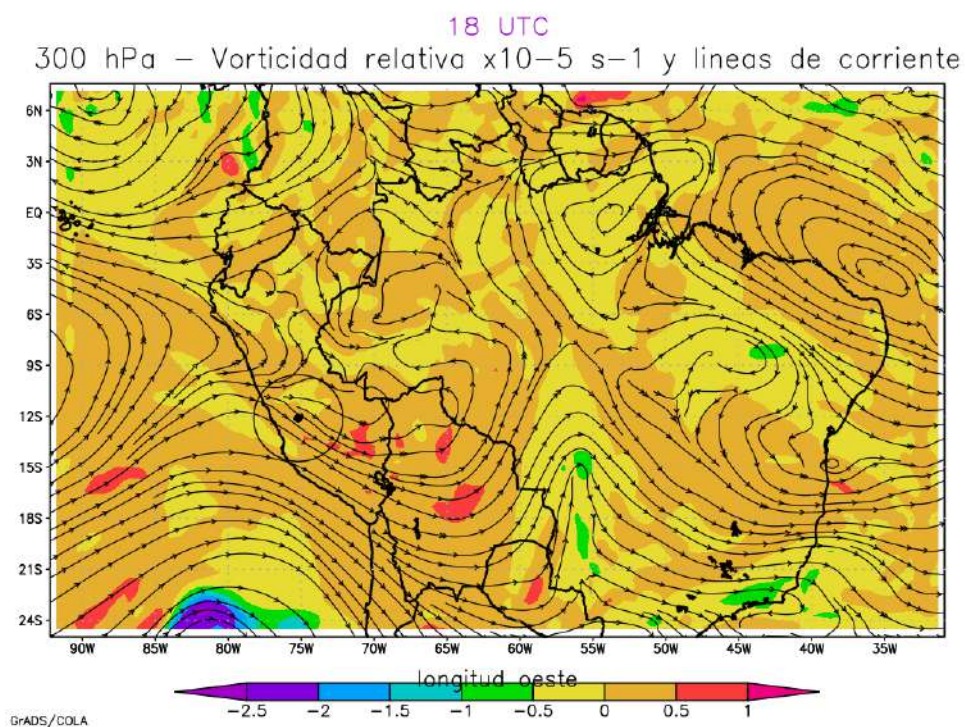


Figura 28: Vorticidad relativa ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en 300 hPa para dominio D1 para las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019

Analizando la Figura 29, que corresponde a las 21:00 UTC, se tiene características un poco diferentes que, a las 18:00 UTC, ya que a esta hora se tiene ligera predominancia sobre el dominio una vorticidad ciclónica, resaltando que al oeste del área de interés se tienen valores de vorticidad relativa de hasta $-1.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$.

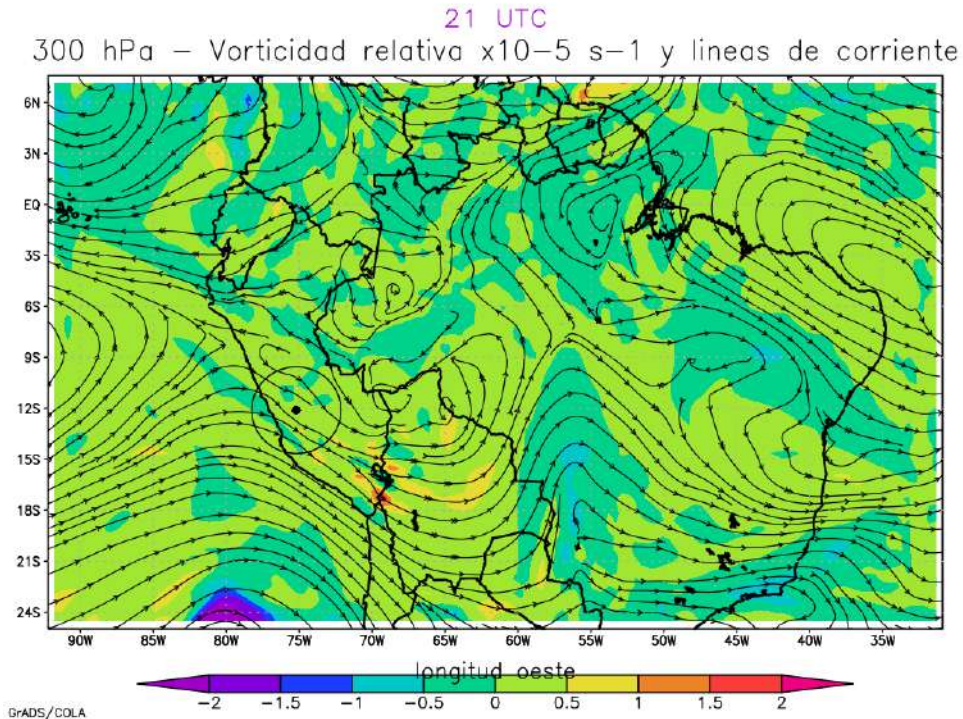


Figura 29: Vorticidad relativa ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en 300 hPa para dominio D1 para las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019

b. Vorticidad relativa y líneas de corriente en el dominio D2

A escala regional caracterizados por las Figuras obtenidas en el dominio D2, en general ratifican las mencionadas para el dominio D1, con algunos detalles adicionales. Es así que en las Figuras 30 y 31 (que es a nivel de superficie), para las 18:00 UTC y 21:00 UTC, respectivamente, lo rescatable es que predomina la vorticidad ciclónica con valores de hasta $-4.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$.

Analizando el nivel de 500 hPa, en la Figura 32, se nota que la vorticidad relativa predominante es ciclónica y en la Figura 33 predomina la vorticidad anticiclónica, con algunos lugares casi localizados donde hay vorticidad negativa, las mismas que están ubicados al oeste de Huancán. De estas configuraciones se puede decir que antes de la ocurrencia del evento del granizo (18:00 UTC) las condiciones eran favorables para la formación de nubosidad de alguna forma convectiva, pero en el momento de la ocurrencia (21:00 UTC), la advección de vorticidad anticiclónica hace que las condiciones atmosféricas posterior al evento sean más estables y el estado del tiempo mejor.

18 UTC
Superficie – Vorticidad relativa $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ y líneas de corriente

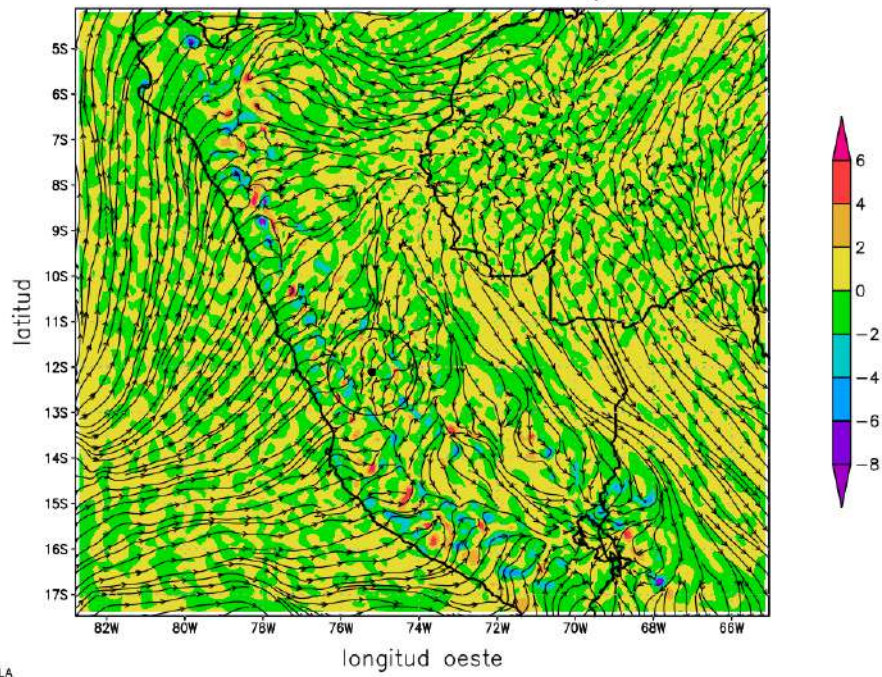


Figura 30: Vorticidad relativa ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en superficie para dominio D2 para las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019

21 UTC
Superficie – Vorticidad relativa $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ y líneas de corriente

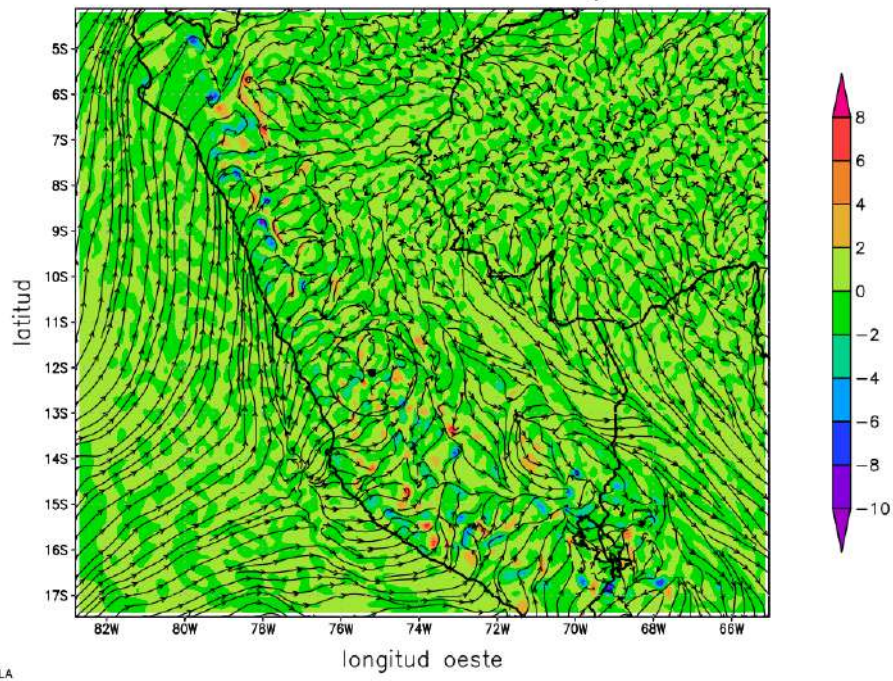


Figura 31: Vorticidad relativa ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en superficie para dominio D2 para las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019

18 UTC
500 hPa – Vorticidad relativa $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ y líneas de corriente

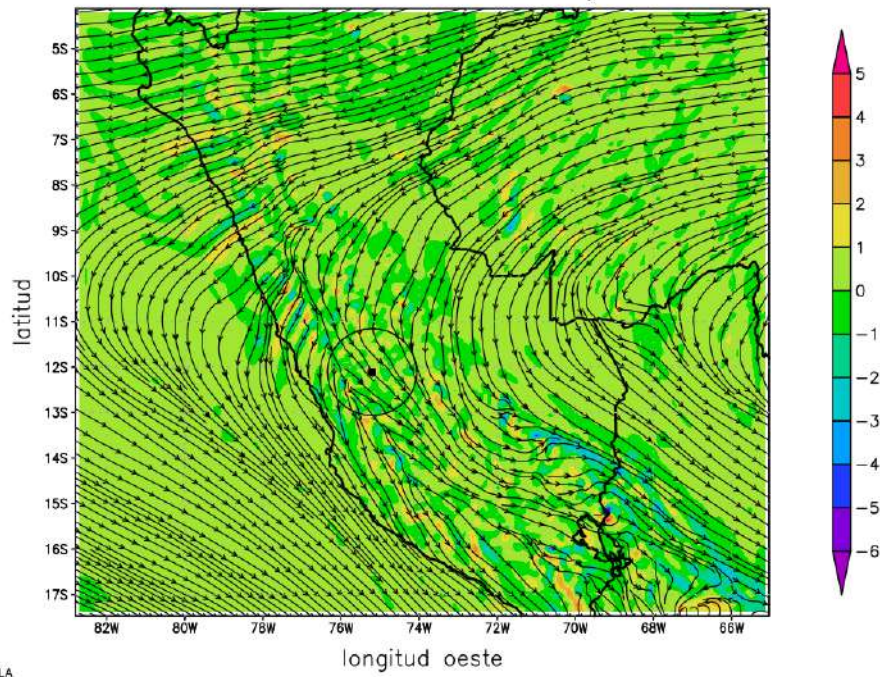


Figura 32: Vorticidad relativa ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en 500 hPa para dominio D2 para las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019

21 UTC
500 hPa – Vorticidad relativa $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ y líneas de corriente

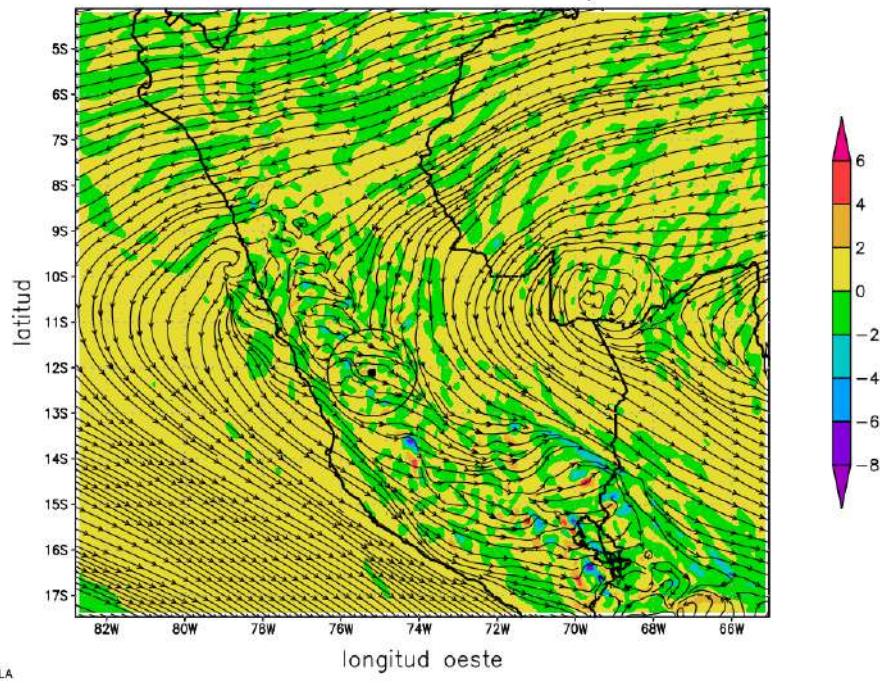


Figura 33: Vorticidad relativa ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en 500 hPa para dominio D2 para las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019

c. Vorticidad relativa y líneas de corriente en el dominio D3

La Figura 34, muestra la distribución de la vorticidad relativa a escala cuasi local o a mayor resolución a nivel de superficie para la 18:00 UTC. Esta característica es antes que ocurra el evento, en el que se visualiza en forma general la existencia de vorticidad ciclónica y en las proximidades de Huancán se tienen valores de hasta $-10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$.

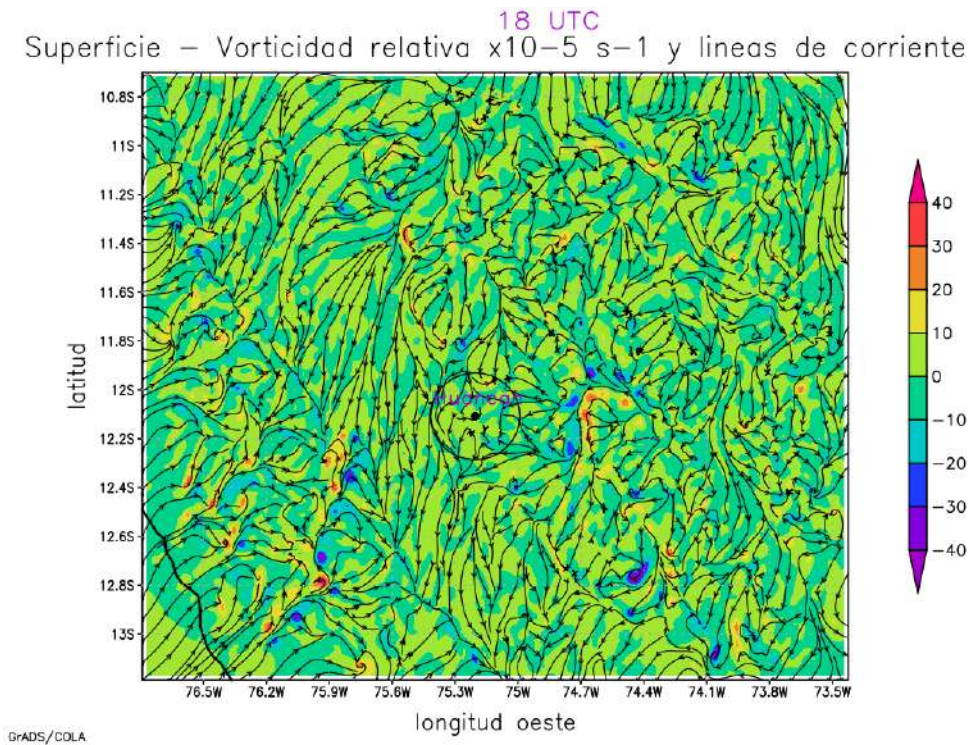


Figura 34: Vorticidad relativa ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en superficie para dominio D3 para las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019

Para la hora del evento que son las 21:00 UTC, a nivel de superficie la vorticidad relativa presenta valores similares que a las 18:00 UTC. No se observan patrones definidos, sin embargo, sobre la zona de estudio hay una vorticidad de $-10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. Esta característica está presentada en la Figura 35. Por lo explicado, a nivel de superficie antes y de la hora de ocurrencia del evento, la vorticidad relativa no presenta patrones muy definidos lo que también estaría indicando que esta variable a nivel de superficie no refleja claramente la rotación del viento, ya que como se mencionó anteriormente el viento sigue el relieve topográfico y el cambio de dirección y velocidad se ve afectado fuertemente por los efectos mecánicos y térmicos de la superficie sobre el cual se desplaza.

21 UTC
Superficie – Vorticidad relativa $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ y líneas de corriente

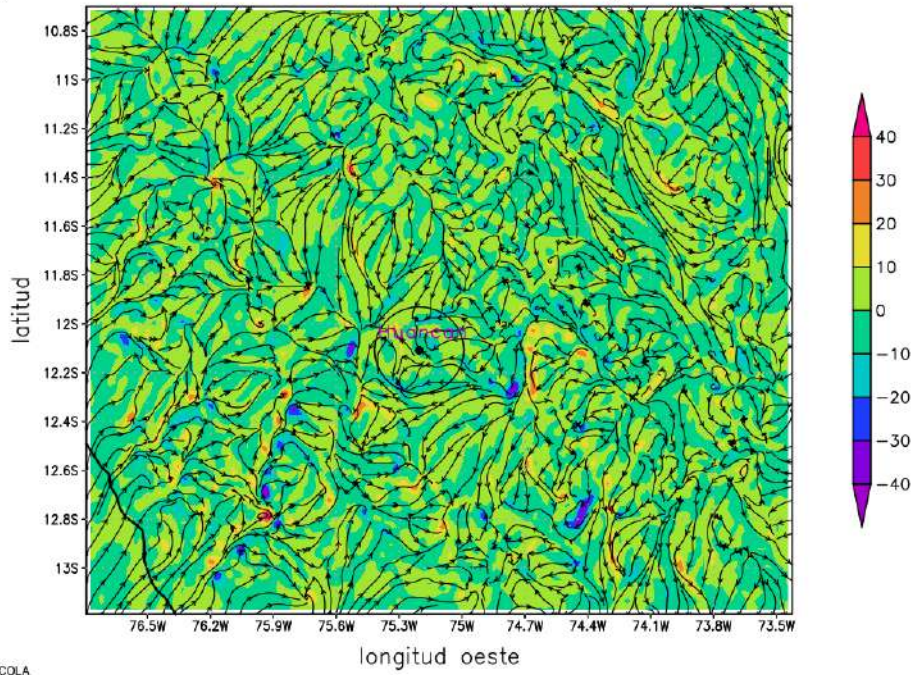


Figura 35: Vorticidad relativa ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en superficie para dominio D3 para las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019

18 UTC
500 hPa – Vorticidad relativa $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ y líneas de corriente

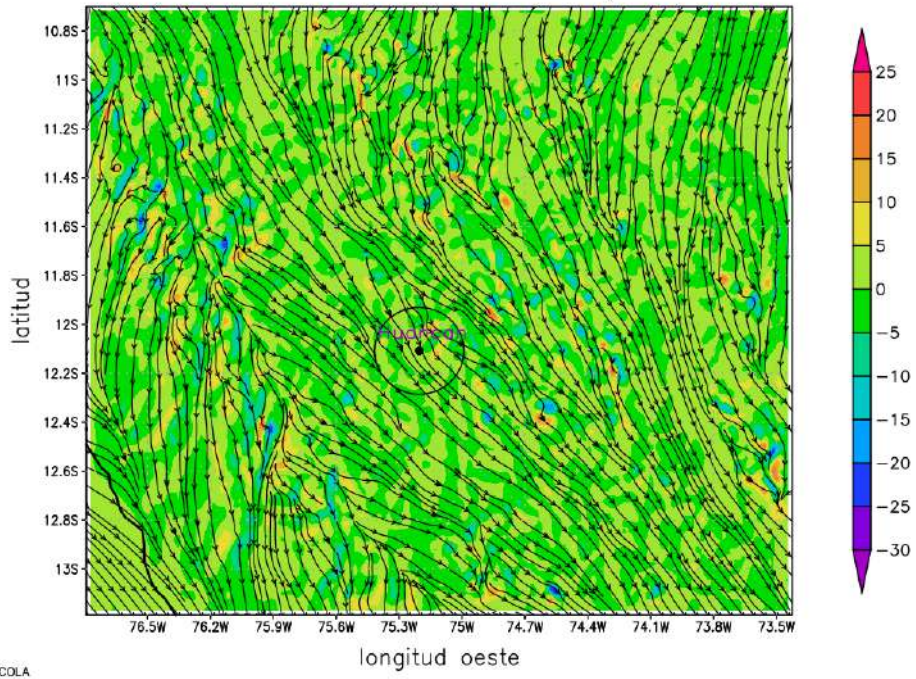


Figura 36: Vorticidad relativa ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente a 500 hPa para dominio D3 para las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019

21 UTC
500 hPa – Vorticidad relativa $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ y líneas de corriente

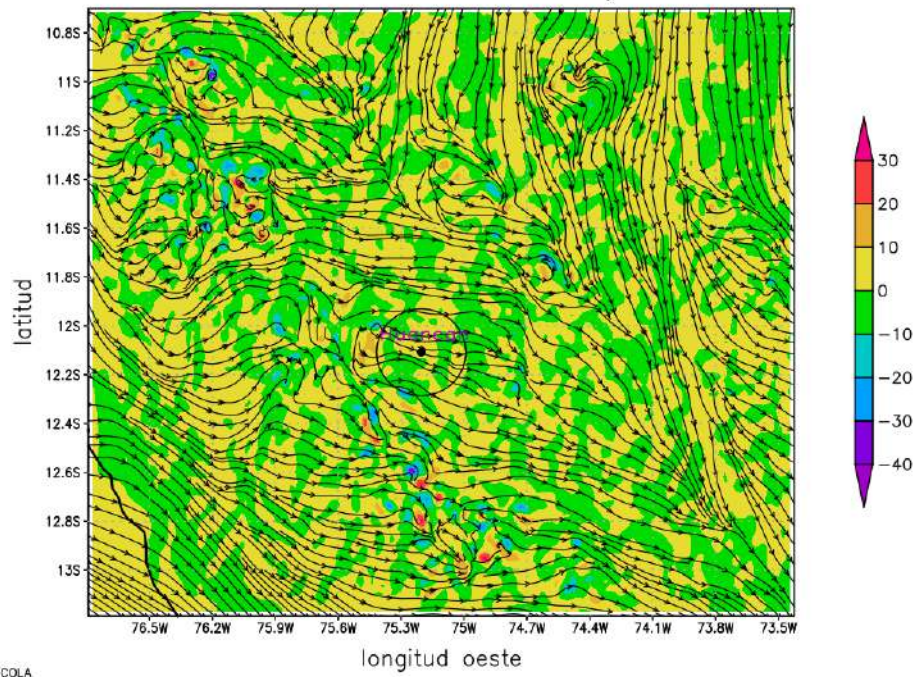


Figura 37: Vorticidad relativa ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente a 500 hPa para dominio D3 para las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019

En 500 hPa, a las 18:00 UTC, antes de la ocurrencia del evento, se ve en la Figura 36, que hay vorticidad ciclónica y por lo tanto advección de vorticidad ciclónica hacia la zona de interés, el cual corrobora lo encontrado a escala regional (dominio D2) por lo que se deduce que esta condición estaría contribuyendo que momentos más tarde para una condición favorable para la existencia de convección. Esto asociado a la advección de humedad, sería un desencadenante para la formación de nubes.

En cambio, en la Figura 37 que corresponde también a 500 hPa, pero para las 21:00 UTC, no se nota claramente predominancia de vorticidad anticiclónica o ciclónica en todo el dominio, sin embargo en el lado adyacente al noroeste de Huancán, se tienen núcleos de vorticidad relativa que alcanzan valores de hasta $10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, el cual también puede ser un contribuyente para la inestabilidad atmosférica sobre el distrito de Huancán.

En la tropósfera alta, en el nivel de 300 hPa, caracterizados por las Figuras 38 y 39 que corresponden a las 18:00 UTC y 21:00 UTC, respectivamente, se aprecian principalmente en todo el dominio advección de vorticidad ciclónica. Haciendo referencia a la zona de estudio, ésta está expuesta a advección de vorticidad ciclónica.

18 UTC
300 hPa – Vorticidad relativa $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ y líneas de corriente

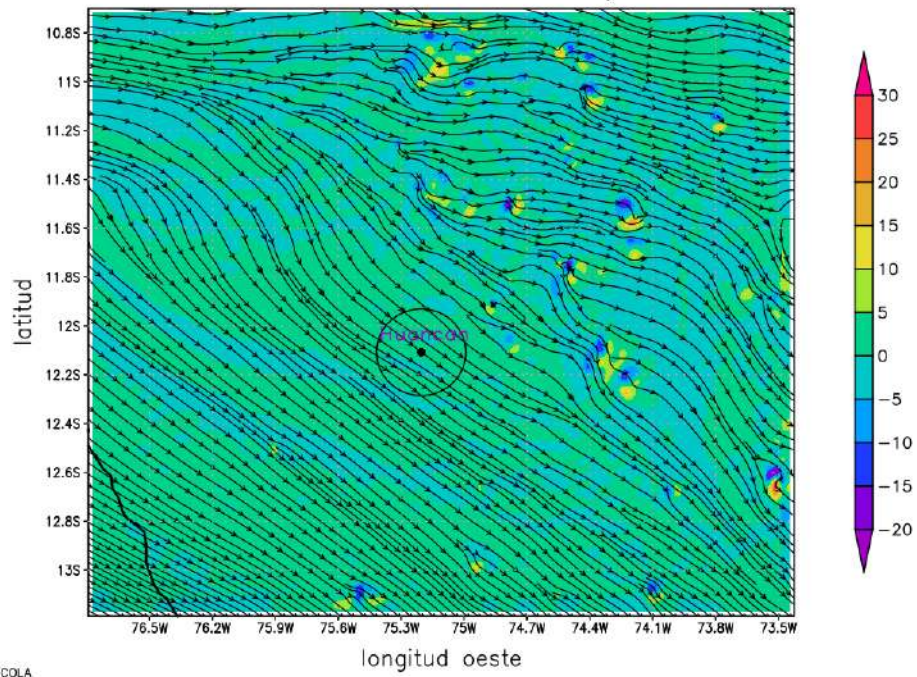


Figura 38: Vorticidad relativa ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente a 300 hPa para dominio D3 para las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019

21 UTC
300 hPa – Vorticidad relativa $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ y líneas de corriente

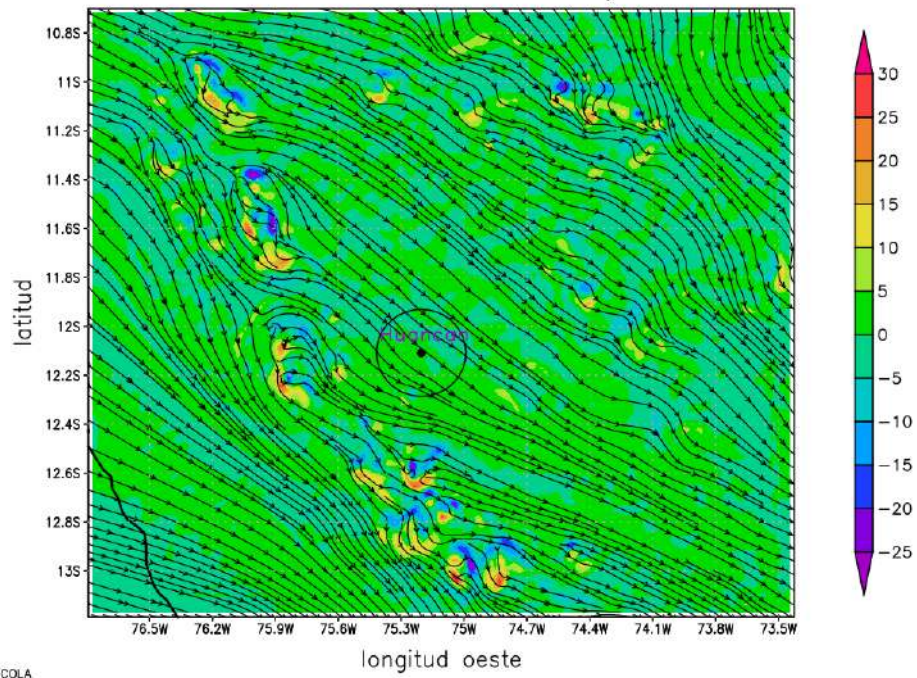


Figura 39: Vorticidad relativa ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente a 300 hPa para dominio D3 para las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019

4.1.3 Análisis de la Divergencia

a. Divergencia horizontal y líneas de corriente en el dominio D1

Para el cálculo de este parámetro, se usó la ecuación (5) y en la Figura 40, se presenta la divergencia horizontal a nivel de superficie para las 18:00 UTC, notándose que no hay un patrón definido de predominancia de divergencia o convergencia. Sin embargo, se puede notar que la zona de estudio está asociada a divergencia negativa y es más significativo hacia oeste, específicamente a lo largo de la cordillera de los andes.

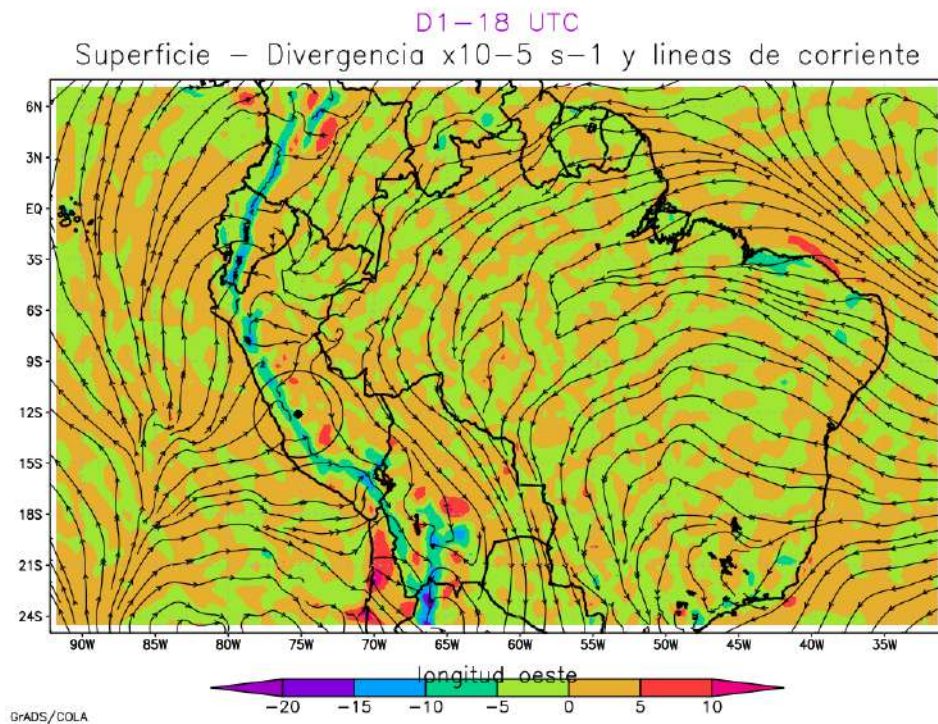


Figura 40: Divergencia horizontal ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en superficie para dominio D1 a las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019

Para las 21:00 UTC, el cual se presenta en la Figura 41, se puede decir en forma general en el dominio D1 (que es a escala sinóptica) y a nivel de superficie predomina la convergencia (divergencia negativa), lo que significa que la atmósfera estaría más propicio a movimientos verticales ascendentes. Se debe mencionar que hay concordancia con lo encontrado en el análisis vorticidad, que para la zona de estudio había advección de vorticidad ciclónica, que también está asociado a movimientos verticales ascendentes. Así mismo a lo largo de la cordillera de los andes se nota valores de divergencia negativa, lo que indica que en las

cumbres predomina la convección, la misma que se puede visualizar con la confluencia de los vientos.

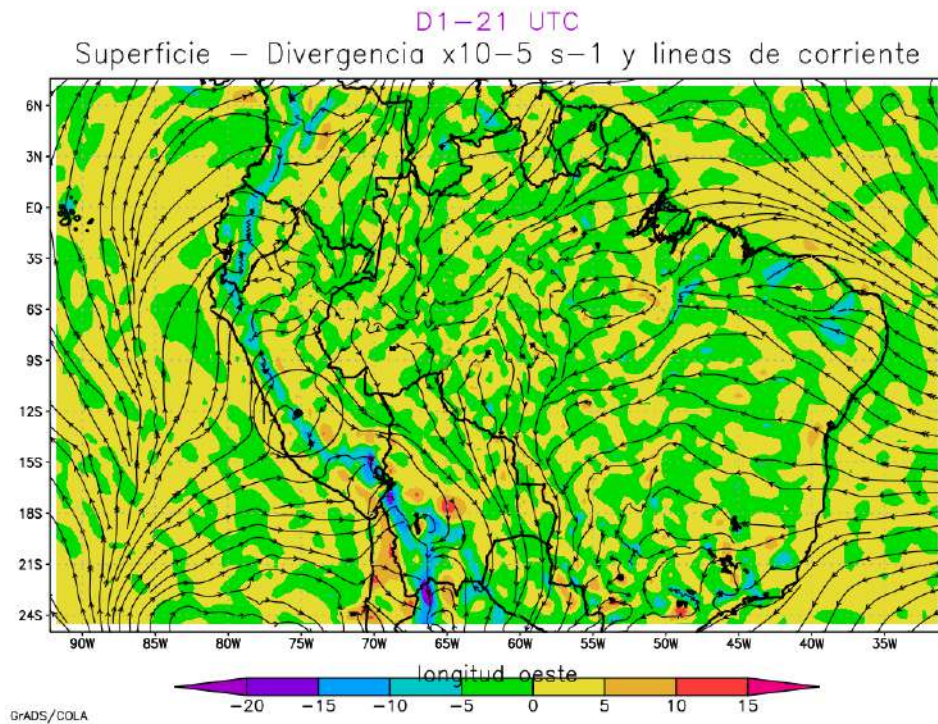


Figura 41: Divergencia horizontal ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en superficie para dominio D1 a las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019

Prosiguiendo con el análisis a escala sinóptica (dominio D1), ahora en el nivel de 300 hPa y a las 18:00 UTC, presentada en la Figura 42, se nota claramente sobre la región de estudio ubicada en la sierra central del Perú, valores de divergencia entre 2×10^{-5} a $4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, condición que es favorable para la ventilación y consecuentemente la convección desde niveles inferiores. También a la hora de ocurrencia del evento de granizo, mostrada en la Figura 43, se observa divergencia positiva ligeramente al este de la cordillera de los andes, donde se ubica el distrito de Huancán. Similar que a las 18:00 UTC, en este caso los valores de divergencia sobre la región de estudio varían entre 2×10^{-5} a $4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. De acuerdo con estas características, en superficie predomina convergencia y en altura predomina divergencia, en consecuencia, las condiciones desde el punto de vista dinámico fueron propicias para la ocurrencia de movimientos verticales ascendentes y el cual se manifiesta (el cual estaría condicionado al contenido de vapor de agua significativo sobre la región) en formaciones nubosas de gran desarrollo vertical.

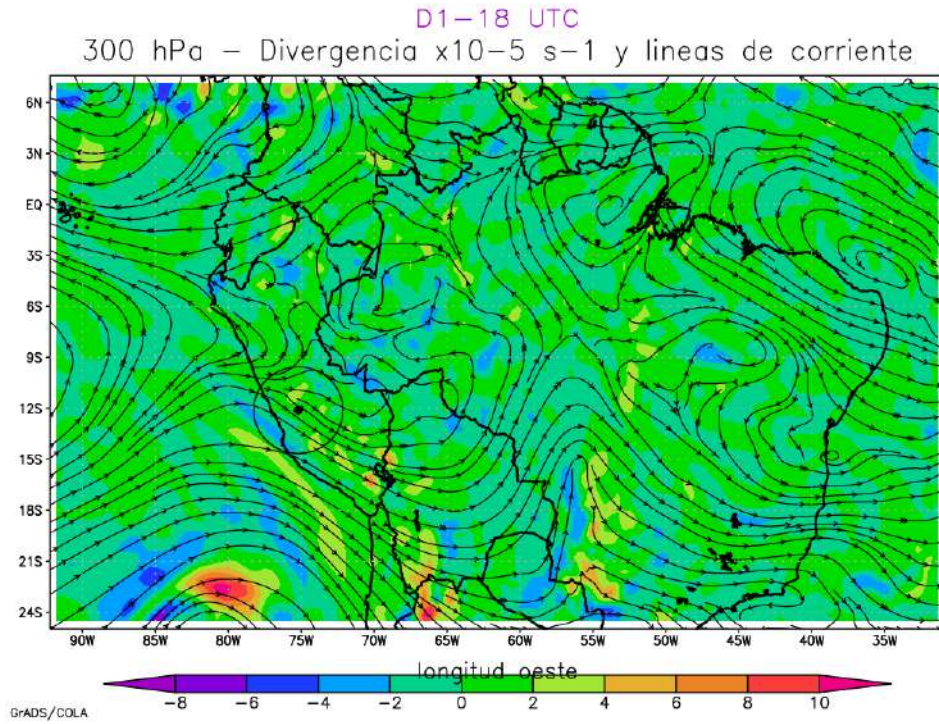


Figura 42: Divergencia horizontal ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en 300 hPa para dominio D1 a las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019

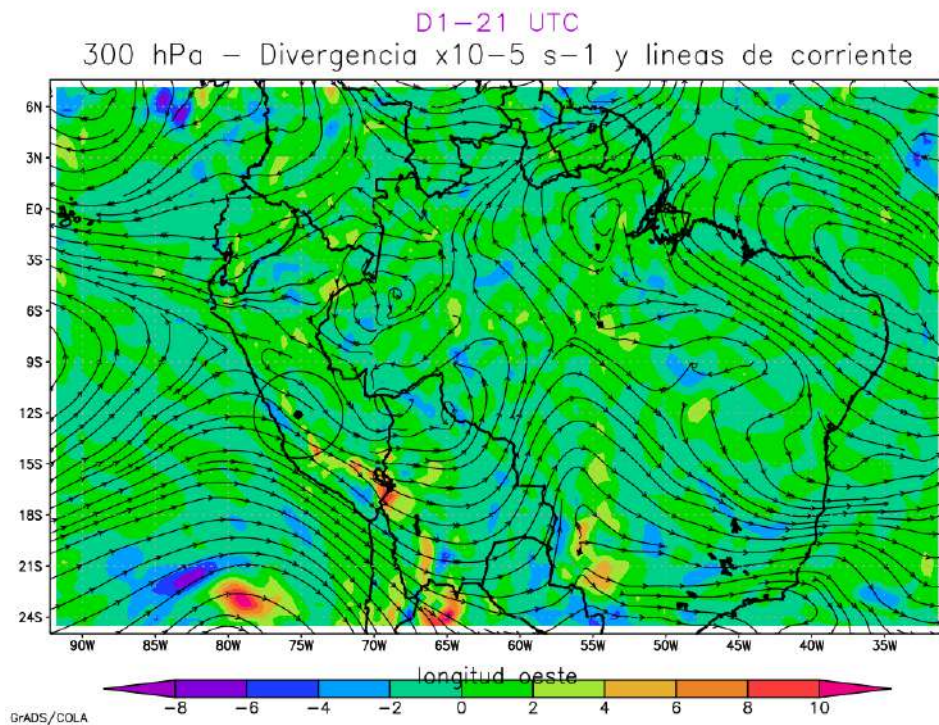


Figura 43: Divergencia horizontal ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en 300 hPa para dominio D1 a las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019

b. Divergencia horizontal y líneas de corriente en el dominio D2

En las Figuras 44 y 45 se presentan la divergencia horizontal a escala del dominio D2 (escala regional) a nivel de superficie para las 18:00 UTC y 21:00 UTC, respectivamente. De estas Figuras se rescata que los valores de divergencia sobre la zona de estudio en ambos casos varían entre 0 y $-20 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, vale decir que hay convergencia. Lo observado a escala sinóptica se ratifica a esta escala, pero con mayores detalles.

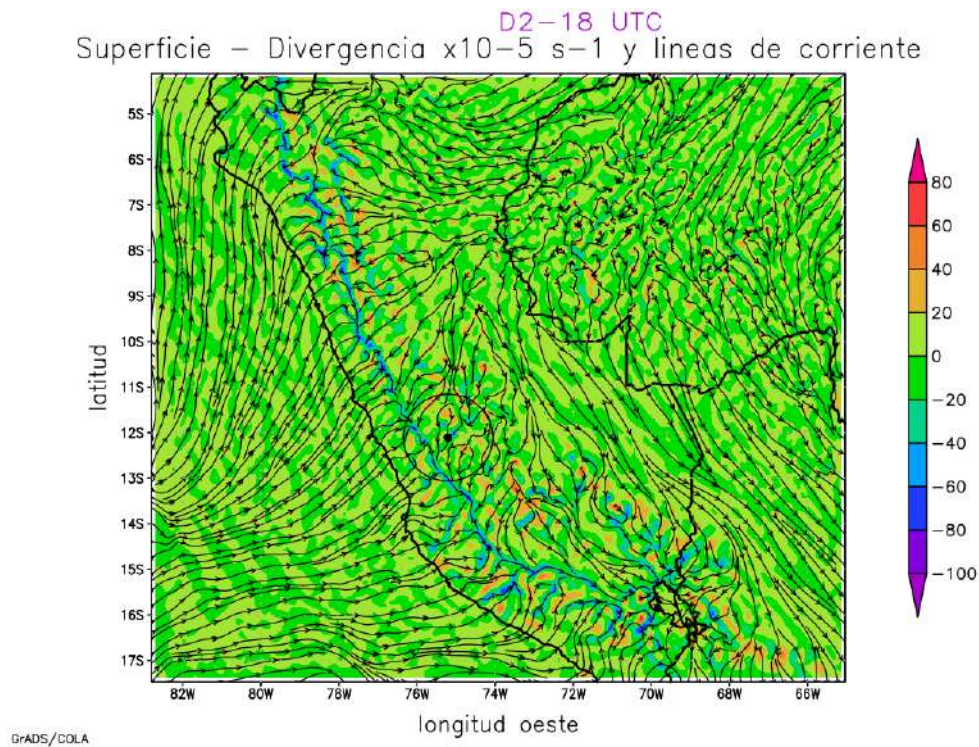


Figura 44: Divergencia horizontal ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en superficie para dominio D2 a las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019

A 500 hPa presentados en las Figuras 46 y 47, se nota que sobre la zona de estudio va predominando divergencia positiva, sobre todo a las 21:00 UTC; condición de la tropósfera media que estaría favoreciendo la ventilación, más aún ratificado con la divergencia en 300 hPa (Figuras 48 y 49) en la que sobre la región de estudio tanto a las 18:00 UTC y 21:00 UTC predomina la divergencia positiva. Al igual que en el dominio D1 a esta escala se detectó que a la hora de ocurrencia del evento en superficie se tiene convergencia y en niveles altos de la tropósfera sobre Huancán predomina la divergencia, el cual es favorable para la ventilación y la convección.

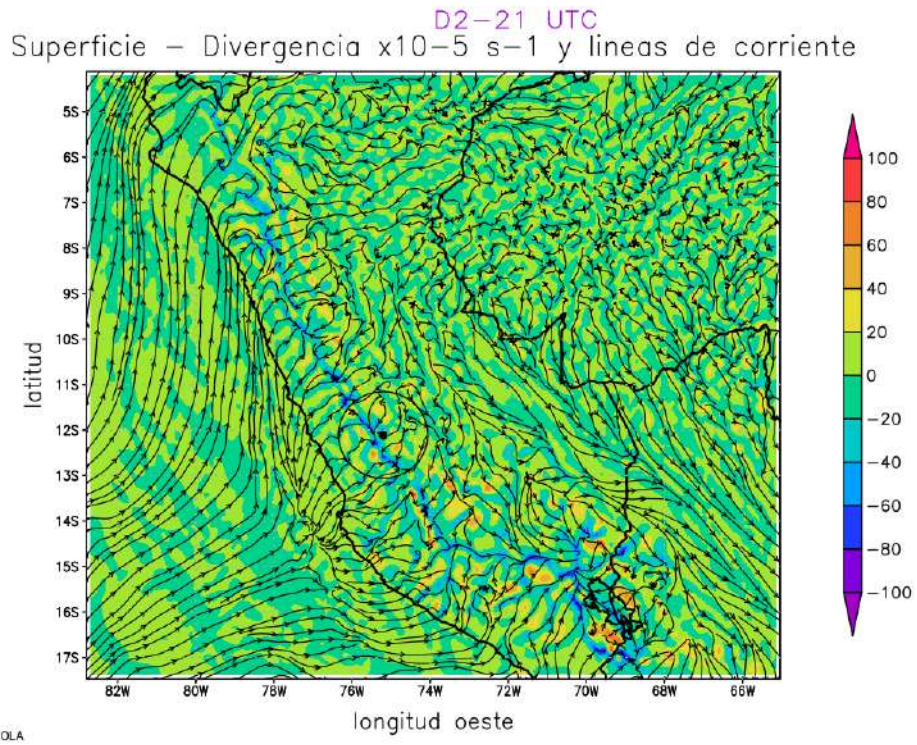


Figura 45: Divergencia horizontal ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en superficie para dominio D2 a las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019

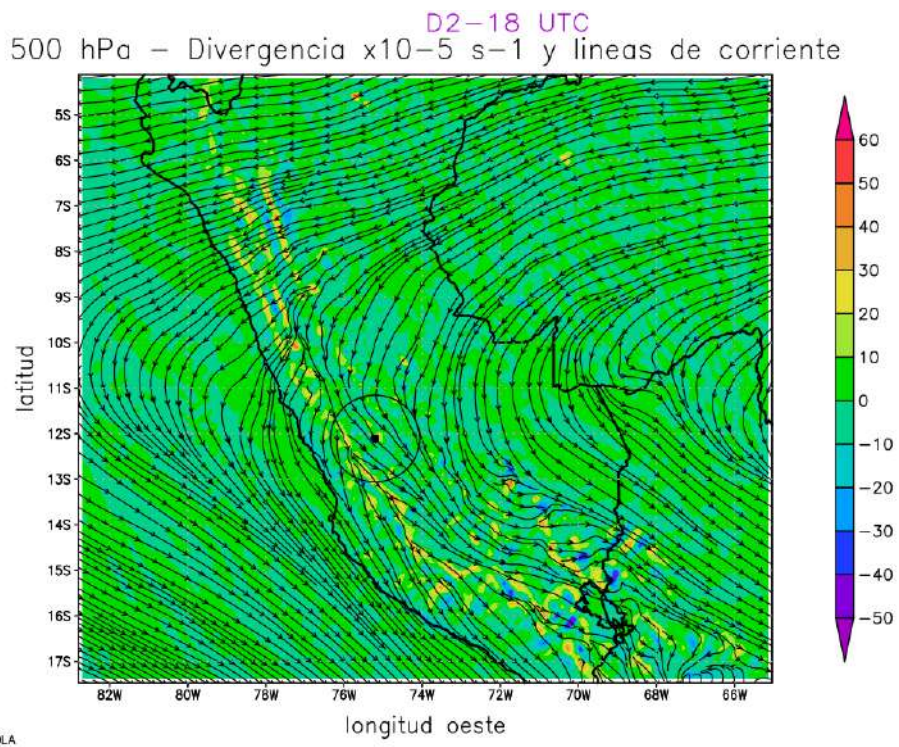


Figura 46: Divergencia horizontal ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en 500 hPa para dominio D2 a las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019

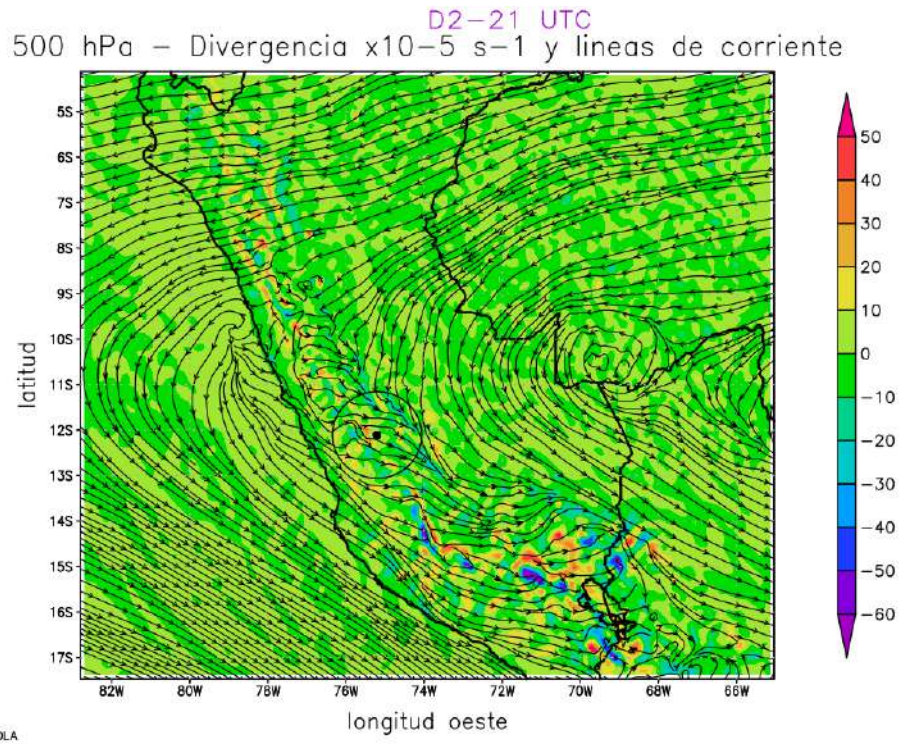


Figura 47: Divergencia horizontal ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en 500 hPa para dominio D2 a las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019

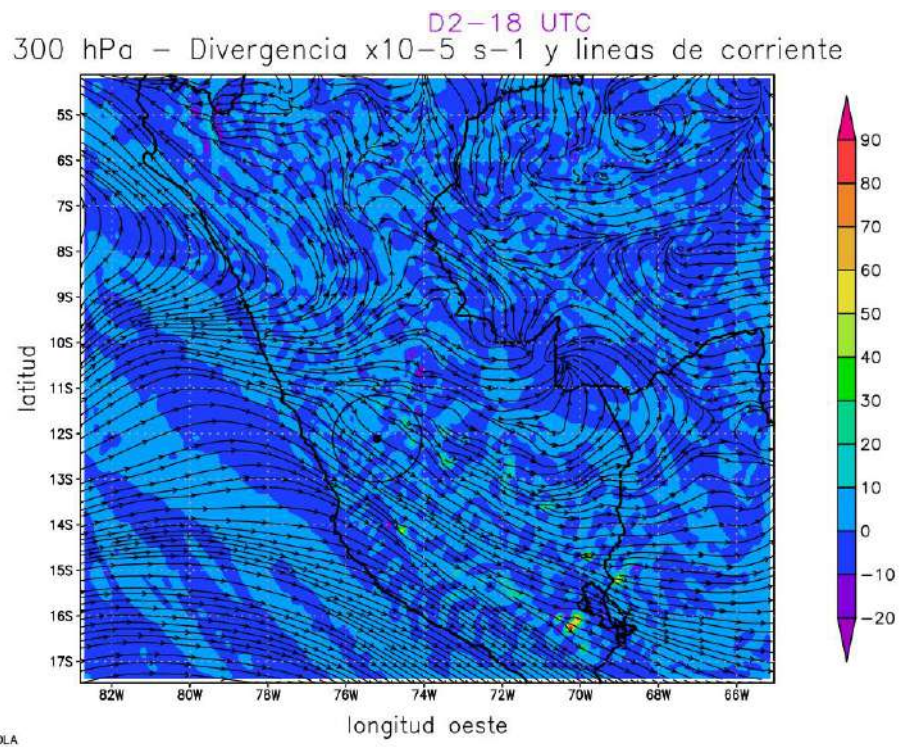


Figura 48: Divergencia horizontal ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en 300 hPa para dominio D2 a las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019

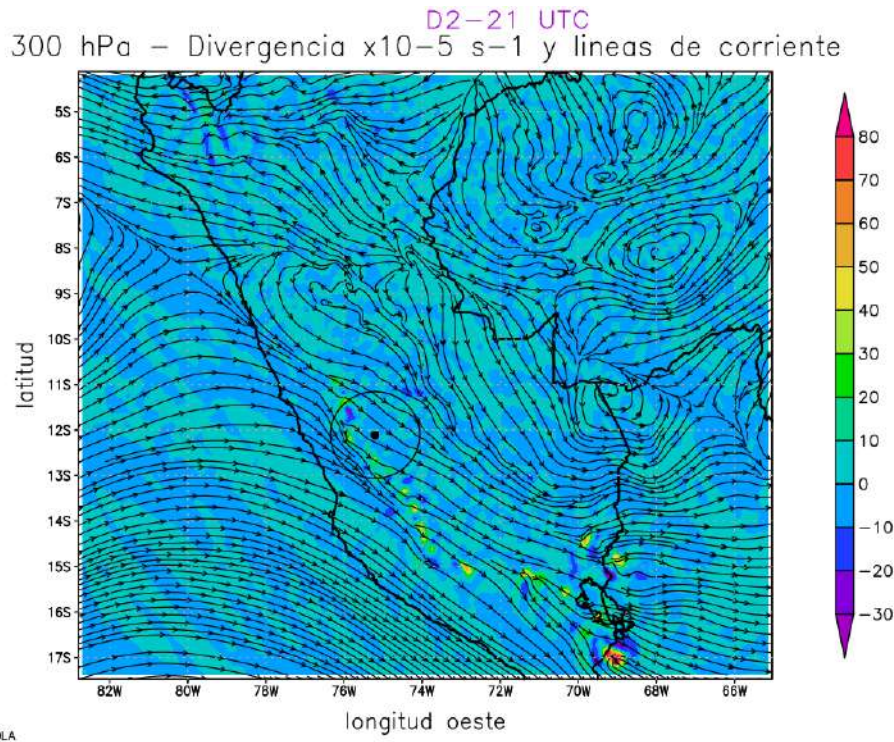


Figura 49: Divergencia horizontal ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en 300 hPa para dominio D2 a las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019

c. Divergencia horizontal y líneas de corriente en el dominio D3

A escala local donde se muestran más detalles, la situación no es muy clara sobre todo a nivel de superficie, ya que a las 18:00 UTC sobre la región de estudio hay ligera divergencia positiva (Figura 50), pero para las 21:00 UTC observado en la Figura 51, existen núcleos de convergencia (divergencia negativa). Sin embargo, se debe hacer notar que en ambos instantes ocurren convergencia en la divisoria de las diferentes cuencas dentro del dominio, ya que sobre esas zonas se nota muy claramente la confluencia de los vientos y como se trata de elevaciones, en los instantes considerados estarían asociados a vientos anabáticos o vientos de valle. En los niveles de 500 hPa y 300 hPa, a las 18:00 UTC y 21:00 UTC (antes y a la hora de ocurrencia del evento) se puede observar claramente campos de divergencia que alcanzan valores de hasta $10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, las mismas que pueden observarse en las Figuras 52, 53, 54 y 55. De estas características y haciendo referencia a los resultados de la vorticidad relativa se puede deducir que desde el punto de vista dinámico en esos instantes las condiciones atmosféricas de la tropósfera baja y alta sobre Huancán estuvieron favorables para los movimientos verticales ascendentes y asociado al contenido de humedad sobre la zona de estudio estaría siendo favorable para la formación de nubes.

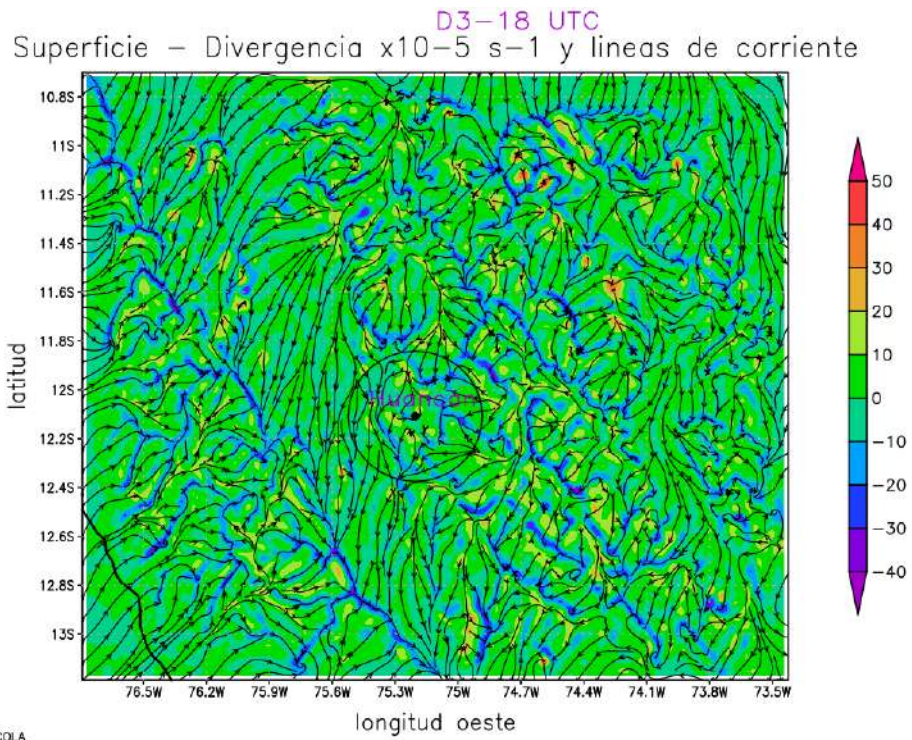


Figura 50: Divergencia horizontal ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en superficie para dominio D3 a las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019

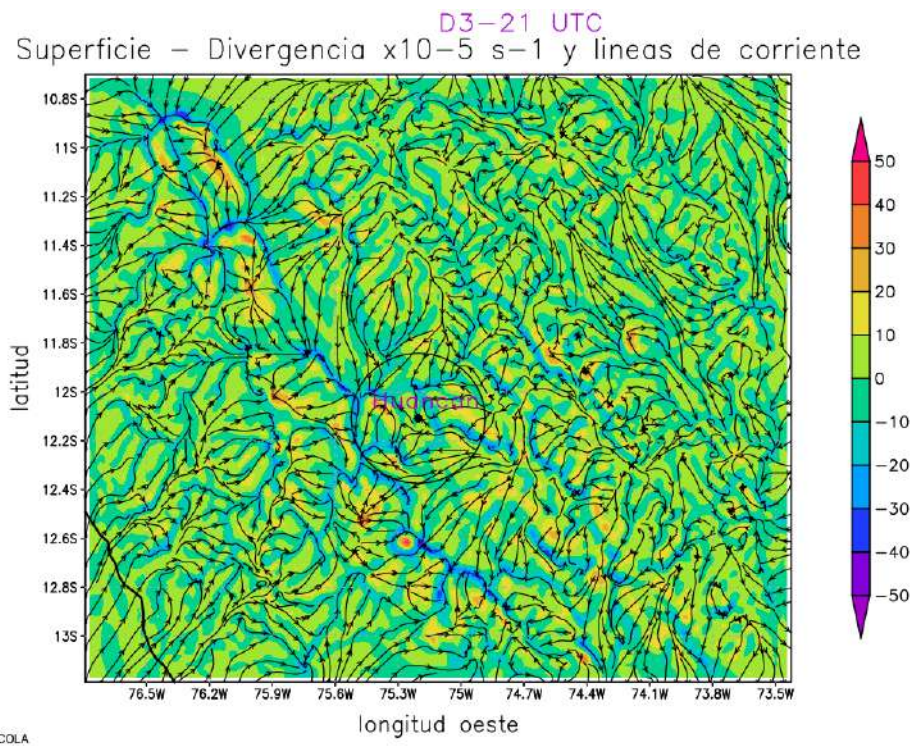


Figura 51: Divergencia horizontal ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en superficie para dominio D3 a las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019

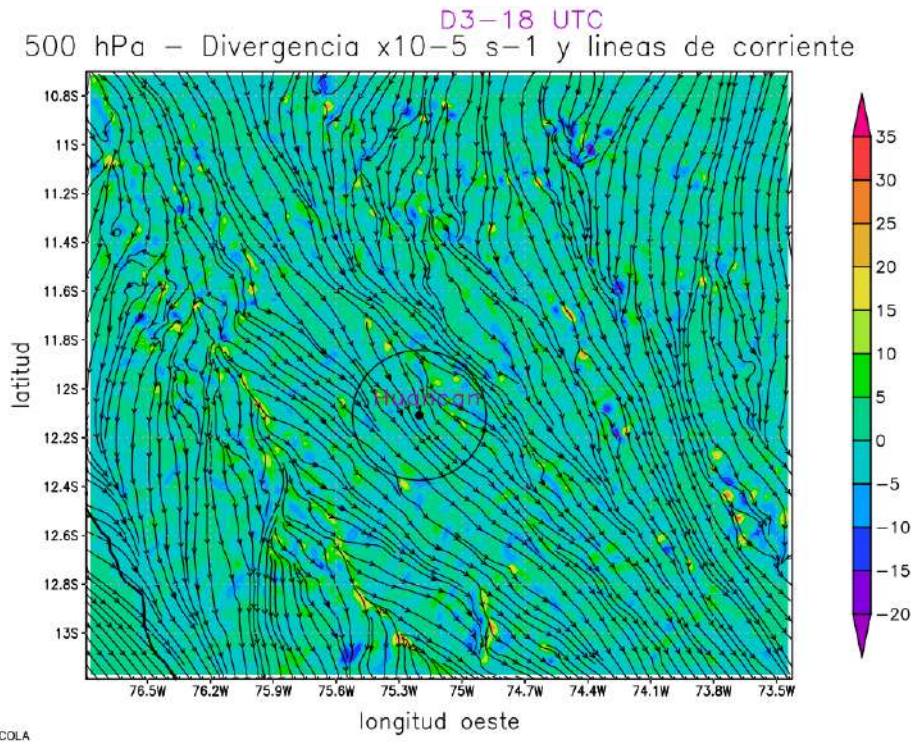


Figura 52: Divergencia horizontal ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en 500 hPa para dominio D3 a las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019

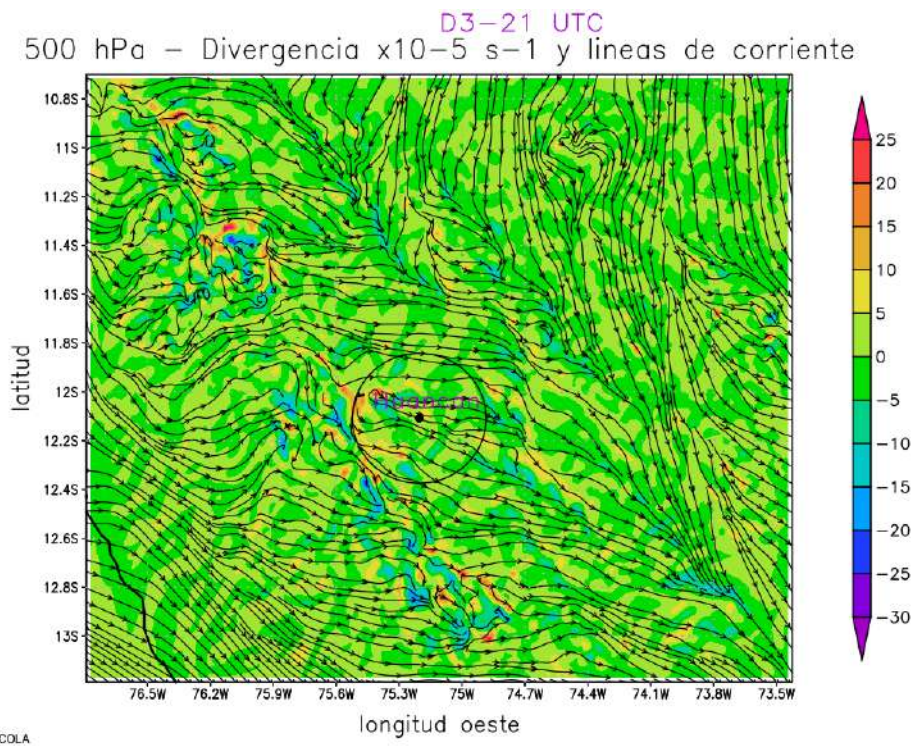


Figura 53: Divergencia horizontal ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en 500 hPa para dominio D3 a las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019

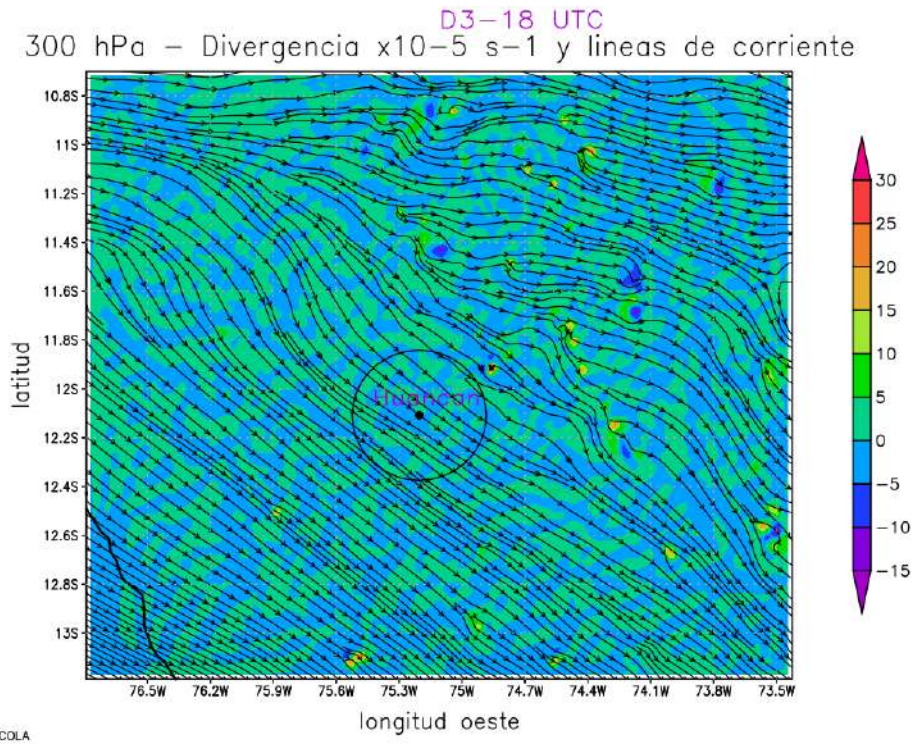


Figura 54: Divergencia horizontal ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en 300 hPa para dominio D3 a las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019

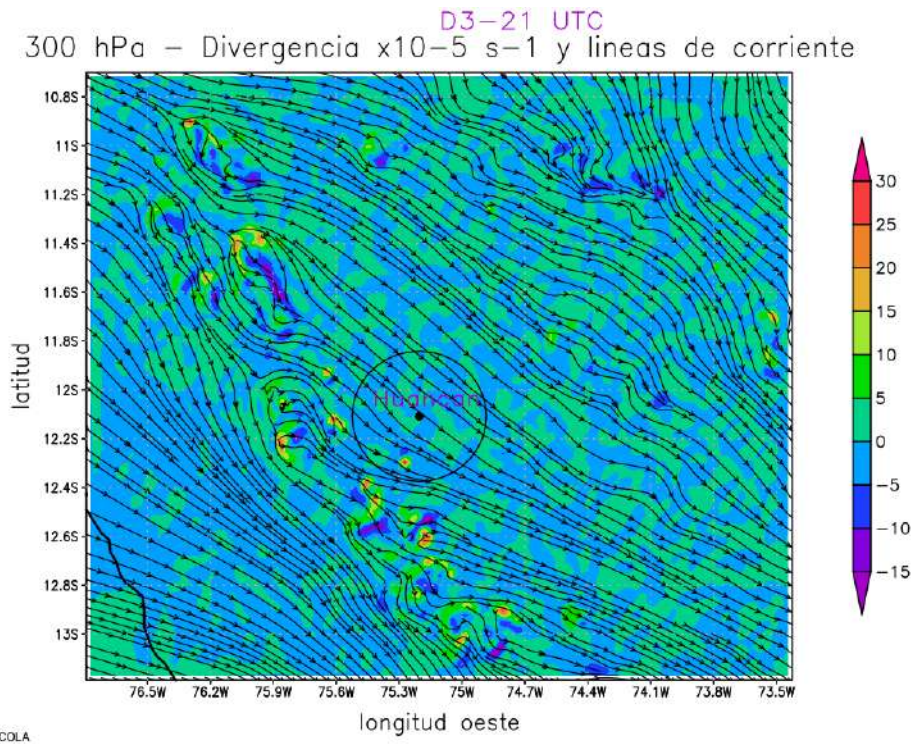


Figura 55: Divergencia horizontal ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y líneas de corriente en 300 hPa para dominio D3 a las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019

4.1.4 Análisis de la velocidad vertical

El movimiento vertical de la atmósfera puede ser ascendente o descendente, a los cuales lo llamamos convección o subsidencia, respectivamente. Con el modelo WRF, se simuló muchas situaciones en diferentes instantes, en todos los dominios considerados en el estudio y en diferentes niveles. Bajo estas consideraciones, lo más resaltante se muestra en la Figura 56, que es para el nivel de 600 hPa y a las 21:00 UTC. En ella se aprecia que en el dominio D3, la velocidad vertical varía en promedio entre -1.0 m/s a 1.0 m/s, con algunos núcleos de hasta 7.0 m/s y -3.0 m/s. En particular sobre Huancán se observó un núcleo muy localizado con velocidad entre 3.0 a 4.0 m/s, condición que está indicando la existencia de movimiento vertical ascendente.

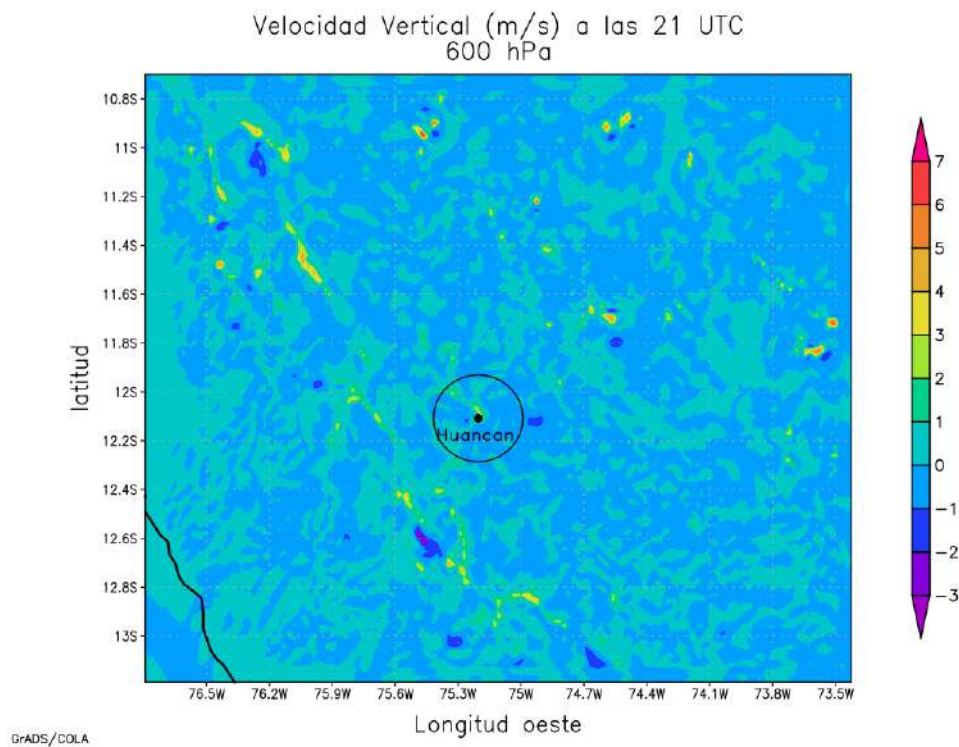


Figura 56: Distribución de la velocidad vertical (m/s), en 600 hPa para dominio D3 a las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019

Así mismo en la Figura 57 se muestra el perfil del comportamiento de la velocidad vertical (m/s) del viento para las 18:00 UTC, 21:00 UTC, 22:00 UTC y 23:00 UTC, observándose que a las 18:00 UTC y 22:00 UTC no hay indicios significativos que hay movimientos verticales ascendentes o descendentes. En cambio, a las 21:00 UTC desde la superficie hasta aproximadamente el nivel 18 (430 hPa), la velocidad vertical es positiva siendo máximo en

el nivel 10 del modelo (600 hPa), donde la velocidad vertical es 3.2 m/s, nivel en la cual se estaría dando el movimiento vertical ascendente en su máxima intensidad. En el caso de las 23:00 UTC, desde el nivel 15 (500 hPa) hasta el nivel 26 (200 hPa) también se tiene velocidad vertical positiva, siendo máximo en el nivel 22 (300 hPa) donde la velocidad vertical alcanzó 4.0 m/s. Lo observado a las 21:00 UTC estaría determinando la convección asociada a la formación de nubes con ascenso rápido. Estos resultados son muy interesantes ya que queda demostrado la existencia de movimientos verticales ascendentes en la tropósfera sobre el distrito de Huancán.

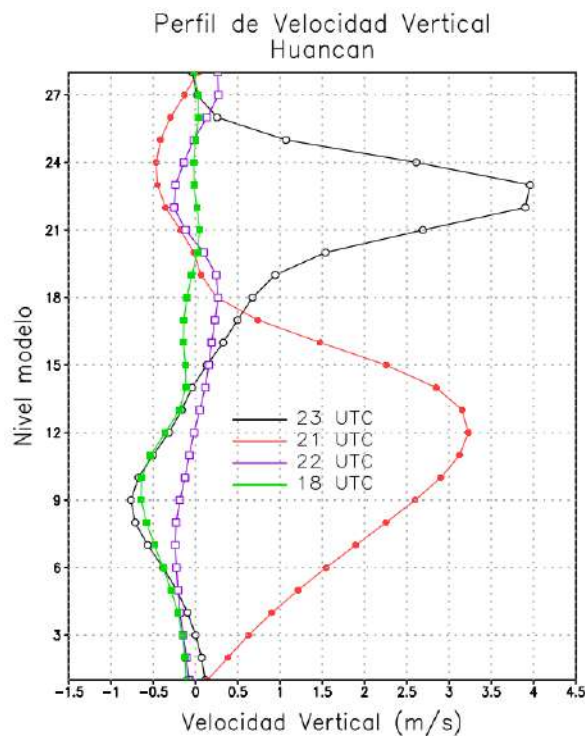


Figura 57: Perfil de la velocidad vertical (m/s) sobre el distrito de Huancán a las 18:00 UTC, 21:00 UTC, 22:00 UTC y 23:00 UTC, para el 13 octubre de 2019

En la Figura 58, se presenta una comparación de la variación temporal de la velocidad vertical analizada y pronosticada a nivel de 600 hPa sobre el distrito de Huancán, con los detalles obtenidos en el dominio D3, caracterizándose por tener prácticamente la misma tendencia, en el que también entre las 20:00 UTC y 23:00 UTC se tiene velocidad vertical detectada significativamente positiva ($>$ a 3 m/s) y velocidad vertical pronosticada negativa ($<$ a -1.5 m/s). Estas variaciones ocurridas en esos instantes con seguridad serían explicadas por la ocurrencia de una tormenta eléctrica que tiene una duración en promedio entre una a

dos horas y que durante su etapa de desarrollo, maduración y disipación presentan movimientos verticales ascendentes y descendentes, que además sería muy localizada dado, dado que estas condiciones no ocurren en todo el dominio.

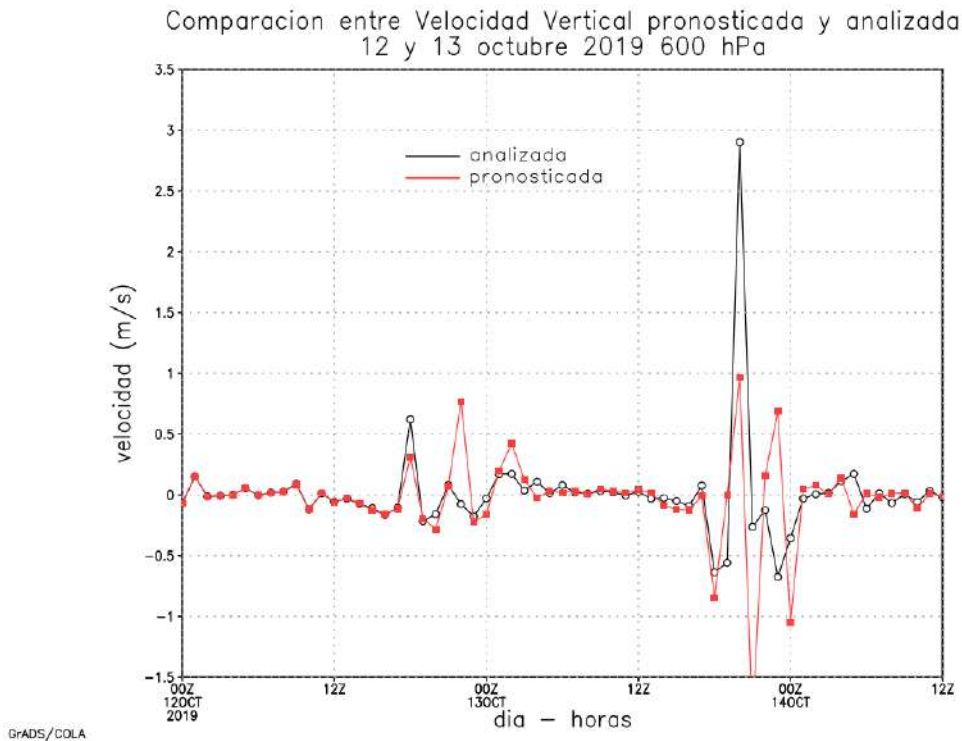
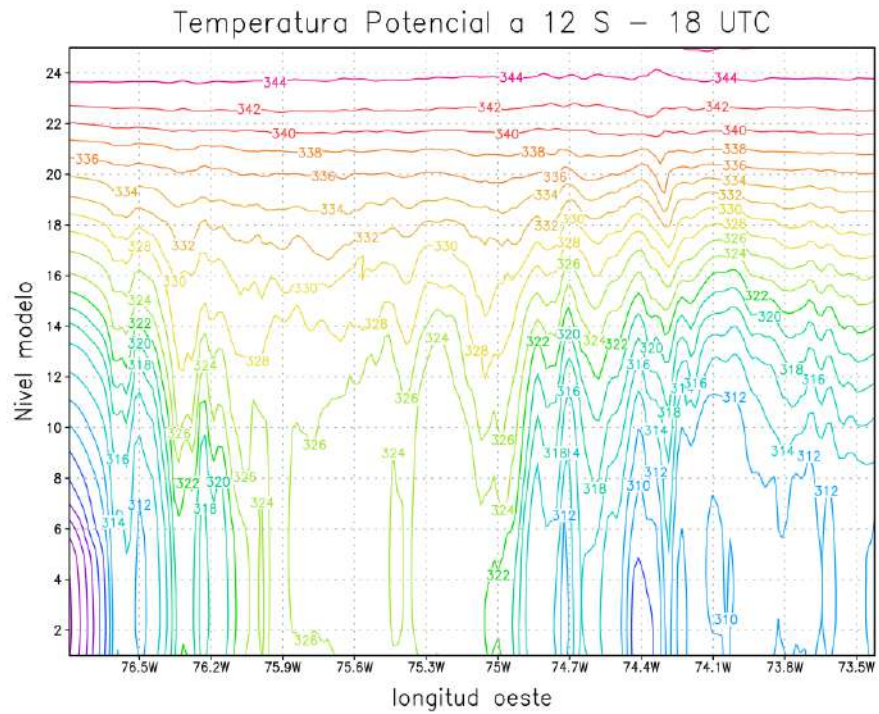


Figura 58: Comparación entre la velocidad vertical (m/s) analizada y pronosticada en 600 hPa, el 12 y 13 de octubre de 2019

4.2 ANÁLISIS E IDENTIFICACIÓN DE LAS PRINCIPALES VARIABLES DE LA TERMODINÁMICA ATMOSFÉRICA QUE OCASIONÓ LA TORMENTA DE GRANIZO EN EL DISTRITO DE HUANCÁN-HUANCAYO

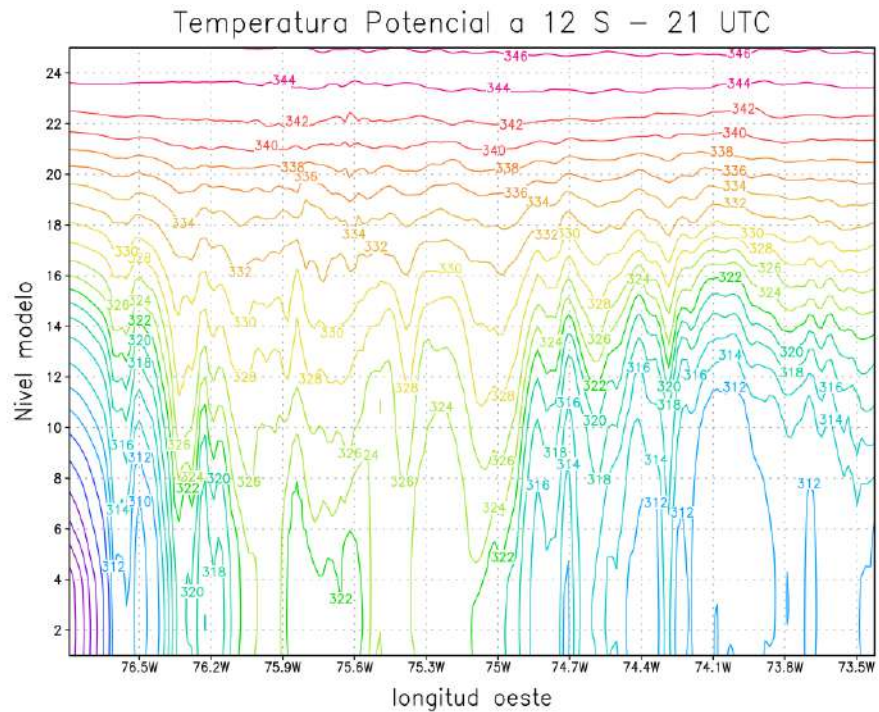
4.2.1 Análisis de la temperatura potencial

Considerando las variables más básicas para la caracterización de la estabilidad atmosférica, además de considerar que el evento de granizo fue una tormenta localizada de acuerdo con los resultados del objetivo anterior, en las Figuras 59 y 60 se presentan un corte a la latitud de 12° S para el dominio D3, de la temperatura potencial (K) a las 18:00 UTC y 21:00 UTC. Se observa claramente que la temperatura potencial aumenta con la altura, en todas las longitudes desde la superficie hasta el nivel 25 (aproximadamente 220 hPa), lo que significa que la atmósfera en dicho dominio es estable considerando que el aire es seco, situación que no es favorable para el movimiento vertical ascendente de la atmósfera.



GrADS/COLA

Figura 59: Corte a 12° de latitud sur para dominio D3 de la temperatura potencial (K) a las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019



GrADS/COLA

Figura 60: Corte a 12° de latitud sur para dominio D3 de la temperatura potencial (K) a las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019

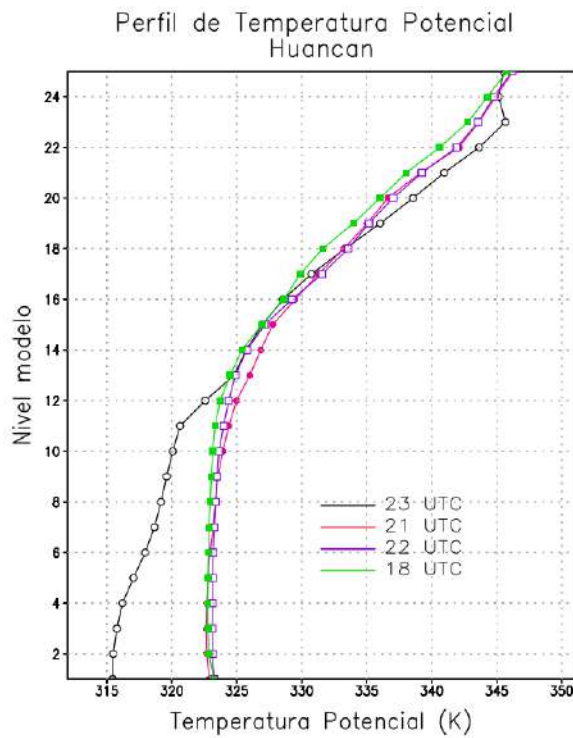


Figura 61: Perfil de temperatura potencia (K), sobre el distrito de Huancán a las 18:00 UTC, 21:00 UTC, 22:00 UTC y 23:00 UTC, para el 13 octubre de 2019

Las características explicadas en las Figuras 59 y 60, son aclaradas con lo mostrado en la Figura 61, donde se muestra el perfil de temperatura potencial (en K) sobre el distrito de Huancán, en el que a las 18:00 UTC, 21:00 UTC, 22:00 UTC y 23:00 UTC los valores de temperatura potencial se incrementa con la altura, lo que estaría indicando una atmósfera estable sin considerar el aporte del vapor de agua.

4.2.2 Análisis de la temperatura potencial equivalente

En las Figuras 62, 63 y 64, son los cortes a 12° S y también en el dominio D3, referidos a la variación vertical de la temperatura potencial equivalente (en K). En ellos se observa capas de la tropósfera (600 a 400 hPa, que corresponden a los niveles 10 y 20 del modelo WRF), donde la temperatura potencial equivalente disminuye con la altura, especialmente a las 21:00 UTC, lo que significa que la atmósfera es condicionalmente o potencialmente inestable, el cual está asociado a la ocurrencia de la condensación, o en otras palabras a la formación de nubes, que en este caso sería de origen convectivo, donde el nivel de condensación estaría aproximadamente en el nivel de 600 hPa. El movimiento vertical inicial a nivel de superficie sería explicado por la rugosidad de la superficie, para luego por condensación se retroalimiente y favorezca el ascenso debido a la energía disipada (calor latente) desde el nivel de condensación.

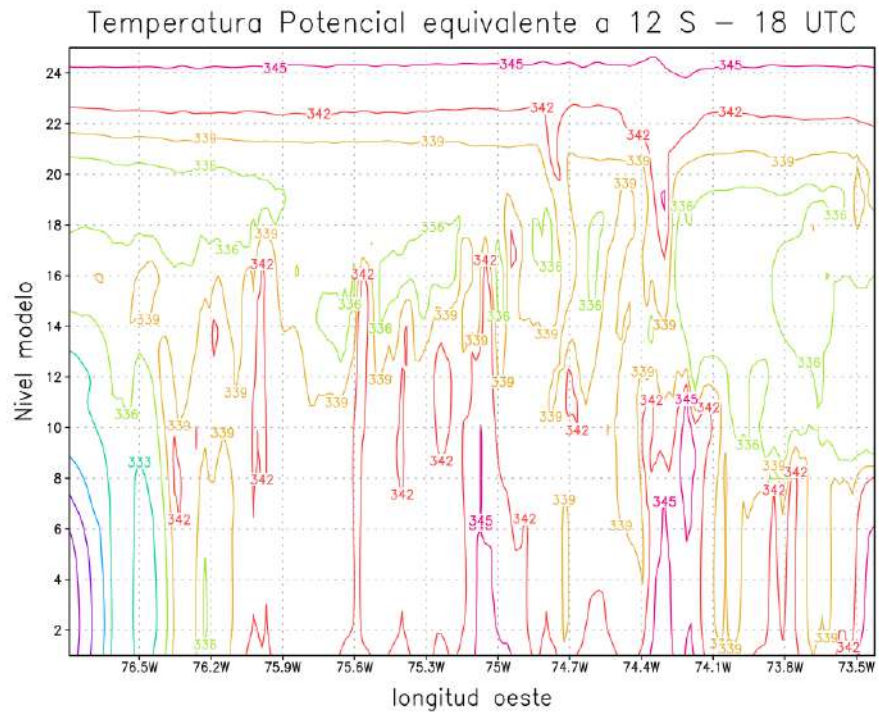


Figura 62: Corte a 12° de latitud sur para dominio D3 de la temperatura potencial equivalente (K) a las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019

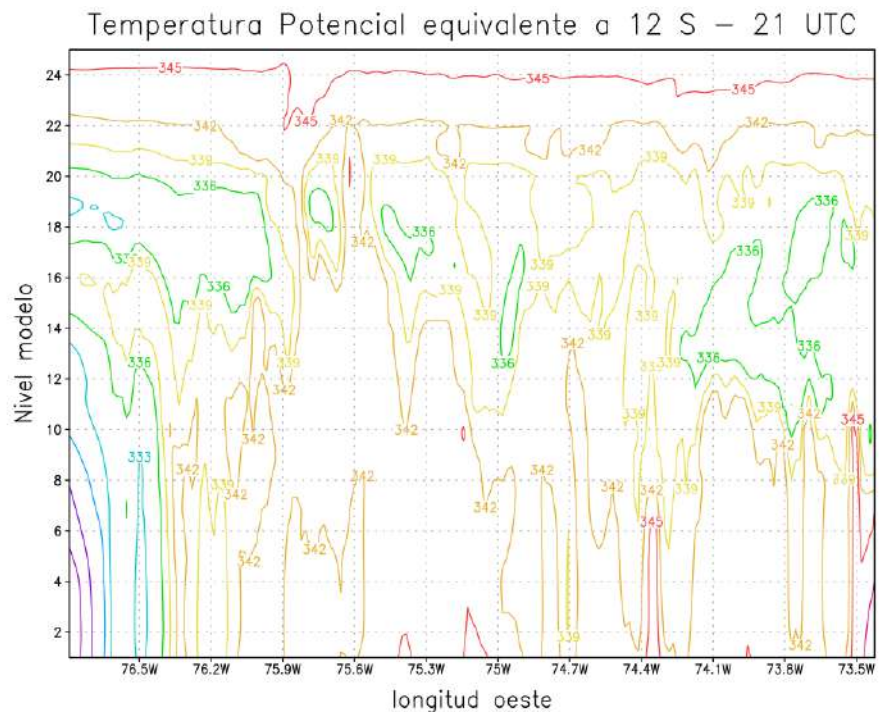


Figura 63: Corte a 12° de latitud sur para dominio D3 de la temperatura potencial equivalente (K) a las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019

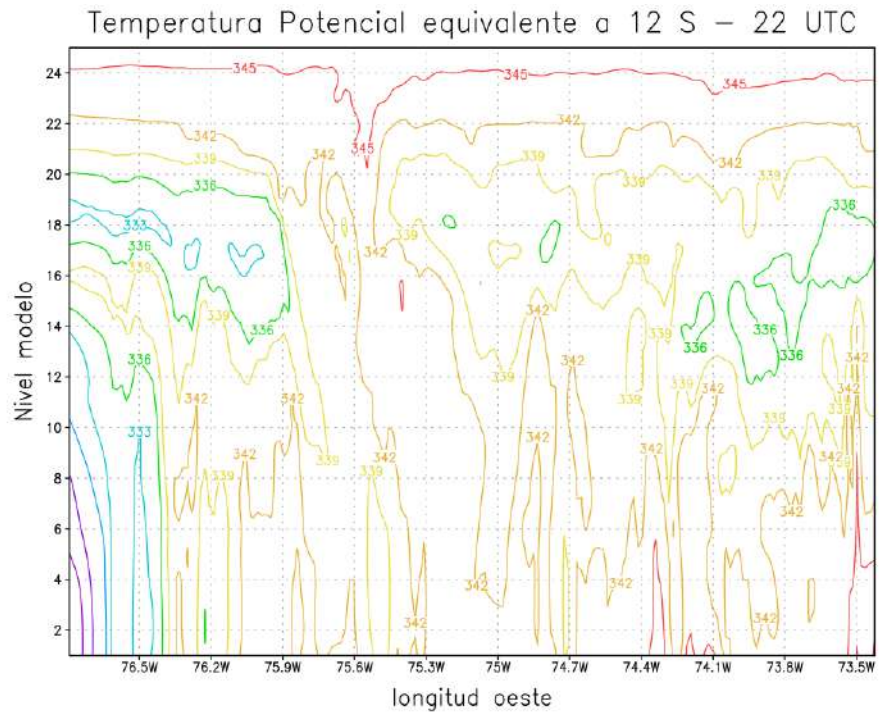


Figura 64: Corte a 12° de latitud sur para dominio D3 de la temperatura potencial equivalente (K) a las 22:00 UTC del 13 de octubre de 2019

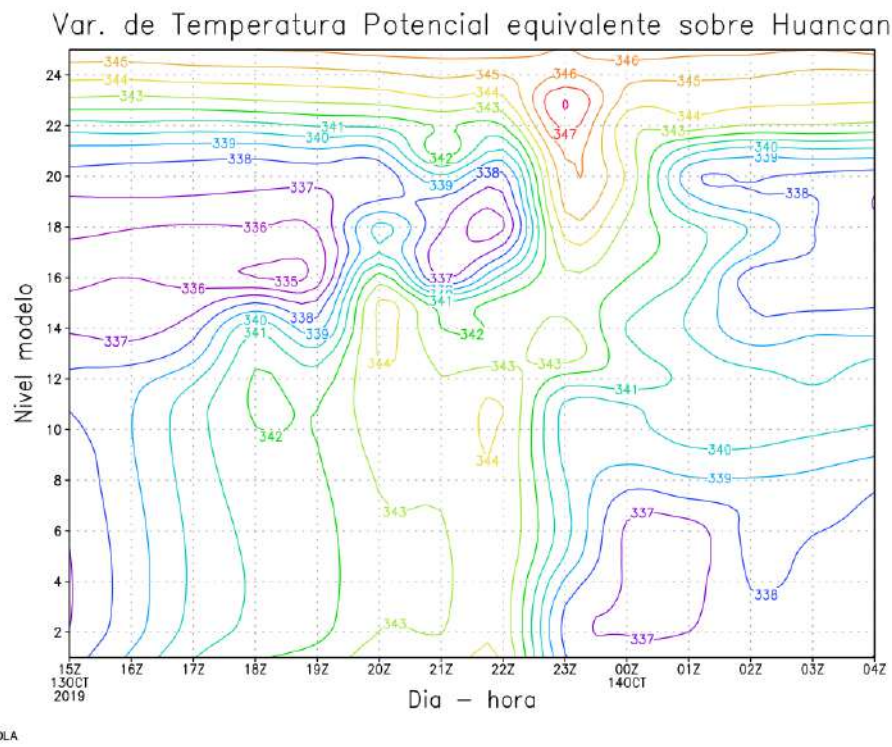


Figura 65: Variación horaria del perfil de temperatura potencial equivalente (K), sobre el distrito de Huancán

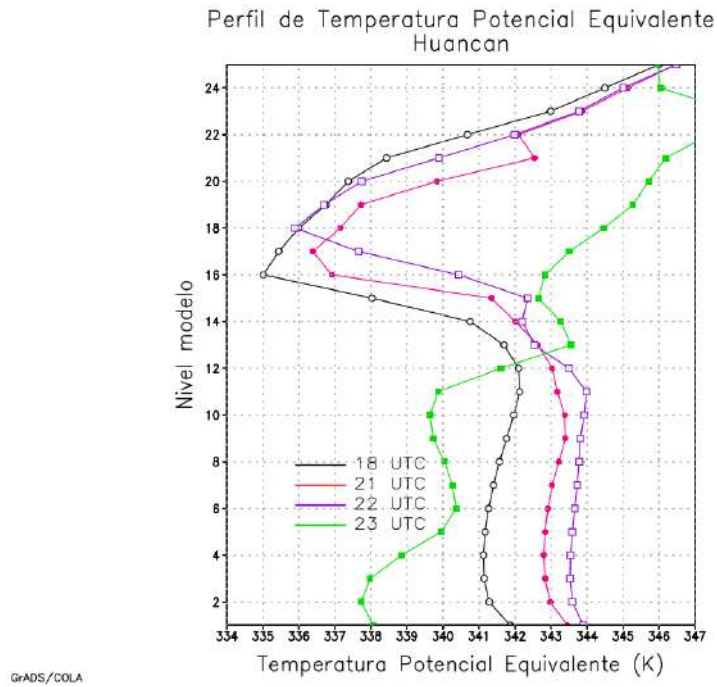


Figura 66: Perfil de la temperatura potencial equivalente (K) sobre el distrito de Huancán a las 18:00 UTC, 21:00 UTC, 22:00 UTC y 23:00 UTC

Por otro lado en la Figura 65, se presenta la variación temporal de la temperatura potencial equivalente sobre el distrito de Huancán, en el que se observa que en el período considerado entre las 15:00 UTC del día 13 de octubre hasta las 04:00 UTC del día 14 de octubre, en promedio la temperatura potencial equivalente disminuye con la altura, situación que se aclara con los perfiles mostrados en la Figura 66, donde se presenta la variación vertical de la temperatura potencial equivalente para las 18:00 UTC, 21:00 UTC, 22:00 UTC y 23:00 UTC, sobre el distrito de Huancán, en el que desde el nivel 10 (600 hPa) hay una disminución significativa desde 344 K a 335 K entre los niveles 16 a 18 (480 a 430 hPa), condición atmosférica que está indicando que la atmósfera fue potencialmente inestable y provocó seguramente la formación de la nube de tormenta (cumulonimbos), sobre la zona de estudio provocando la precipitación líquida y sólida (granizo). Una vez culminado el fenómeno, la atmósfera debe volver a su condición predominante que es de estar estable o potencialmente estable y esto es lo que ocurrió a las 23:00 UTC donde la temperatura potencial equivalente se incrementa con la altura. Se debe mencionar para este estudio no se utilizó otros índices de estabilidad, debido a que la mayoría de ellas requieren de información de variables en 850 hPa, 700 hPa, entre otros niveles y de acuerdo con la zona de estudio con altitudes por

encima de los 3000 msnm, los datos a 850 hPa no es posible obtenerlas, por lo que las otras metodologías estarían limitadas a ser usadas.

4.2.3 Análisis de la humedad relativa

Ahora considerando el grado de saturación de la atmósfera, se presentan en las Figuras 67 y 68, la distribución a nivel de superficie en el dominio D3 de la humedad relativa para las 18:00 UTC y 21:00 UTC, respectivamente. De estas Figuras se rescata que en la zona de estudio la humedad relativa a las 18:00 UTC es menor a 40 por ciento, en tanto que a las 21:00 UTC varía entre 40 y 50 por ciento indicando que para la hora de ocurrencia del evento se incrementó el grado de saturación de la atmósfera.

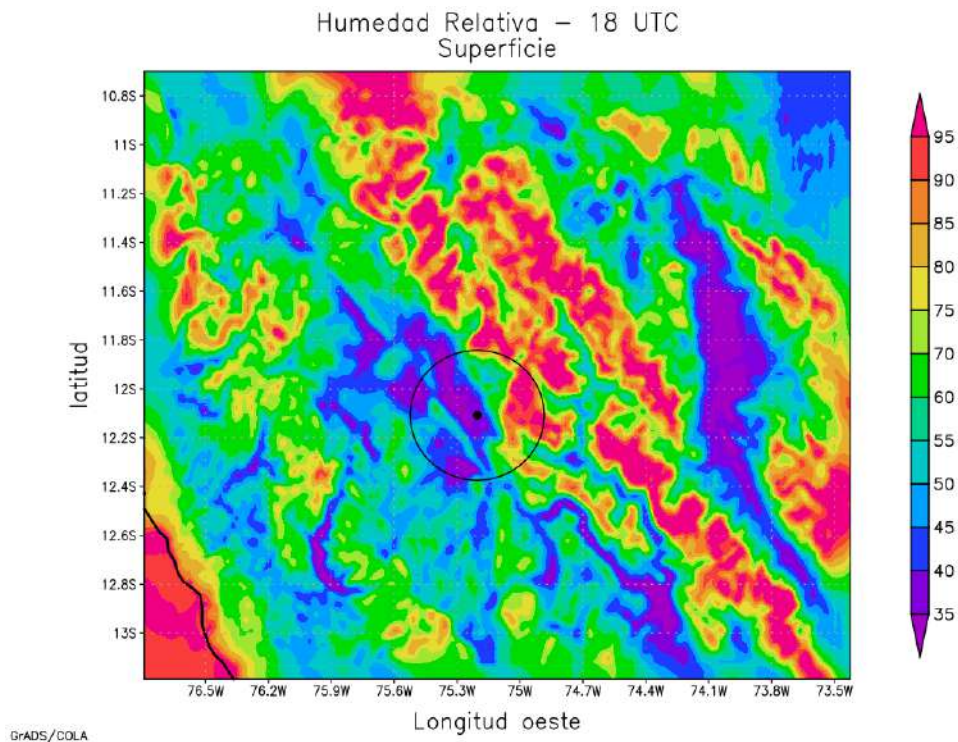


Figura 67: Variación de la humedad relativa (porcentaje) en superficie para dominio D3 a las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019

En el nivel de 500 hPa que se presentan en las Figuras 69 y 70, la humedad relativa sobre el área de interés alcanza valores entre 70 % a 80 %, situación que indica que la atmósfera está más próxima a alcanzar la saturación que por lo tanto la presencia de nubes es más factible. Esta condición es más clara a las 21:00 UTC y al oeste del área de estudio, donde sobre la zona de las cumbres de la cordillera de los andes, los valores de humedad relativa superan el 90 %, que estarían indicando presencia de formaciones nubosas.

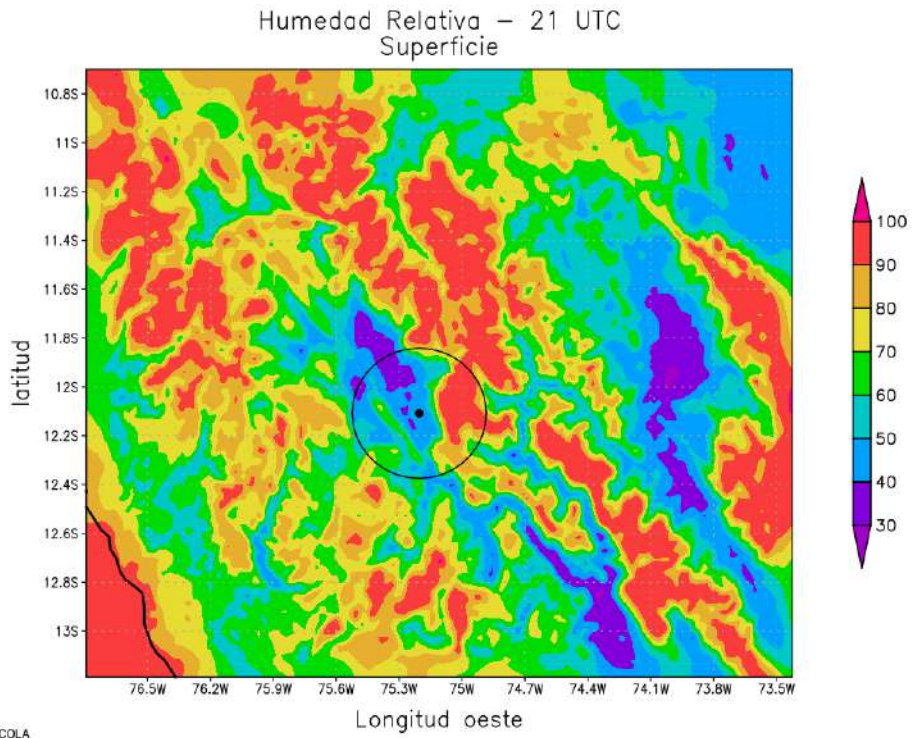


Figura 68: Variación de la humedad relativa (porcentaje) en superficie para dominio D3 a las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019

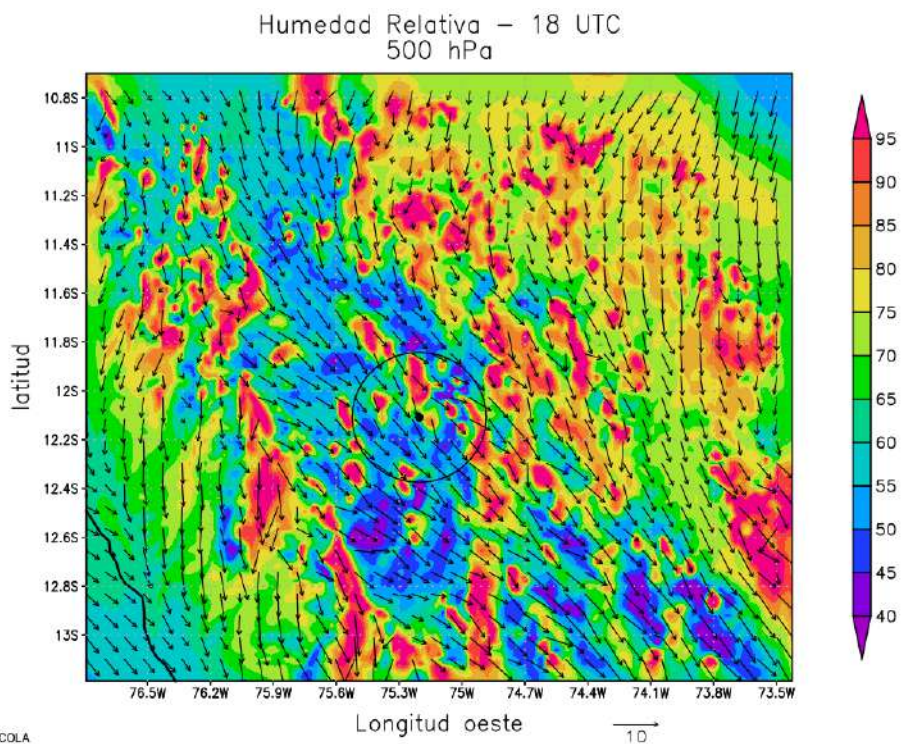


Figura 69: Variación de la humedad relativa (porcentaje) en 500 hPa para dominio D3 a las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019

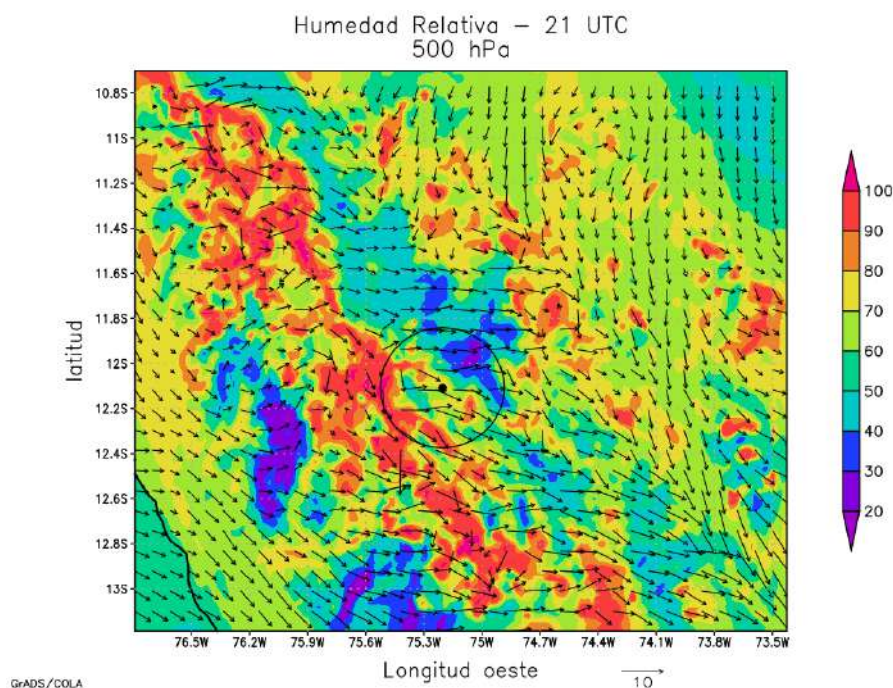


Figura 70: Variación de la humedad relativa (porcentaje) en 500 hPa para dominio D3 a las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019

Observando la Figura 71, referida al perfil de humedad relativa a 12° S, se nota que a 75°W que aproximadamente corresponde a la ubicación del nevado de Huaytapallana, se tienen valores de humedad relativa que superan el 90 por ciento, desde la superficie hasta el nivel 15 (500 hPa). Pero para la ubicación del distrito de Huancán, la humedad relativa es menor a 50 por ciento hasta los 600 hPa.

Para las 21:00 UTC, la humedad relativa es mayor en niveles desde la superficie hasta en promedio los 500 hPa, destacando perfiles ligeramente al oeste del distrito de Huancán valores de humedad relativa que superan 90 por ciento y que alcanzan niveles de hasta los 300 hPa (10 a 11 km de altitud), lo que quiere decir que la columna de atmósfera estuvo muy cercano a la saturación el que estaría reflejando la existencia de una nube de desarrollo vertical cuyo tope llega hasta aproximadamente 11 km de altitud, por el que se puede deducir que el tipo de nube sería el cumulonimbos lo cual estaría asociada a la tormenta de granizo en el distrito de Huancán. Por informaciones de los diarios y las personas entrevistadas, la tormenta de granizo ocurrió entre las 16 horas y 17 horas (21:00 UTC y 22:00 UTC) y el colapso del local “2 estrellas” ocurrió aproximadamente a las 16:30 hrs, versiones que pueden ser deducidas con lo mostrado en la Figura 72.

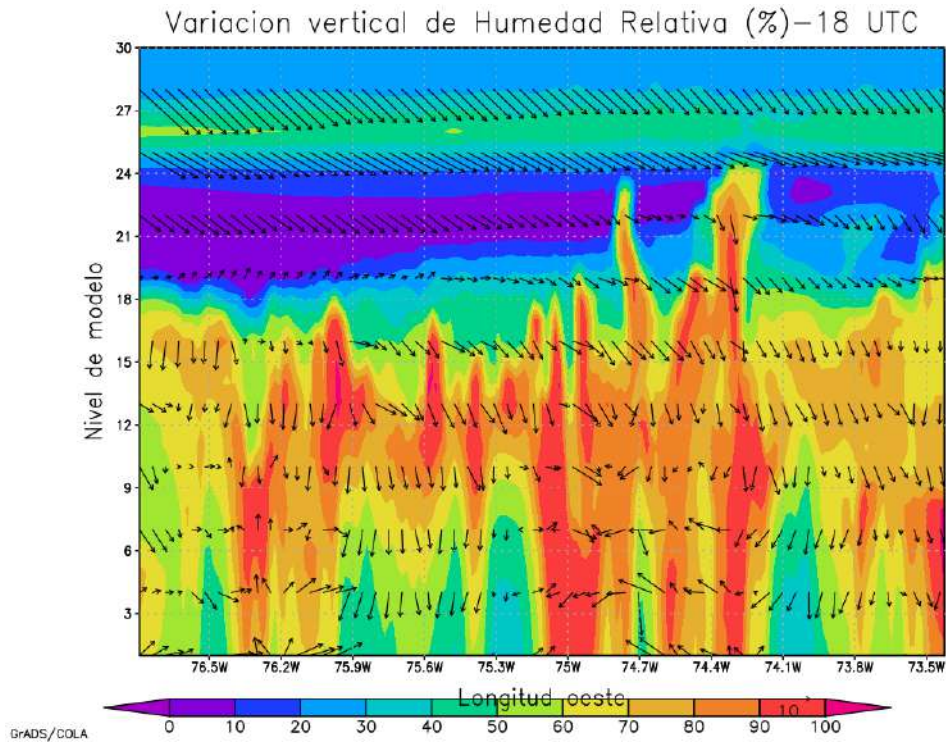


Figura 71: Variación vertical de la humedad relativa (por ciento) en 12° S para dominio D3 a las 18:00 UTC del 13 de octubre de 2019

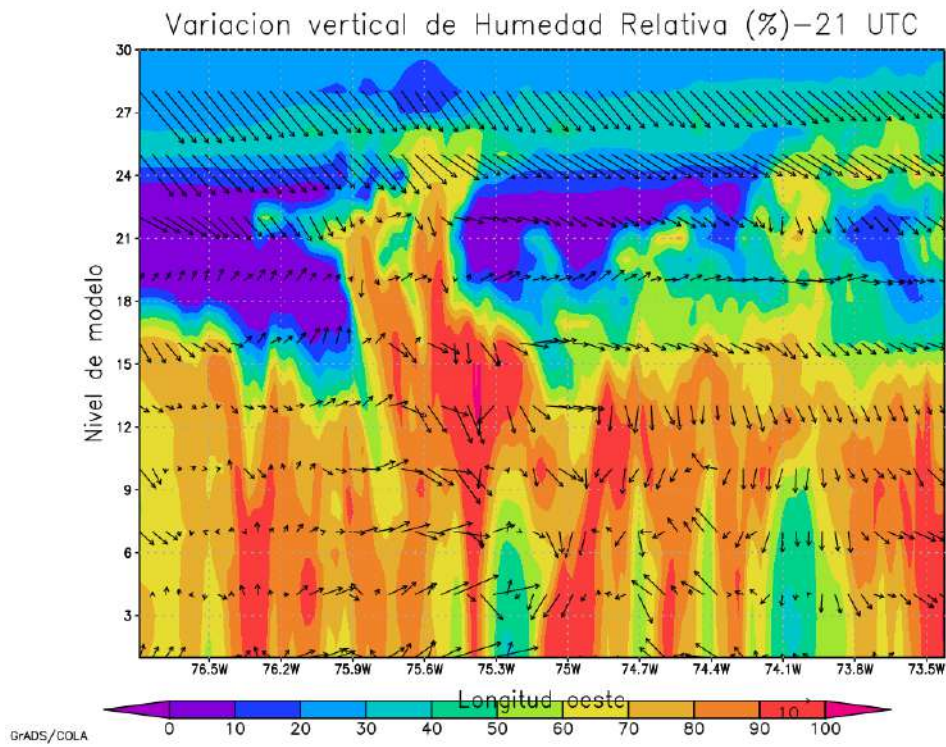


Figura 72: Variación vertical de la humedad relativa (por ciento) en 12° S para dominio D3 a las 21:00 UTC del 13 de octubre de 2019

4.2.4 Análisis de la imagen de satélite GOES

Las imágenes de satélite GOES en el canal 14 procesadas por CORPAC S.A., presentadas en la Figura 73 a) para las 21:00 UTC y 73 b) para las 22:00 UTC, en el que se detallan los topes de las formaciones nubosas, muestran que en el territorio peruano en esos instantes no hay gran actividad convectiva, más bien predominan cielo despejado, pero con nubosidad aislada en el llano amazónico. Así mismo en la sierra central y sur sobre todo para el lado de la cordillera presenta nubosidad con topes que alcanzaron temperaturas de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (9 a 10 km). Sin embargo, en forma muy aislada se observa en la Figura 73 b) un sistema nuboso cuyo tope tuvo una temperatura de $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$ (12 a 13 km) que justamente se encuentra sobre la zona de estudio y alrededor de la hora de ocurrencia del evento.

Por lo mencionado en el párrafo anterior y lo encontrado en el primer objetivo específico, todo indica que la granizada ocurrida en el distrito de Huancán es un evento a nivel local, lo que se observó con las características de la temperatura potencial equivalente, lo encontrado con la velocidad vertical, el comportamiento de la humedad relativa y obviamente con la contribución de la vorticidad y divergencia sobre la zona.

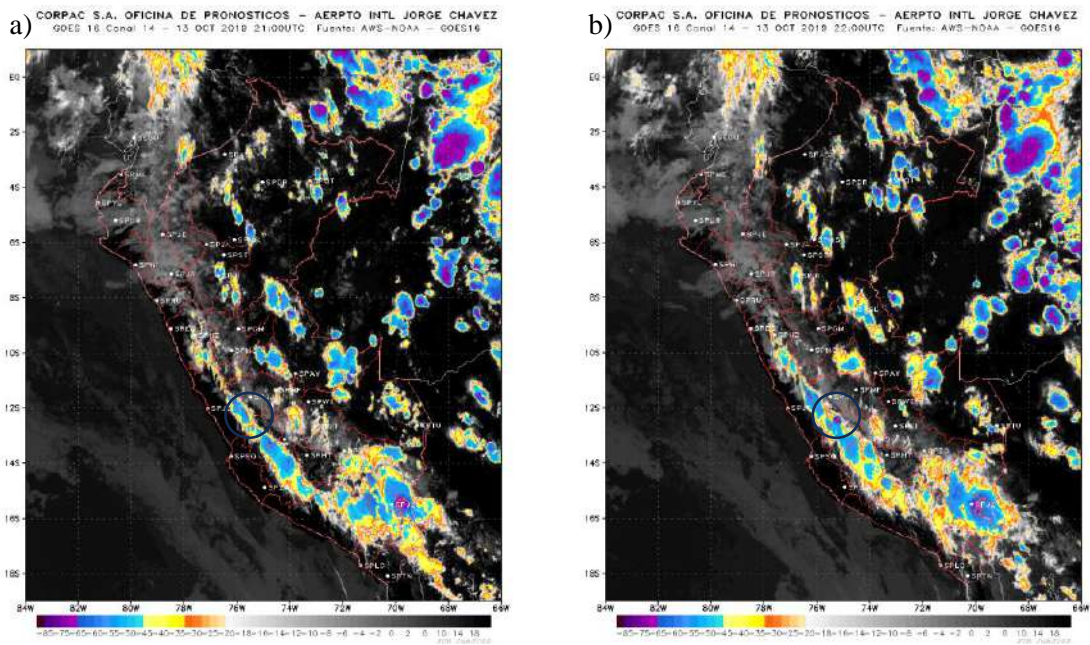


Figura 73: Imagen de satélite GOES 16 del 13 de octubre 2019 a las a) 21:00 UTC y b) 22:00 UTC

Fuente: CORPAC S.A.

4.2.5 Análisis de la microfísica nocturna

Para el análisis se usó la guía rápida de interpretación de la microfísica nocturna RGB, mostrado en la Figura 74 y por comparación de las imágenes con la guía se detectó la existencia o no de nubes de desarrollo vertical.

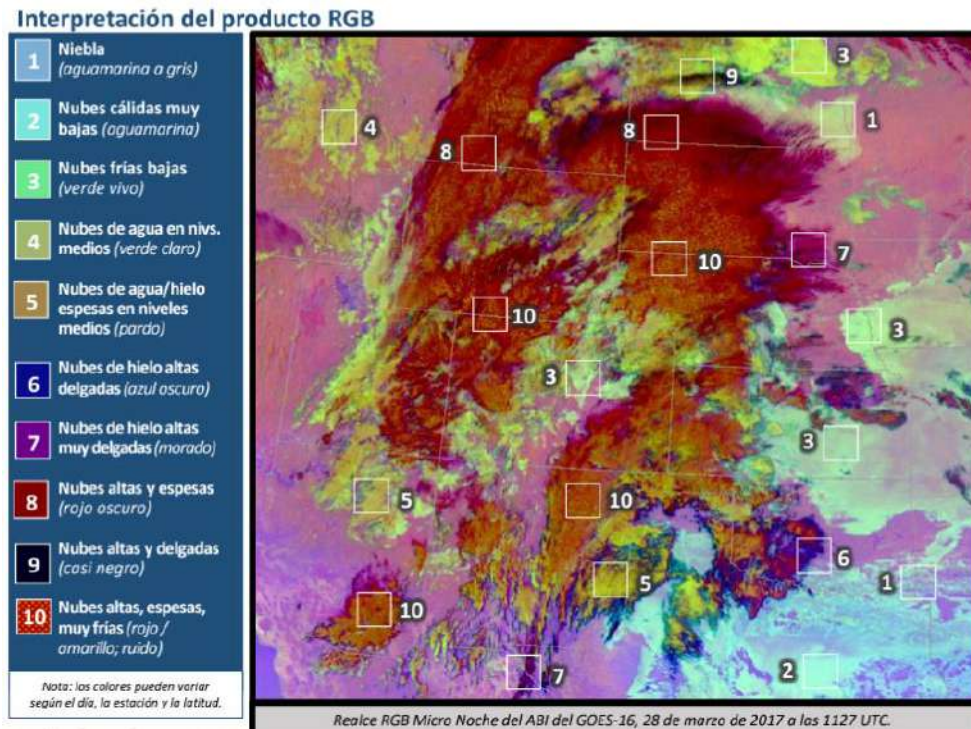


Figura 74: Guía rápida de interpretación de microfísica nocturna RGB

Fuente: NOAA

Según lo encontrado con la microfísica nocturna, a las 20:00 UTC y 21:00 UTC mostrado en la Figura 75 a) y 75 b), respectivamente, se aprecian ligera nubosidad sobre la zona de estudio que principalmente serían nubes formadas por gotas de agua. Pero en la Figura 75 c) y 75 d) que son la microfísica para las 22:00 UTC y 22:30 UTC, se presentaron nubes altas y espesas sobre la región de estudio, siendo más significativo al oeste y sur del Distrito de Huancán. Estas características verifican la existencia de convección en la zona de estudio, pero no coincide exactamente con los reportes de la hora de ocurrencia del evento de granizo y el colapso del techo del local “2 estrellas”, pero si muestra que hubo presencia de nubes de desarrollo vertical alrededor de las 22:00 UTC y que la duración y presencia de esta nube fue menor a dos horas.

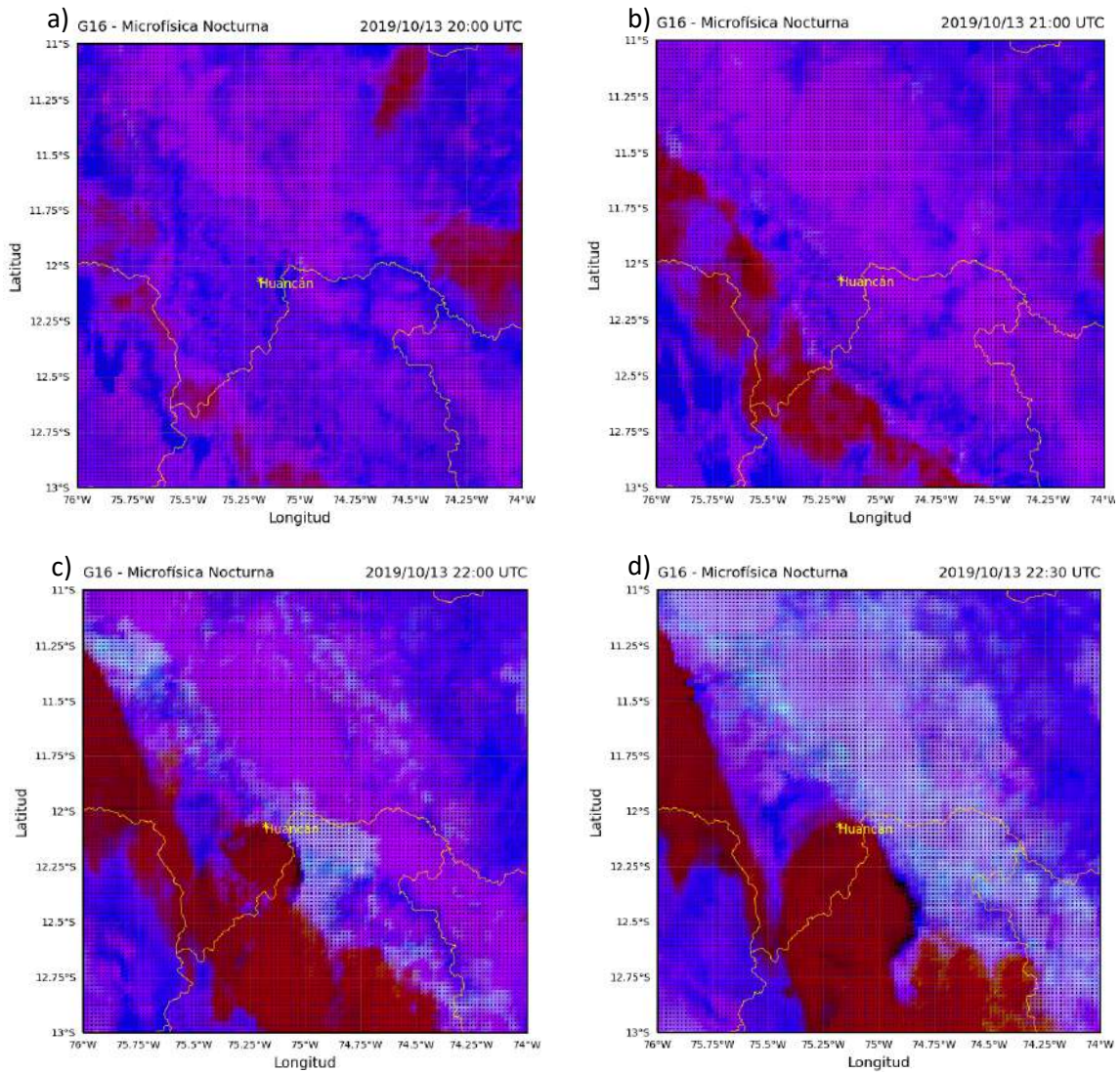


Figura 75: Microfísica de nubes para el 13 de octubre de 2019: a) 20:00 UTC; b) 21:00 UTC; c) 22:00 UTC y d) 22:30 UTC

Fuente: Elaboración propia

4.3 IDENTIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS IMPACTOS POTENCIALES DE LA TORMENTA DE GRANIZO EN EL DISTRITO DE HUANCÁN-HUANCAYO

Para el cumplimiento de este objetivo se hizo unas entrevistas anónimas a un total de 35 pobladores, para el cual se planteó las siguientes preguntas:

- a) ¿Qué daños le causó la granizada del 13 de octubre?
- b) ¿A qué hora ocurre generalmente las granizadas?

- c) ¿Cómo saben si va a ocurrir una granizada?
- d) ¿Qué hacen ante la posibilidad de la ocurrencia de la granizada?

Las respuestas más resaltantes a las preguntas formuladas fueron:

- a) ¿Qué daños le causó la granizada?
 - Rotura de tejado. Esta fue la respuesta más común sobre todo en los pobladores que cuentan con una construcción antigua, vale decir de paredes de adobe y techo de tejas, eternit y calamina
 - Acumulación de hielo e inundación de las casas
 - Muerte de los animales menores: cuyes
 - Desprendimiento de las flores de la guinda, durazno, peral
 - Caída y rotura de las hojas de las plantas, principalmente: Papa, maíz, arveja, haba
- b) ¿A qué hora ocurre generalmente las granizadas?
 - En horas de la tarde
 - Entre las 3 y 5 de la tarde
 - En algunas ocasiones en la noche
- c) ¿Cómo saben si va a ocurrir una granizada?
 - Cuando alrededor del mediodía se tiene un día muy soleado y luego entre las 3 y 4 de la tarde y de un momento a otro se forma una nube negra, pero a partir de setiembre a octubre.
 - Cuando se ven muy cerca los rayos y se escuchan los truenos
- d) ¿Qué hacen ante la posibilidad de la ocurrencia de la granizada?
 - Se revientan cohetes
 - Es esparce ceniza al aire (entre sus creencias que esto disminuye el tamaño del granizo)

Al reventar los cohetes y esparcir ceniza lo que se estaría haciendo es incrementar la cantidad de núcleos de condensación, el cual haría que los tamaños de los granizos sean menores.

4.4 ESTABLECIMIENTO DE UN MODELO CONCEPTUAL ASOCIADO A LA TORMENTA DE GRANIZO EN EL DISTRITO DE HUANCÁN – HUANCAYO

Se debe mencionar que no se encontraron casos similares de granizada en el distrito de Huancán como la ocurrida el 13 de octubre del 2019. Sin embargo, se trata de modelar las

condiciones atmosféricas que dieron origen a la tormenta de granizo en el distrito en mención. En la Figura 76 se observa que hubo advección de humedad a nivel de superficie y a 500 hPa desde el noreste a la zona de estudio, vale decir desde la Amazonía. Así mismo se detectó que en las partes altas de la cordillera de los andes hay confluencia del flujo de vientos provenientes del noreste (que corresponde a la Amazonía) y del sur este provenientes del océano Pacífico, generando además convergencia que son favorables para la formación de nubes convectivas, donde también se observó que la humedad relativa es mayor a 80 %, condición muy propicia y cercana a la saturación. Esta condición fue reforzada por la circulación ciclónica en el nivel de 300 hPa proveniente del noreste

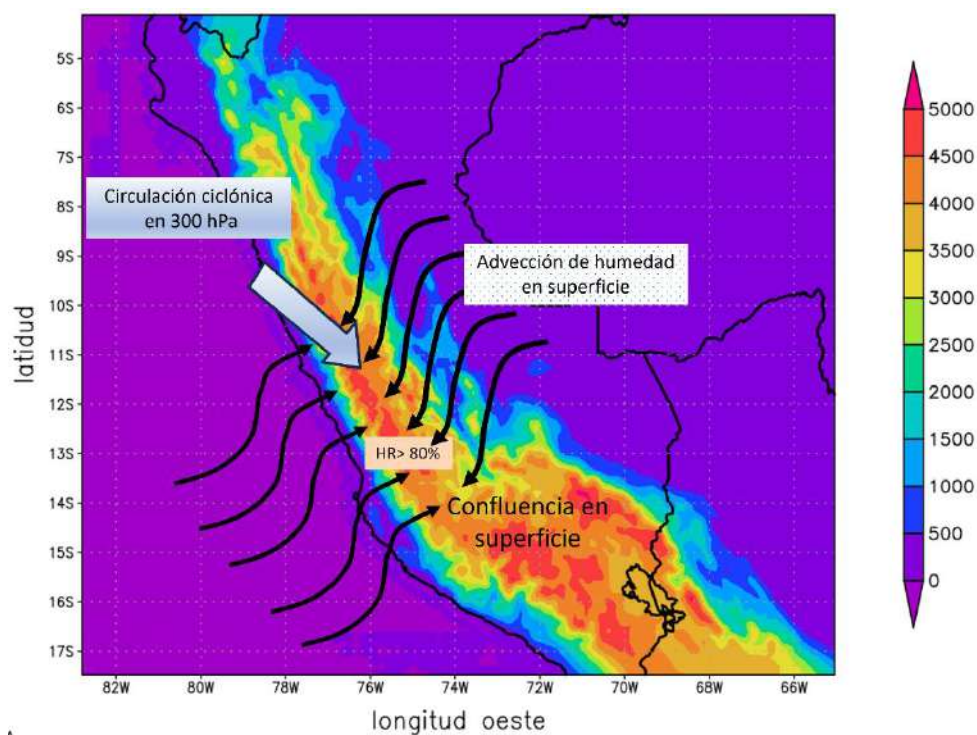


Figura 76: Modelo conceptual en vista de planta de la formación de tormentas en la sierra central del Perú

La Figura 77 es la representación básicamente de la formación de nubes de tipo convectivo sobre el distrito de Huancán. Esto fue posible determinar después de ver los resultados en el dominio D3 de las variables velocidad vertical del viento, variación vertical de la humedad relativa, variación vertical de la temperatura potencial equivalente y el análisis de la divergencia a nivel de superficie y a 300 hPa. Como se observa en la Figura 75 a nivel de superficie hubo convergencia, la misma que provocó convección, la que fue verificado por

la velocidad vertical (ascenso) y también por la disminución de la temperatura potencial equivalente que indica que la porción de atmósfera es potencialmente inestable y seguramente favorecida por los procesos de condensación ocurrida en la formación del cumulonimbo, el cual duró menos de dos horas.

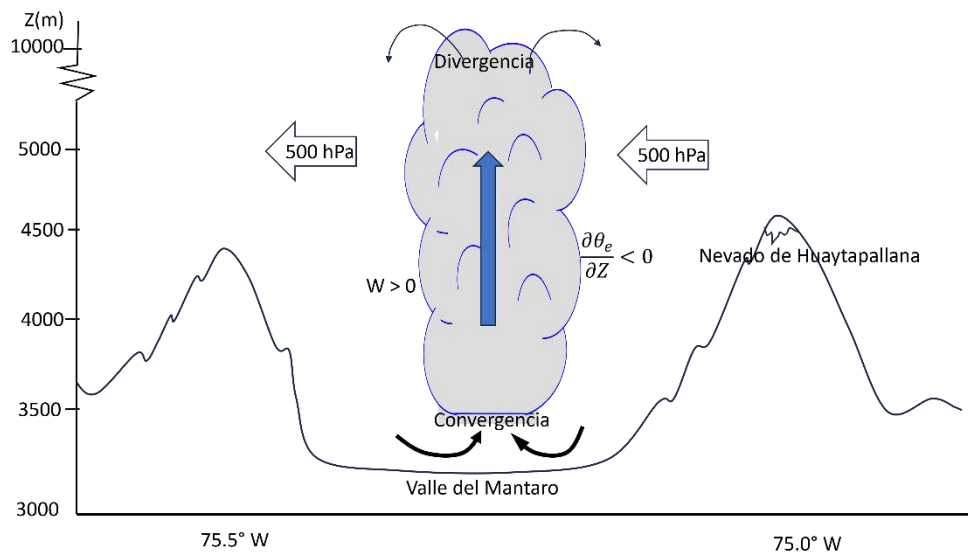


Figura 77: Modelo conceptual en la vertical y a nivel local de la formación de nube cumulonimbos en el distrito de Huancán

V. CONCLUSIONES

- 5.1 A nivel sinóptico y regional, instantes previos y durante la ocurrencia de la granizada hay advección de humedad en superficie y 500 hPa provenientes del noreste de la zona de estudio. También se nota una circulación ciclónica en 300 hPa ubicada el noroeste de la región de estudio. Así mismo a nivel de superficie en todos los dominios hay convergencia y en 300 hPa sobre todo a nivel sinóptico y regional predomina la divergencia.
- 5.2 Sobre el distrito de Huancán alrededor de la hora de ocurrencia de la granizada se detectaron a nivel local (dominio D3) velocidades verticales de viento ascendentes entre 3 a 4 m/s.
- 5.3 La atmósfera sobre el distrito de Huancán y en el momento de la ocurrencia de la granizada considerando la temperatura potencial equivalente, fue potencialmente inestable; condición favorable para la formación de nubes de desarrollo vertical.
- 5.4 El evento de granizada ocurrido en el distrito de Huancán fue un evento local, lo cual fue observado en las imágenes de satélite y las condiciones dinámicas a nivel local.
- 5.5 El modelo WRF fue capaz de detectar las condiciones dinámicas y termodinámicas para la ocurrencia de convección, hasta con más de 24 horas de anticipación
- 5.6 Los impactos más resaltantes después de la ocurrencia de granizo fueron rotura de tejados de los techos de las viviendas, caída de todas las hojas y flores de las plantas, muerte de animales menores.
- 5.7 En el modelo conceptual establecido se consideran las condiciones regionales de la dinámica atmosférica en las que la advección de humedad y vorticidad relativa son propicias, pero también el aspecto local en la que la velocidad vertical y la temperatura potencial equivalente juega un papel importante en la formación de nubes de tormenta.

VI. RECOMENDACIONES

- 6.1 Dada la poca investigación en temas de tormentas eléctricas severas en Perú, se recomienda analizar más casos, en el que se consideren los sistemas sinópticos (zona de convergencia intertropical, alta de Bolivia, zona de convergencia del atlántico sur, entre otros) y su relación con los fenómenos como la granizada a nivel local, el cual permitiría establecer modelos operativos que ayuden a prevenir los riesgos asociados a dicho evento.
- 6.2 Una de las debilidades en el estudio de tormentas es la microfísica de nubes, por lo que se recomienda promover las investigaciones en este tema dado que tiene mucha importancia en la formación de nubes de desarrollo vertical.
- 6.3 Si bien el modelo WRF detectó las condiciones dinámicas y termodinámicas asociadas a convección, se recomienda realizar más evaluaciones con la finalidad de establecer un método operativo para la detección de tormentas de granizo, sobre todo a nivel local.
- 6.4 Se recomienda a las instituciones involucradas con la gestión de riesgos de desastres, así como a las autoridades locales, incluir en su sistema de alerta temprana, los pronósticos de tiempo con fines de prevención de riesgos asociadas a la ocurrencia de tormentas de granizo.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, G. y Carnesoltas M. 2005. Comportamiento de las Tormentas locales Severas en Cuba en el período 1987 – 2002. Resultados de la modelación de un caso de estudio. *Revista Cubana de Meteorología*, Vol. 12, No.1, 1 – 10
- Ahrens, C. & Robert, H. 2019. *Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the environment* (12th ed.), Cengage Learning, Boston, MA. 678 pp
- Allianz Global Corporate & Specialty. 2018. Preparativos para tormentas de granizo. ALLIANZ RISK CONSULTING.
- Andrea, A. 2017. Granizo: Estudio de variabilidad climática en los valles Norpatagónicos. Ediciones INTA. Argentina
- Andrews, D. 2010. *An Introduction to Atmospheric Physics*. First edition © Cambridge University Press. 249 pp
- Balbastro, G. y Sonzogni, V. 2008. Colapso de Estructuras de Galpones Durante Tormentas Severas. *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*. Vol. 8(1)
- Bedoya, D.(14 de octubre de 2019). Huancayo: 12 personas continúan internadas tras desplome de techo en fiesta patronal. *El Comercio*. Disponible en <https://elcomercio.pe/peru/juin/huancayo-12-personas-continuan-internadas-tras-desplome-de-techo-en-fiesta-patronal-noticia/>
- Chumpitaz, J. (17 de octubre 2019). Reporte Complementario N° 2516 – 17/10/2019 / COEN – INDECI / 10:30 HORAS (Reporte N° 02). Precipitaciones pluviales en el distrito de Huancán – Junín. *Centro de Operaciones de Emergencia Nacional (COEN)*. Disponible en <https://portal.indeci.gob.pe/wp-content/uploads/2019/10/REPORTE-COMPLEMENTARIO-N%C2%BA-2516-17OCT2019-PRECIPITACIONES-PLUVIALES-EN-EL-DISTRITO-DE-HUANCAN-JUN%C3%8DN-02.pdf>
- Dioses, A. 2020. Modelamiento de las precipitaciones en la cuenca del Río Cañete con el modelo Weather Research And Forecasting (WRF). Tesis para optar el título de ingeniero meteorólogo. Perú. Universidad Nacional Agraria la Molina
- Estrada, E.; Navarro, D. y Bisbé L. E. (enero - marzo 2020). Análisis de la tormenta local severa ocurrida el 5 de mayo del 2018 en la provincia de Camagüey. *Revista Cubana de Meteorología*, Vol. 26, No. 1, 1-12.
- García, O.; Ramírez, H.; Alcalá, J.; Meulenert, A. y García, M. 2007. Climatología de las tormentas eléctricas locales severas (TELS) en la Zona Metropolitana de Guadalajara.

- Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM ISSN 0188-4611, Núm. 63, 2007, pp. 7-16
- García, A. 2017. Estudio de la precipitación usando el modelo Weather Research and Forecasting (WRF) en la cuenca del río Mantaro. Tesis para optar el título de Ingeniero Meteorólogo. Perú. Universidad Nacional Agraria la Molina.
- Gil, A., Davison, M., & Munch, M. (s.f.). Advección de Vorticidad Anticiclónica. Disponible en <https://www.wpc.ncep.noaa.gov/international/vortcubody.html#:~:text=Advecci%C3%B3n%20de%20Vorticidad%3A%20Es%20el,tiempo%2C%20en%20un%20punto%20dado.>
- Holton, J. 2004. An Introduction to Dynamic Meteorology, fourth edition. Academic Press, 535pp.
- Holton, J. & Hakim, G. 2013. An Introduction to Dynamic Meteorology, fifth edition. Academic Press, 524pp.
- Instituto Geofísico del Perú. 2005 a. Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en la cuenca del río Mantaro. Fondo Editorial CONAM. Lima, Perú.
- Instituto Geofísico del Perú. 2005b. Atlas Climático de precipitaciones y temperaturas en la Cuenca del río Mantaro. Fondo Editorial CONAM Lima, Perú.
- Jacobson, M. 2005. Fundamentals of Atmospheric Modeling. Cambridge University Press. 829 pp
- Lutgens, F. & Tarbuck, E. 2013. The atmosphere : an introduction to meteorology 12th edition. Pearson Education, Inc. 533 pp
- Meted UCAR. (s.f.). Introducción a la Meteorología Tropical. 2da edición. Disponible en https://www.meted.ucar.edu/tropical/textbook_2nd_edition_es/navmenu.php?tab=4&page=1.4.0
- NCAR – Mesoscale and Microscale Meteorology Division .2009. Advance Research WRF version 3 Modelling System User’s guide.
- Nieto, R. 2005. Validación Climática del modelo conceptual DANA. Memoria presentada para optar el Grado de Doctor en Ciencias Físicas. España. Universidad de Vigo. Disponible en https://ephyslab.uvigo.es/wp-content/uploads/2019/06/TESIS_Raquel-Nieto.pdf
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) s.f. Nighttime Microphysics RGB. Quick Guide. Disponible en

https://www.star.nesdis.noaa.gov/goes/documents/QuickGuide_GOESR_NtMicroR_GB_final.pdf

- Peña, Z. y Pabón, J. 2019. Climatología de las granizadas en Colombia. Cuadernos de Geografía: revista Colombiana de Geografía 29 (1): 259-282.
- Prieto, R.; Avendaño, A. y Matías, L. 2019. CENAPRED Serie de Fascículos. Fascículo: Tormentas Severas. Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana. México. Disponible en <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/189-FASCCULOTORMENTASSEVERAS.PDF>
- Redacción Perú21. (14 de octubre de 2019). Huancayo: Así quedó el local tras la caída del techo por granizada que dejó seis muertos. *Perú 21*. Disponible en <https://peru21.pe/peru/huancayo-asi-queda-el-local-tras-la-caida-del-techo-por-granizada-que-dejo-seis-muertos-fotos-noticia/>
- Roebber, P. and Bosart, L.F. 1988. The sensitivity precipitation to circulation details. *Monthly Weather Review*
- Samaniego, R. 2016. Simulación atmosférica de las lluvias en el Valle del Mantaro utilizando el modelo “Weather Research and Forecasting (WRF)”. Tesis para optar el título de ingeniero meteorólogo. Perú. Universidad Nacional Agraria la Molina.
- Schmitz, R.; Falvey, M., & Coper, M. 2008. Implementación de un Modelo Fotoquímico de alta resolución para la Macrozona Central del País. Informe Final Resumen Ejecutivo Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (s.f.) Datos Hidrometeorológicos a nivel nacional. Disponible en <https://www.senamhi.gob.pe/?p=estaciones>
- Skamarock, W.; Klemp, J.; Dudhia, J.; Gill, D.; Barker, D.; Duda, M.; et al. 2008. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. Atmospheric Research. Meso-scale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research: Boulder, CO
- Skamarock, W.; Klemp, J.; Dudhia, J.; Gill, D.; Liu, Z.; Berner, J. & Huang, X. 2021. A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4.3 (No. NCAR/TN-556+STR). doi:10.5065/1dfh-6p97
- Villalobos, E.; Martínez-Castro, D.; Kumar, S.; Silva, Y. y Fashe, O. 2019. Estudio de tormentas convectivas sobre los Andes Centrales del Perú usando los radares PR-TRMM y KuPR-GPM. *Revista Cubana de Meteorología*, Vol. 25, No. 1
- Wallace, J. & Gooch, P. (2006). *Atmospheric Science. An Introduction Survey*. Second Edition. British Library Cataloguing-in-Publication Data.

VII. ANEXOS

Anexo 1: Imágenes de Satélite GOES 16, Canal 14 cada 30 minutos para el 13 de octubre de 2019 entre las 20:00 UTC y 23:30 UTC

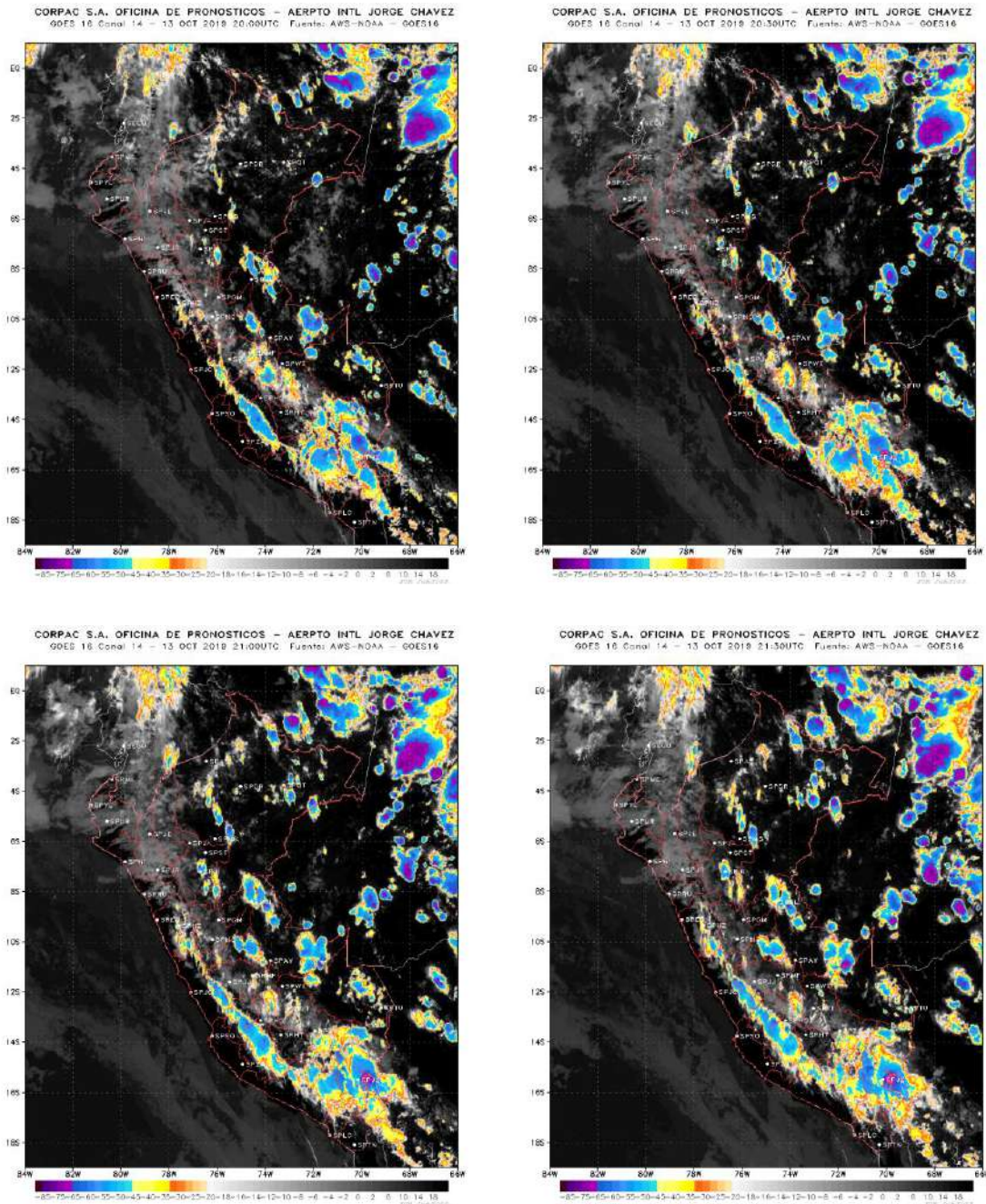


Figura 78: Imágenes de satélite GOES de las 20:00; 20:30 UTC, 21:00 UTC y 21:30 UTC

Fuente: CORPAC S.A.

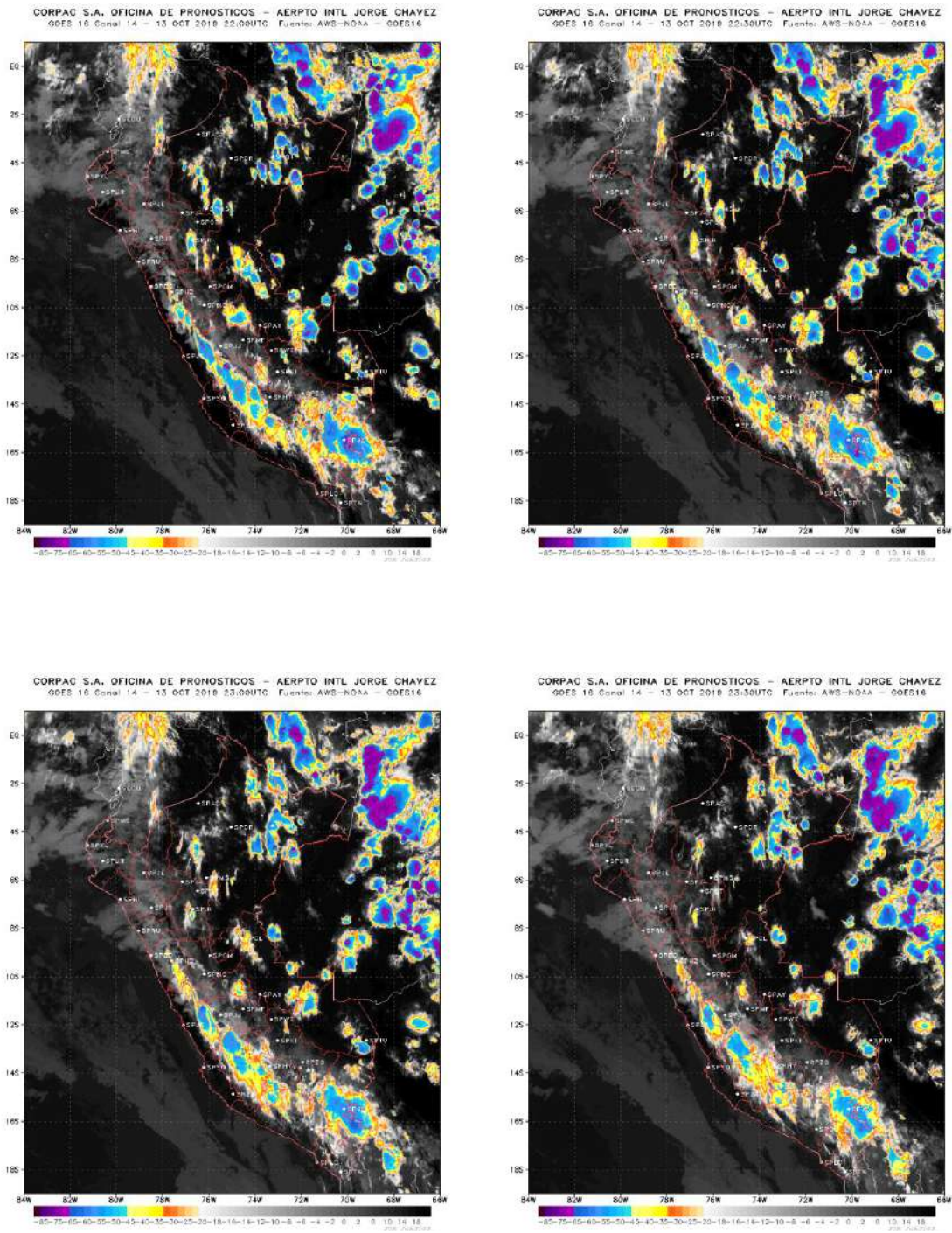


Figura 79: Imágenes de satélite GOES de las 22:00; 22:30 UTC, 23:00 UTC y 23:30 UTC

Fuente: CORPAC S.A.

Anexo 2: Imágenes de satélite de microfísica nocturna para el 13 de octubre de 2019, cada 20 minutos entre las 20:00 UTC y 00:00 UTC

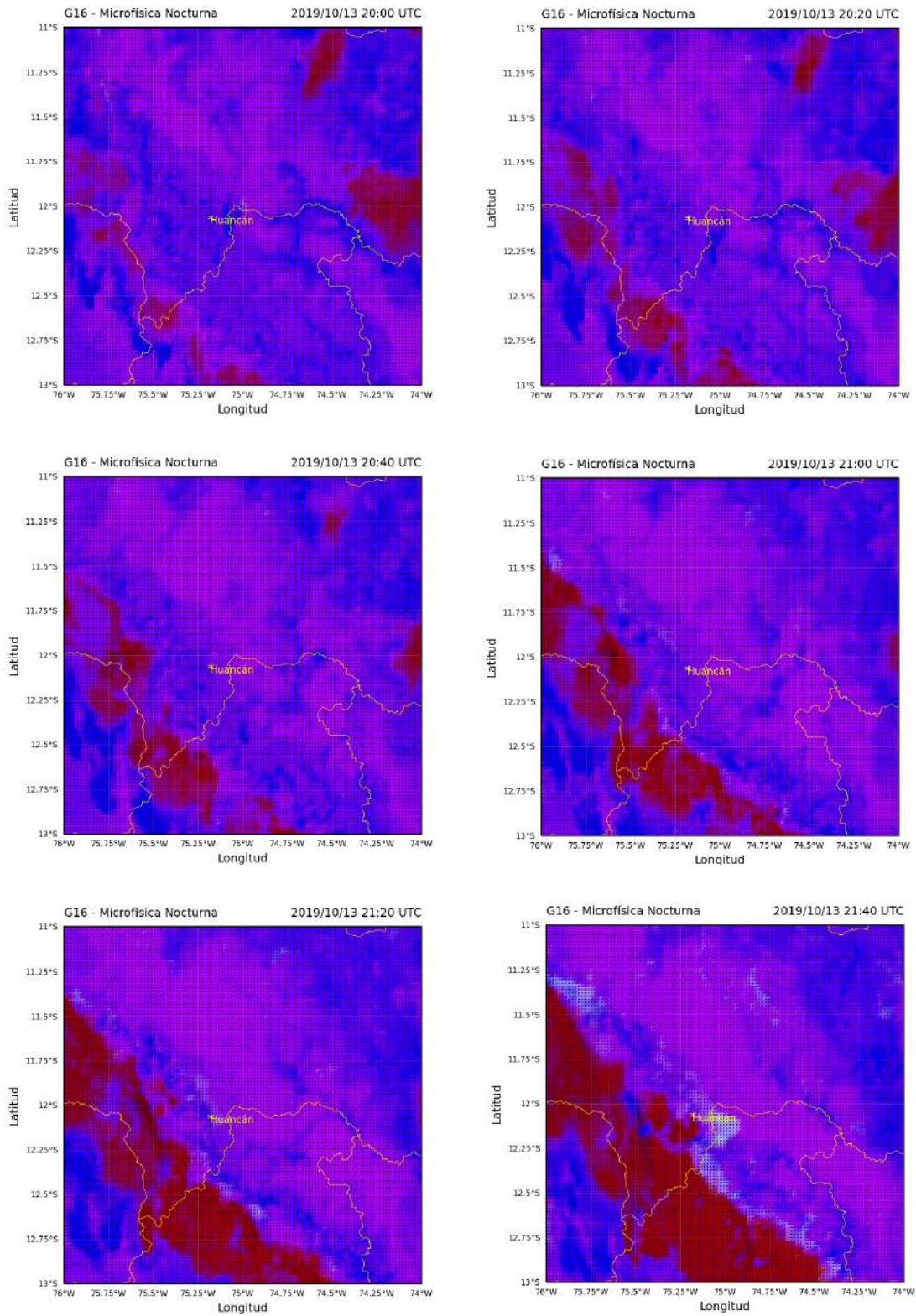


Figura 80: Imágenes de satélite de microfísica nocturna para el 13 de octubre de 2019 a las 20:00 UTC, 20:20 UTC, 20:40 UTC, 21:00, 21:20 UTC y 21:40 UTC

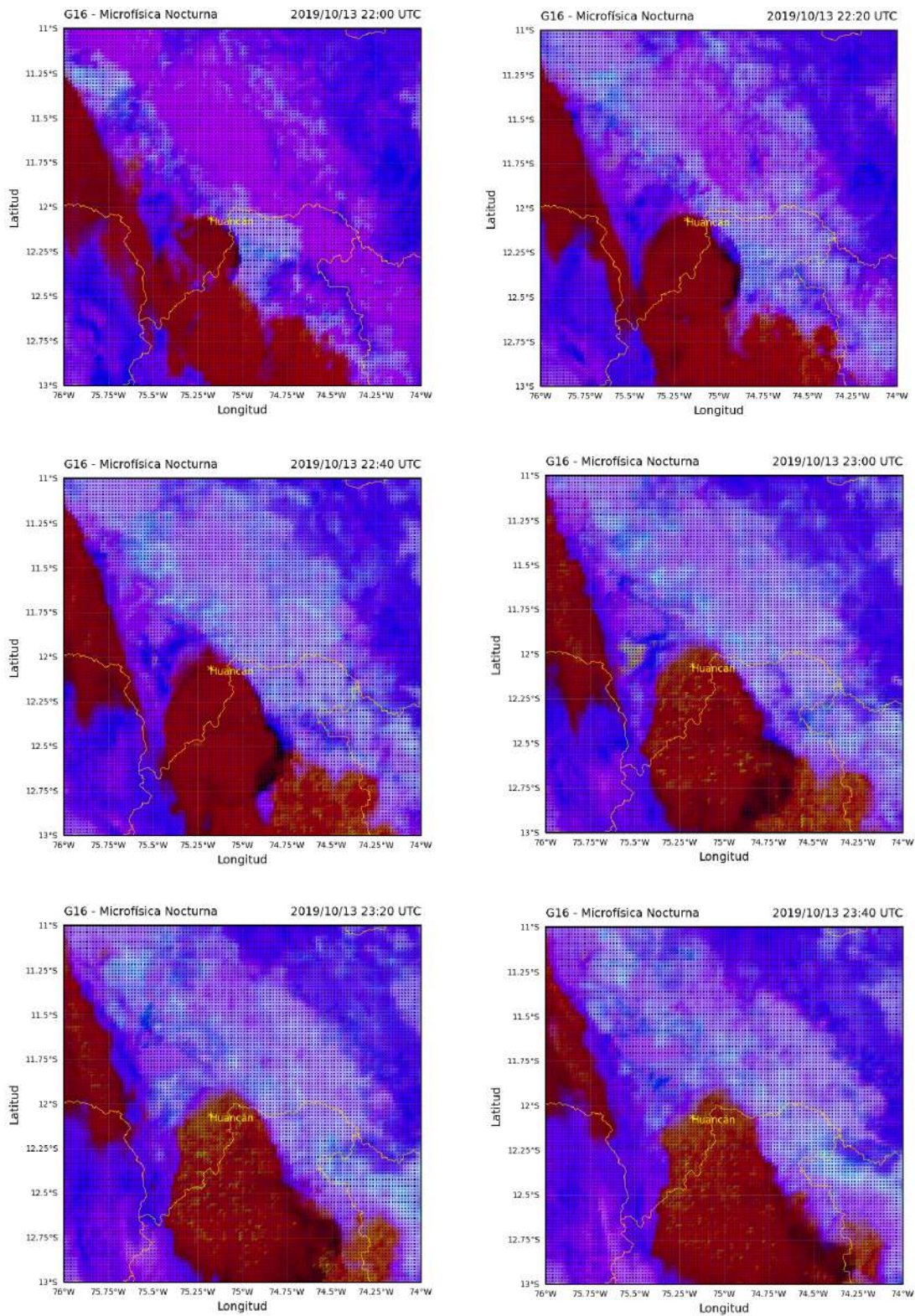


Figura 81: Imágenes de satélite de microfísica nocturna para el 13 de octubre de 2019 a las 22:00 UTC, 22:20 UTC, 22:40 UTC, 23:00 UTC, 23:20 UTC y 23:40 UTC



REPORTE COMPLEMENTARIO N° 2516 - 17/10/2019 / COEN - INDECI / 10:30 HORAS
 (Reporte N° 02)

ATENDIDA

PRECIPITACIONES PLUVIALES EN EL DISTRITO DE HUANCAN - JUNÍN

I. HECHOS:

El 13 de octubre de 2019, a las 16:30 horas, a consecuencia de las intensas precipitaciones pluviales acompañadas de granizo, se produjo el colapso del techo del local público "2 estrellas" ocasionando daños a la vida y salud de las personas en la Av. Panamericana Sur N° 1385, distrito Huancan, provincia de Huancayo.

II. UBICACIÓN:

DEPARTAMENTO	PROVINCIA	DISTRITO
JUNIN	HUANCAYO	HUANCAN

III. MAPA SITUACIONAL:



Elaborado por: J. Chumpitaz P.

Actualizado por: J. L. Bocanegra R.

Distribución: Casa de Gobierno, PCM, Ministerios, Gobiernos Regionales y Locales.

CENTRO DE OPERACIONES DE EMERGENCIA NACIONAL

Av. El Sol, Cdra. 4 - Chorrillos - Lima - Perú.

Tel. +511 224-1685 • www.indeci.gob.pe

Facebook: <https://www.facebook.com/indeci?fref=ts> • Twitter: <https://twitter.com/indeciperu>

Anexo 3: Continuación



IV. EVALUACIÓN DE DAÑOS:

Actualizado al 17 de octubre de 2019, a las 10:30 horas

UBICACIÓN	VIDA Y SALUD		VIVIENDAS Y LOCALES PUBLICOS
	PERSONAS FALLECIDAS	PERSONAS HERIDAS	LOCAL PUBLICO COLAPSADO
DPTO. JUNÍN			
PROV. HUANCAYO			
DIST. HUANCAN	6	28	1

Fuente: Dirección Desconcentrada INDECI - Junín.
Centro de Operaciones de Emergencia Sectorial del Ministerio de Salud.

V. ACCIONES:

Jueves, 17 de octubre de 2019

- ✓ El Centro de Operaciones de Emergencia Sectorial del Ministerio de Salud, informo que los pacientes internados en el Hospital Daniel Alcides Carrión de Huancayo se encuentran en estado de observación para ser dados de alta.
- ✓ El Centro de Operaciones de Emergencia ESSALUD, informo que :
 - Los pacientes internados en el Hospital Ramiro Priale de Huancayo se encuentran en estado de observación para ser dados de alta.
- ✓ La emergencia ha sido atendida y se procede al cierre de la misma.

FUENTE:

- Dirección Desconcentrada INDECI - Junín.
- Centro de Operaciones de Emergencia Regional de Junín.
- Centro de Operaciones de Emergencia Sectorial del Ministerio de Salud.
- Espacio de Coordinación Interinstitucional PNP del Ministerio Interior.

Chorrillos, 17 de octubre de 2019
COEN - INDECI

V.º B.º


Cnel Brig (r) Ricardo SEUAS DEL CASTILLO
Coordinador del Centro de Operaciones de Emergencia Nacional
Instituto Nacional de Defensa Civil


ROBERT DANIEL MÁRQUEZ FLORES
Especialista en GRC
Evaluador del Centro de Operaciones de Emergencia Nacional
Instituto Nacional de Defensa Civil

ANEXO:

1. Cronología de acciones.
2. Relación de personas heridas y fallecidas.
3. Vistas fotográficas.



ANEXO N° 01

Cronología de acciones

15.10.19.

- ✓ El Centro de Operaciones de Emergencia Sectorial del Ministerio de Salud, a través de su Reporte de Evento N° 3708-2019-COE SALUD-DIGERD, informó que dos Psicólogos se movilizaron al Hospital Daniel Alcides Carrión de Huancayo, a fin de brindar soporte emocional a las personas heridas y familiares.
- ✓ La Dirección Desconcentrada INDECI - Junín, informó que:
 - En el Hospital Daniel Alcides Carrión de Huancayo, cinco personas fueron dadas de alta y siete aún se encuentran internadas.
 - En el EsSalud, nueve personas fueron dadas de alta y cuatro continúan internadas.
 - En la Clínica Ortega, dos personas fueron dadas de alta y una se encuentra internada.

13.10.19

- ✓ La Dirección Desconcentrada INDECI - Junín, informó que:
 - Se trasladó a la zona de la emergencia a fin de coordinar las acciones de primera respuesta.
 - Doce personas heridas fueron evacuadas al Hospital Daniel Alcides Carrión de Huancayo, nueve heridos al Hospital de ESSALUD y dos heridos a la Clínica Ortega.
 - De los heridos evacuados hasta el momento 01 niño ha sido dado de alta.
 - Las labores de búsqueda y rescate de los brigadistas se suspendieron por medida de precaución, hasta el 14.10.19.
- ✓ El Espacio de Coordinación Interinstitucional PNP del Ministerio Interior, a través de su Reporte Preliminar Emergencia N° 050, informó que el personal de la Policía Nacional del Perú, pertenecientes a la sección de rescate UNEME PNP - Huancayo, se desplazaron al local de eventos "2 estrellas", donde constataron el colapso de techo del local y brindaron el apoyo correspondiente.
- ✓ El Centro de Operaciones de Emergencia Regional de Junín, informó que el Cuerpo General de Bomberos Voluntarios del Perú, brindó los primeros auxilios a las personas heridas, posteriormente fueron trasladadas al EsSalud de Chilca.
- ✓ El Centro de Operaciones de Emergencia Sectorial del Ministerio de Salud, mediante su reporte de evento N° 3708 - 2019 - COE SALUD - DIGERD, informó que se desplazaron a la zona de la emergencia 07 brigadistas del MINSA, 02 ambulancias y personal del SAMU, a fin de brindar los primeros auxilios a las personas heridas.

Elaborado por: J. Chumpitaz P.

Actualizado por: J. L. Bocanegra R.

Distribución: Casa de Gobierno, PCM, Ministerios, Gobiernos Regionales y Locales.

CENTRO DE OPERACIONES DE EMERGENCIA NACIONAL

Av. El Sol, Cdra. 4 - Chomillos - Lima - Perú.

Tel. +511 224-1685 • www. indeci.gob.pe

Facebook: <https://www.facebook.com/indeci?fref=ts> • Twitter: <https://twitter.com/indeciperu>

Anexo 3: Continuación ...



ANEXO N° 02

Relación de personas heridas

N°	APELLIDOS Y NOMBRES	EDAD	DIAGNOSTICO	ESTADO	LUGAR ATENCIÓN
1	HJAMAN CARBAJAL JUANA	60	TRAUMATISMO SUPERFICIALES MULTIPLES	OBSERVACIÓN	HOSPITAL DANIEL ALCIDES CARRION
2	CORDERO FLORES PRISCILA	22	TRAUMATISMO SUPERFICIALES MULTIPLES	OBSERVACIÓN	HOSPITAL DANIEL ALCIDES CARRION
3	SANCHEZ TURIN MARIA	33	TRAUMATISMO SUPERFICIALES MULTIPLES	OBSERVACIÓN	HOSPITAL DANIEL ALCIDES CARRION
4	SULLCA GABRIEL OSWALDO	60	TRAUMATISMO SUPERFICIALES MULTIPLES	OBSERVACIÓN	HOSPITAL DANIEL ALCIDES CARRION
5	CAMPOSANTO CORDOVA DORA	74	TRAUMATISMO SUPERFICIALES MULTIPLES	OBSERVACIÓN	HOSPITAL DANIEL ALCIDES CARRION
6	QUISPE HUARANGA	31	TRAUMATISMO SUPERFICIALES MULTIPLES	OBSERVACIÓN	HOSPITAL DANIEL ALCIDES CARRION
7	LUYA LOZANO ALFONSO	87	TRAUMATISMO SUPERFICIALES MULTIPLES	OBSERVACIÓN	HOSPITAL DANIEL ALCIDES CARRION
8	HERRERA ESTRELLA NERY	87	TRAUMATISMO SUPERFICIALES MULTIPLES	OBSERVACIÓN	HOSPITAL DANIEL ALCIDES CARRION
9	ORTEGA SALAZAR BERTA	50	TRAUMATISMO SUPERFICIALES MULTIPLES	OBSERVACIÓN	HOSPITAL DANIEL ALCIDES CARRION
10	MINAYA DE CAMBORDA, ESTHER	62	TRAUMATISMO ENCEFALO CRANEANO LEVE	OBSERVACIÓN	HOSPITAL ESSALUD
11	VILLON ARTICA, MANUEL	65	HERIDA EN EL MUSLO	OBSERVACIÓN	HOSPITAL ESSALUD
12	SINCHE FLORES, TEODORO	80	TRAUMATISMO ENCEFALO CRANEANO LEVE	OBSERVACIÓN	HOSPITAL ESSALUD
13	CAMPOSANO CORDOVA, VERA	74	POLITRAUMATISMO	OBSERVACIÓN	HOSPITAL ESSALUD
14	CAMBORDA HUACAYCHUCO, JORGE		CONTUSIONES LEVES	ALTA	HOSPITAL ESSALUD
15	QUISPE HUARINGA, ANANIAS		CONTUSIONES LEVES	ALTA	HOSPITAL ESSALUD
16	MAYO BARZOLA, RAUL		CONTUSIONES LEVES	ALTA	HOSPITAL ESSALUD
17	ARCE LUYA, ELVIS		CONTUSIONES LEVES	ALTA	HOSPITAL ESSALUD
18	REYMUNDO SINCHE, JOSE		CONTUSIONES LEVES	ALTA	HOSPITAL ESSALUD
19	RAMOS DE LA VEGA, ALEXANDER		CONTUSIONES LEVES	ALTA	HOSPITAL ESSALUD
20	LUYA LOZANO, ALFONSO		CONTUSIONES LEVES	ALTA	HOSPITAL ESSALUD
21	ORTEGA SALAZAR, BERTHA		CONTUSIONES LEVES	ALTA	HOSPITAL ESSALUD
22	CANTORIN CAMAYO, DANILA		CONTUSIONES LEVES	ALTA	HOSPITAL ESSALUD

Fuente: Centro de Operaciones de Emergencia Sectorial del Ministerio de Salud.

Relación de personas fallecidas

N°	APELLIDOS Y NOMBRES	EDAD
1	OLIVERA CORDOVA, JAIME	32
2	CONDOR PALACIOS, HERMINIO	45
3	MULLISACA VARGAS, GLADYS	25
4	HUNSIHUAY ROJAS, ALDER	46
5	CABRERA QUISPE, MARUJA	53
6	CHUCO GUERE, HERNÁN ROBERTO	39

Fuente: Centro de Operaciones de Emergencia Sectorial del Ministerio de Salud.

Elaborado por: J. Chumpitaz P.

Actualizado por: J. L. Bocanegra R.

Distribución: Casa de Gobierno, PCM, Ministerios, Gobiernos Regionales y Locales.

CENTRO DE OPERACIONES DE EMERGENCIA NACIONAL

Av. El Sol, Cdra. 4 - Chomillos - Lima - Perú.

Tel. +511 224-1685 • www.indeci.gob.pe

Facebook: <https://www.facebook.com/indeci?fref=ts> • Twitter: <https://twitter.com/indeciperu>

Anexo 4: Formato de entrevista a pobladores de Huancán

TABLA 4: FORMATO DE ENTREVISTA SOBRE EL IMPACTO DE LA GRANIZADA EN HUANCÁN

	Preguntas	Respuestas
1.	¿Qué daños le causó la granizada?	
2.	¿A qué horas ocurre generalmente las granizadas?	
3.	¿Cómo saben si va a ocurrir una granizada?	
4.	¿Qué hacen ante la posibilidad de la ocurrencia de granizada?	

Anexo 5. Reporte de diarios referidos a la caída de techo del local “dos estrellas”

Huancayo: Así quedó el local tras la caída del techo por granizada que dejó seis muertos (FOTOS Y VIDEO)

La estructura metálica del local de recepción “Dos Estrellas” se desplomó debido a la granizada e intensa lluvia que reportada en la zona.



REDACCION PERIODICA
relacion@p212.com.pe

Actualizado el 14/06/2019 03:54 p. m.

Al menos seis fallecidos y más de 25 heridos dejó la caída de un techo metálico de un local donde se llevaba a cabo una fiesta patronal en el distrito de Huancán, ubicado en la provincia de [Huancayo](#), región Junín. Según un reporte preliminar de la Policía Nacional, el accidente ocurrió a las 4:30 de la tarde.



El Comercio SUSCRIBIRSE

Huancayo: 12 personas continúan internadas tras desplome de techo en fiesta patronal

Seis personas fallecieron durante el accidente ocurrido en el local “Dos Estrellas”. Defensa Civil culminó el trabajo de búsqueda de víctimas y remoción de escombros



La caída de un techo de calamina dejó el trágico saldo de seis personas muertas. La intensa lluvia habría provocado el desplome de la frágil estructura. (Foto: Jeffry Sedeno)

ÚLTIMAS NOTICIAS

Saigo: intentos de Negro presentan emprendimiento

Huancayo: estudi bicicletas para tú y participar en co matemática | VID

Huancayo: sanción cliente de banco | 15 mil soles

PARA SUSCRIBIDORES

Fontes de prop podrían prohibir edificios que se falló del TC y sui

Fenómeno del afecta el calenim

Daniel Bedoya Ramos

14/06/2019 16:22

El momento de celebración que se vivía en el salón de recepciones Dos Estrellas, durante la fiesta