

# Cuarta Reunión del Grupo de Tarea de Implementación de Meteorología Aeronáutica (MET) del Grupo de Trabajo de Norteamérica, Centroamérica y Caribe (NACC/WG/MET/TF/4)

**Impacto de los fenómenos meteorológicos severos y extremos en la aviación internacional. Relación con la variabilidad y el cambio climático.**



# Cuarta Reunión del Grupo de Tarea de Implementación de Meteorología Aeronáutica (MET) del Grupo de Trabajo de Norteamérica, Centroamérica y Caribe (NACC/WG/MET/TF/4)

## Temas

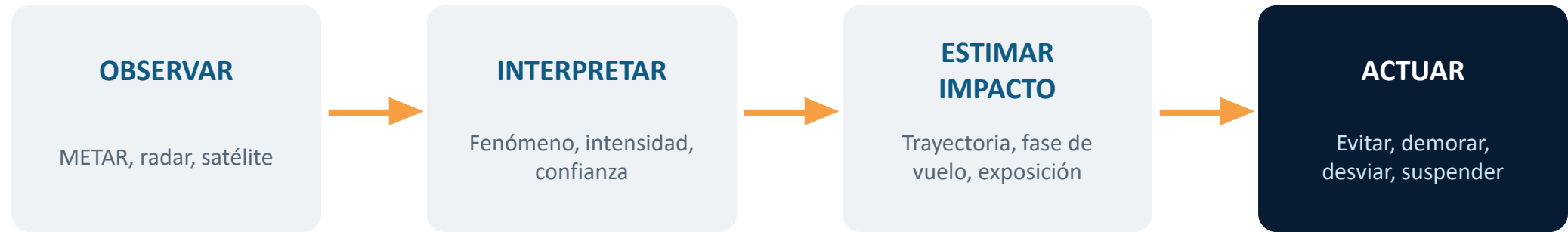
- Marco Internacional Actualizado
- Peligro Natural en el SMS
- El clima cambia la línea de referencia
- Arquitectura para un sistema de alerta temprana desde el SMS.
- Representación cartográfica basada en impactos para el SMS.



**Resultado final: un concepto demostrable para un sistema de alerta temprana MET.**

**La información MET solo crea seguridad cuando cambia una decisión**

---



**¿ Cómo convertir datos meteorológicos complejos en una alerta comprensible, trazable y operacional ?**

## Marco internacional

- La OACI está avanzando hacia servicios MET digitalizados, cuantitativos y centrados en información interoperable mediante SWIM e IWXXM. [ICAO: Guidelines for MET-SWIM Implementation](#)
- El proyecto AvRDP2 de la OMM investiga observación, nowcasting y pronóstico de convección, turbulencia, granizo, rayos, vientos fuertes y cizalladura para la aviación. [WMO AvRDP2](#)
- La OMM publicó en 2025 un compendio sobre cambio climático, peligros meteorológicos e impactos en las operaciones aéreas. WMO AeM Series No. 9
- El nowcasting aeroportuario contemporáneo combina observaciones, modelos de alta resolución y productos probabilísticos orientados a decisiones tácticas. [WMO: Turning aviation research into safer skies](#)





- **Sucesos climáticos violentos**

Huracanes, tormentas invernales, sequías, tornados, tormentas eléctricas, rayos, relámpagos y cizalladura del viento.

- **Condiciones meteorológicas adversas**

Engelamiento, precipitación engelante, lluvia fuerte, nieve, vientos y restricciones a la visibilidad.

- **Sucesos geofísicos**

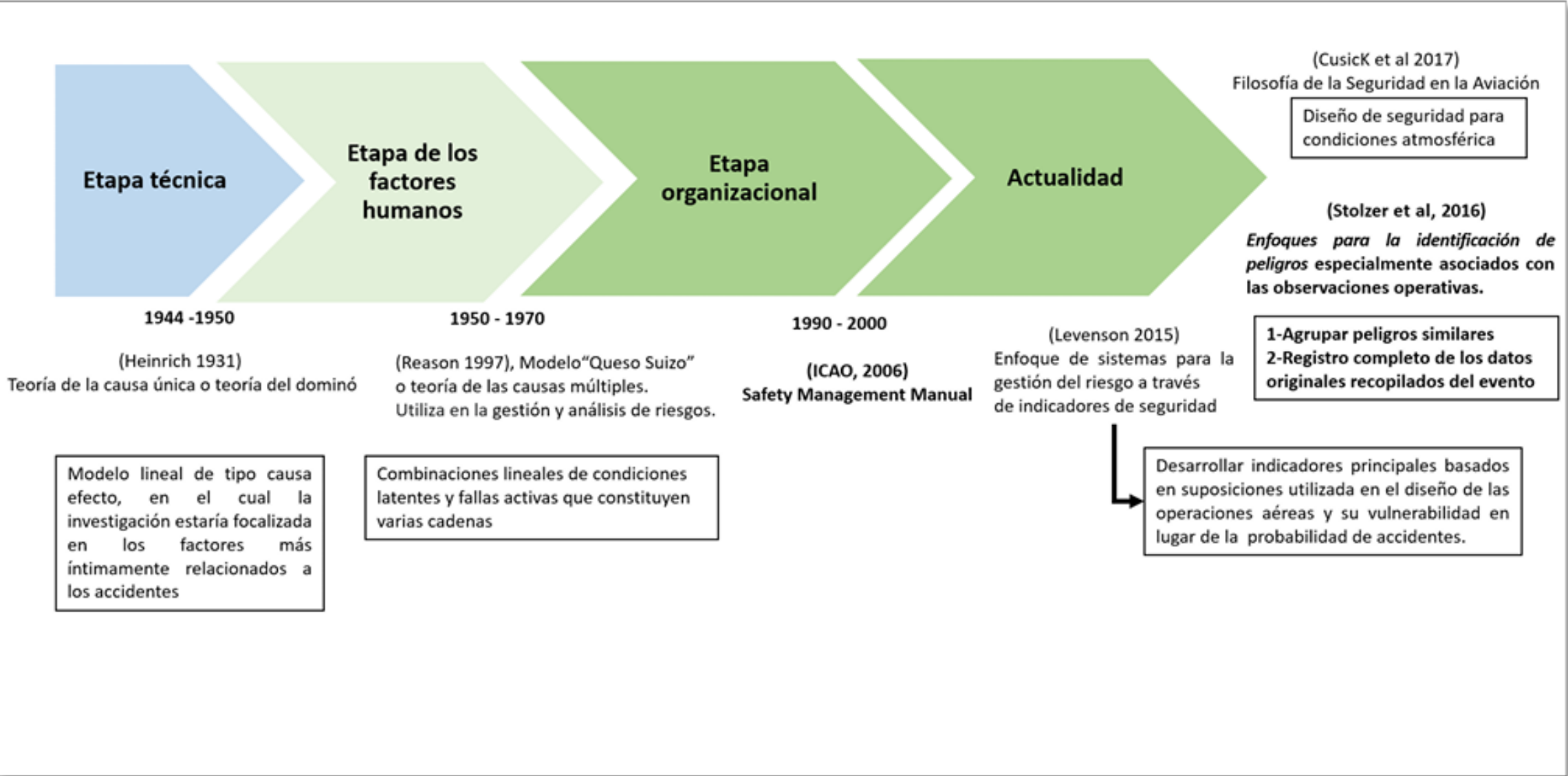
Terremotos, volcanes, tsunamis, inundaciones y deslizamientos de tierra.

- **Condiciones geográficas**

Terreno adverso o grandes masas de agua.



# Peligro Natural en el SMS



## El clima cambia la línea de referencia

---

### TIEMPO

Minutos–días

Caso operacional

METAR, radar, nowcast

### VARIABILIDAD

Meses–años

Cambios interanuales

ENSO, temporada, circulación

### CAMBIO CLIMÁTICO

Décadas

Cambio de distribución

Extremos, calor, precipitación,  
turbulencia

**El clima cambia la distribución de referencia, no la decisión de un vuelo.**

### Interpretación

- Las anomalías de temperatura no están distribuidas uniformemente.

-En 2024, la mayoría de las superficies continentales presentó temperaturas superiores al promedio 1991–2020, pero con diferencias regionales importantes.

-La OMM estimó que 2024 estuvo  $1.55 \pm 0.13$  °C por encima del promedio de 1850–1900. No significa que todos los lugares o fenómenos aumenten de igual manera.

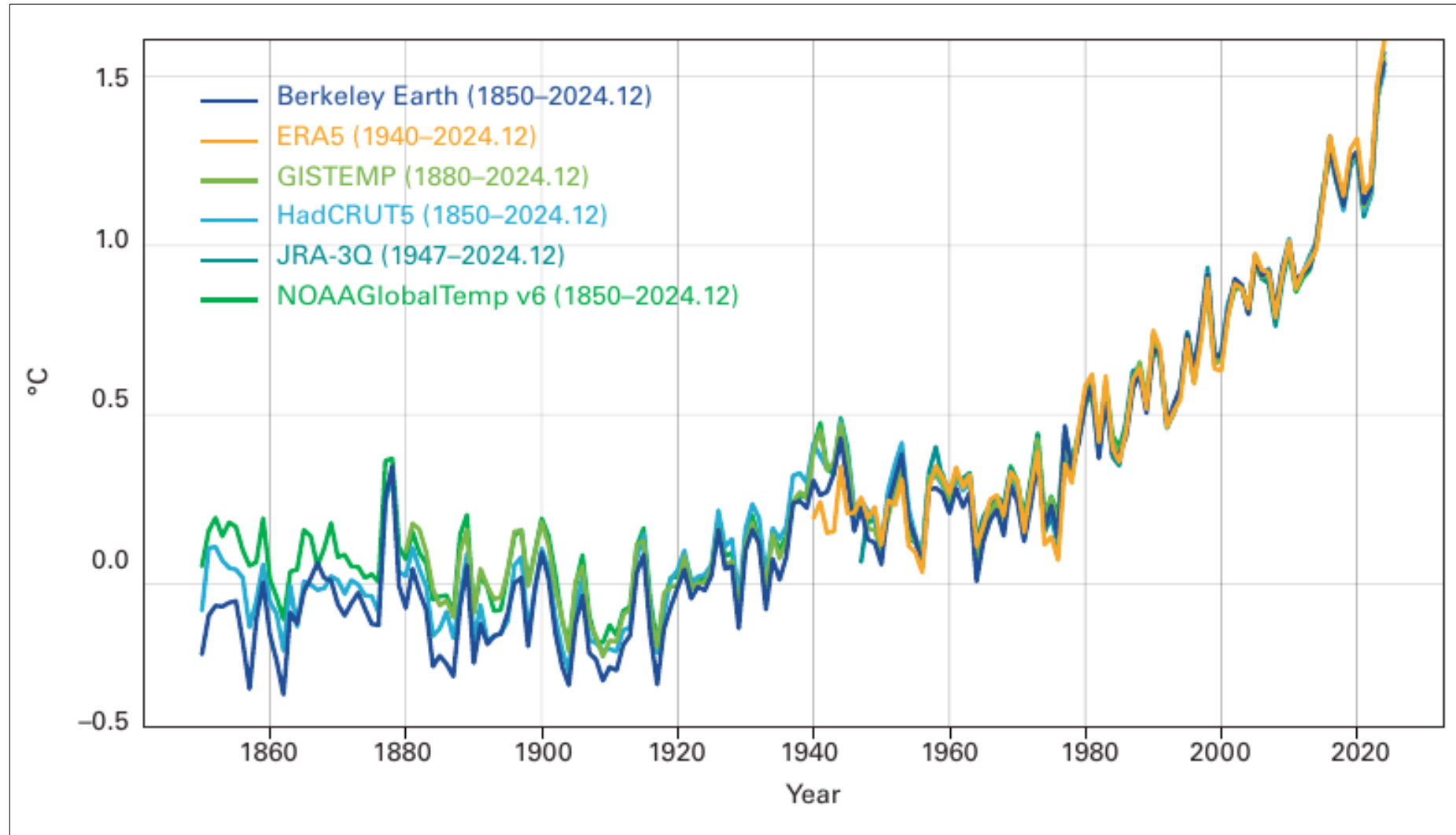


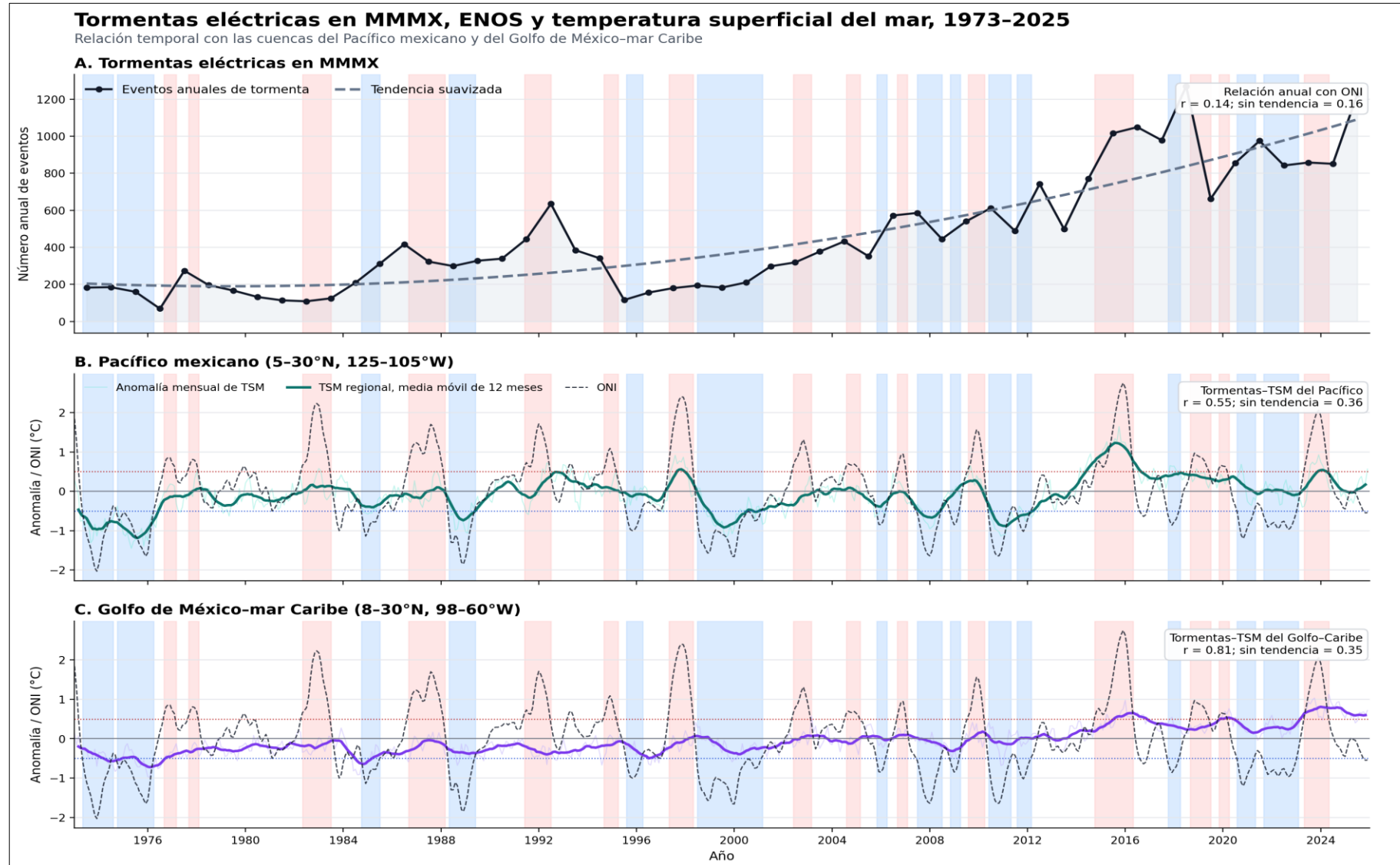
Figura No 1. Tendencia climática de largo plazo construida con seis conjuntos internacionales de datos.

# Los datos climáticos contextualizan la variabilidad, pero no sustituyen la vigilancia. La MJO puede modular episodios dentro de la temporada convectiva

-El ONI: Asociación directa débil con los reportes anuales de tormenta.

-La TSM regional comparte señal con la actividad convectiva, pero parte de esa relación puede provenir de tendencias comunes.

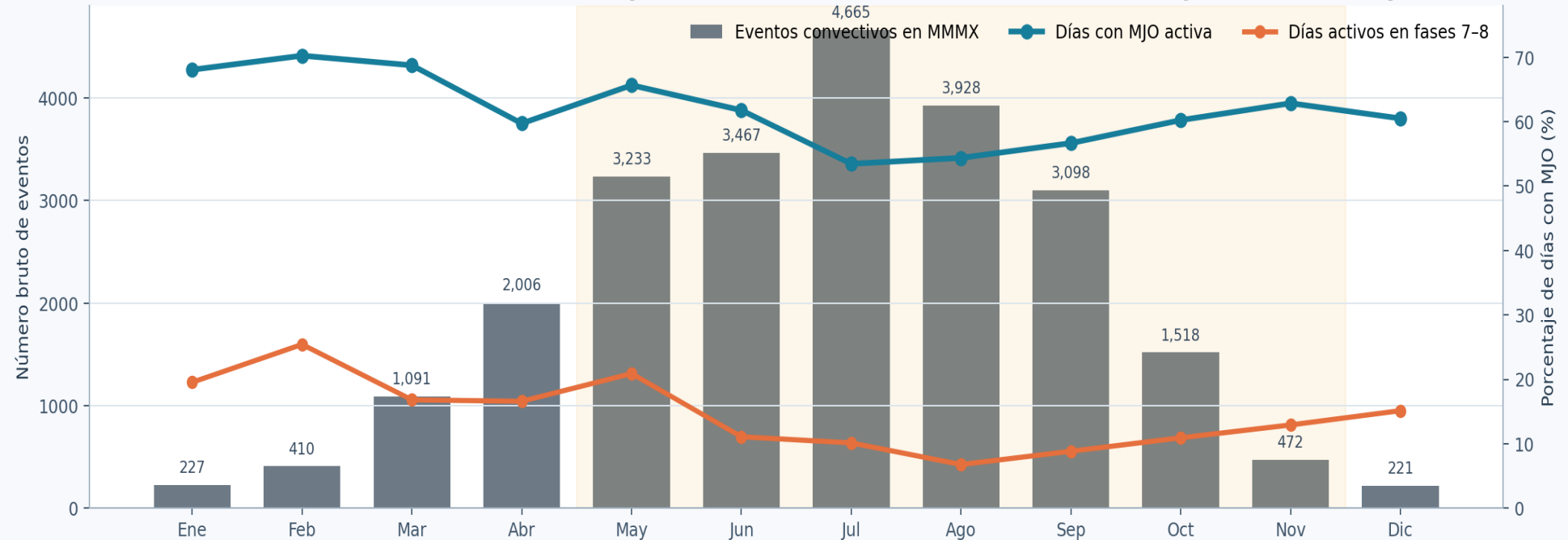
-Correlación no implica causalidad: deben evaluarse estacionalidad, tendencia, cobertura y significancia



## Relación mensual entre tormentas eléctricas en MMMX y actividad de la MJO

Conteo bruto de eventos 1973-2025 — sin normalización ni ajuste de tendencia · MJO climatológica 1974-febrero de 2024

### A. Los máximos estacionales no coinciden: julio concentra las tormentas, mientras la MJO total disminuye



- Esta anticorrelación refleja principalmente ciclos estacionales opuestos.
- La MJO puede modular episodios concretos dentro de mayo–noviembre.

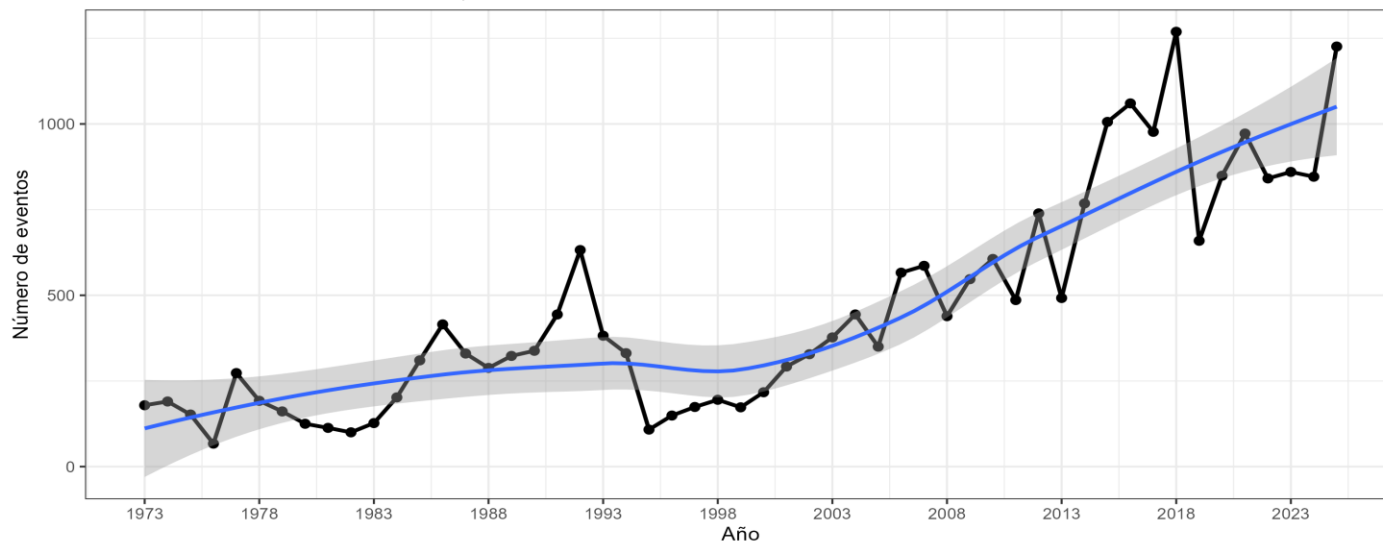


**LET**

El aire guarda la memoria del mundo.

## Distribución interanual del peligro por tormentas eléctricas MMM (1973-2025)

Eventos convectivos identificados en reportes METAR/SPECI



> 19,000

reportes TS  
1973-2025

> 2000

reportes de rachas

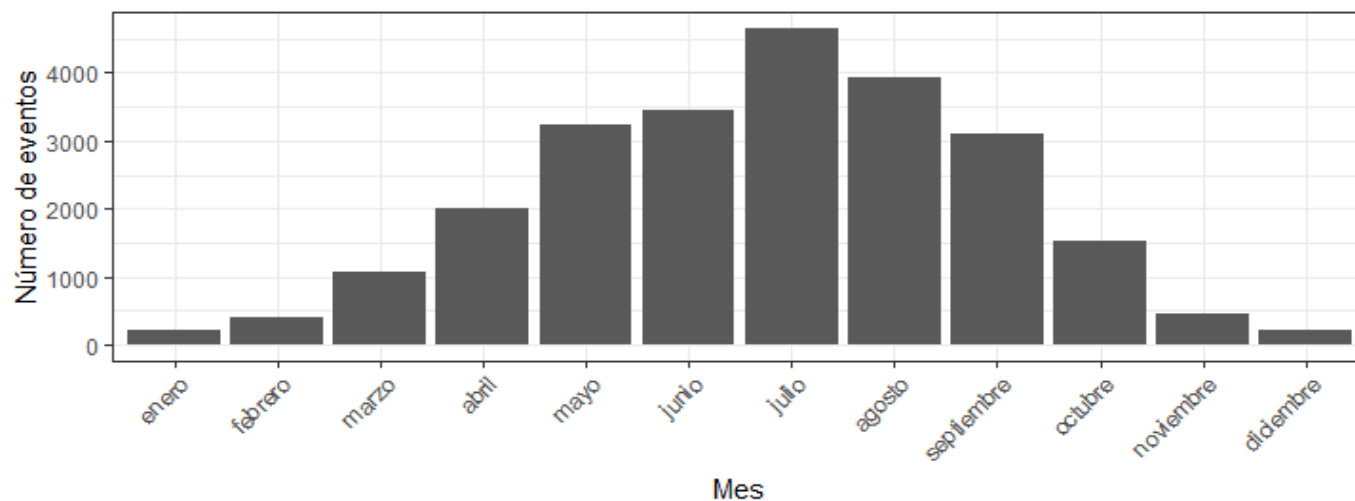
49

días con TS  
promedio anual

La climatología revela cuándo aumenta la exposición convectiva.

## Distribución mensual del peligro por tormentas eléctricas MMM 1973-2025

Eventos convectivos identificados en METAR/SPECI



## Una tormenta produce varios peligros al mismo tiempo

---

### TS / TSRA

Convección, lluvia, descargas

### GR / GS

Daño a estructura, motores y rotores

### SQ / rachas

Cambios bruscos del viento

### LLWS / microburst

Pérdida rápida de energía y sustentación

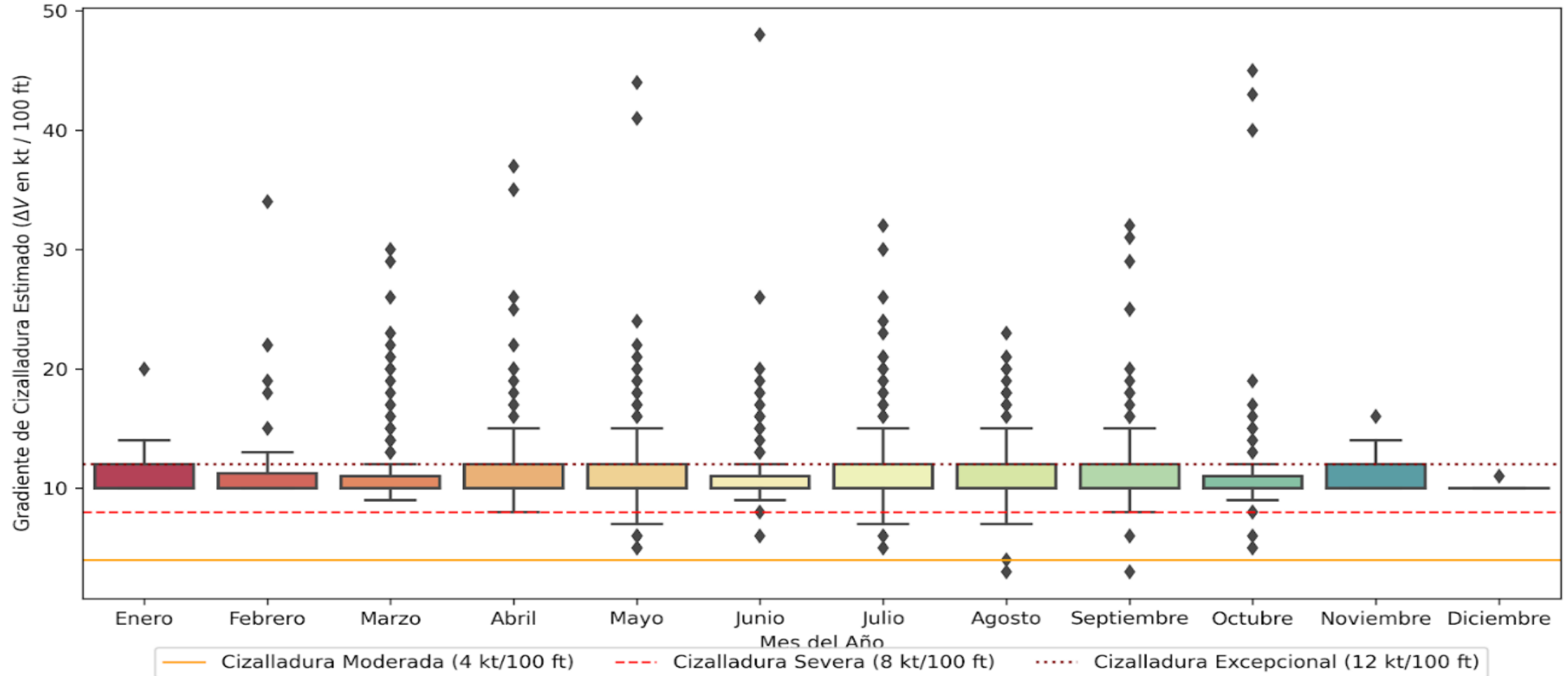
### +RA / baja VIS

Pérdida de referencias y capacidad

### Turbulencia / hielo

Lesiones, control y desempeño

## Evolución Anual de la Cizalladura Vertical de Capa Baja (LLWS) por Tormentas Eléctricas en MMMX



Estimación de la distribución mensual del gradiente vertical de viento estimado ( $\Delta V$ , kt 100 ft<sup>-1</sup>) asociado a eventos de tormentas eléctricas ocurridos entre 1992 y 2025 en el (MMM). Se incluyen como referencia operacional los umbrales de cizalladura moderada (4 kt 100 ft<sup>-1</sup>), severa (8 kt 100 ft<sup>-1</sup>) y excepcional (12 kt 100 ft<sup>-1</sup>), permitiendo evaluar la frecuencia e intensidad relativa de los eventos durante todo el año en la capa límite planetaria (CLP)

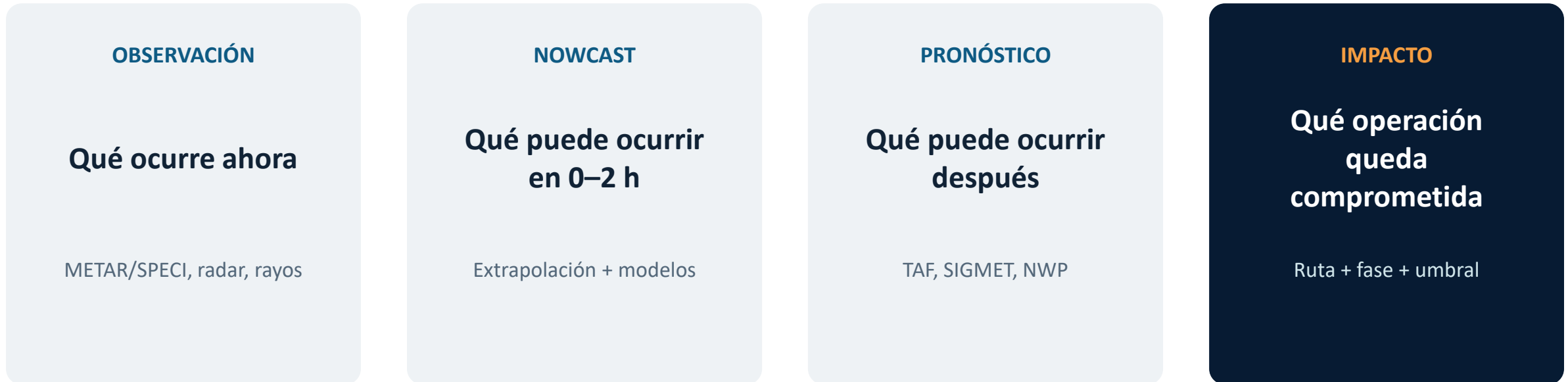
# Arquitectura para un sistema de alerta temprana desde el SMS.

|                        | AVIÓN                       | HELICÓPTERO                                                          |
|------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Entorno                | Pistas y rutas publicadas   | Helipuertos, zonas confinadas, relieve                               |
| Altura crítica         | Salida y llegada            | Gran parte de la misión                                              |
| Sensibilidad           | Viento cruzado, LLWS, pista | Rachas, obstáculos, rotor, visibilidad                               |
| Decisión típica        | Espera, desvío, alterno     | Ruta baja, punto de aterrizaje, abortar misión                       |
| Necesidad cartográfica | Corredor y aeródromo        | Corredor de baja altura y destino puntual-<br>Capa Limite planetaria |

- Helicópteros y aviones comparten el peligro, pero no la misma exposición
- La climatología local define qué vigilar; la operación define cuándo actuar

## Arquitectura para un sistema de alerta temprana desde el SMS.

-

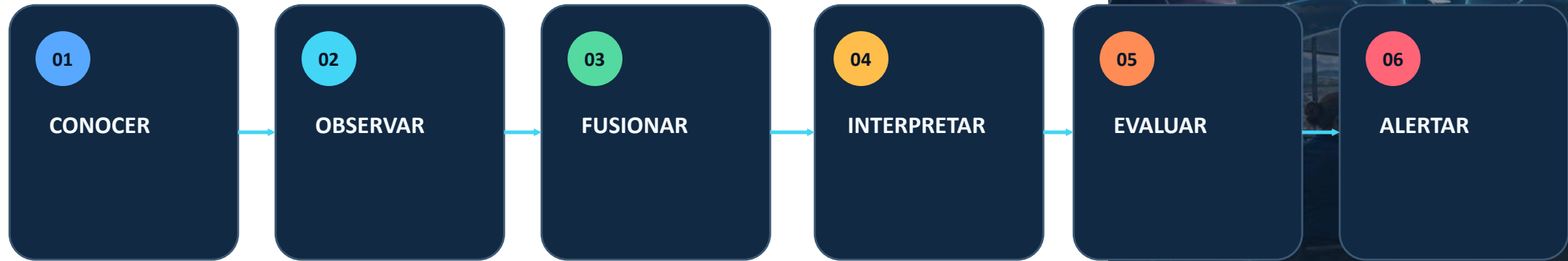


- Una alerta operacional debe incluir: fenómeno + lugar + tiempo + confianza + acción.
- Interpretar significa separar observación, pronóstico, probabilidad e impacto
- El sistema conecta evidencia, riesgo y decisión operacional.

## Arquitectura para un sistema de alerta temprana desde el SMS.

No basta saber qué ocurre en la atmósfera.

**Hay que anticipar qué operación puede afectarse y cuándo decidir.**



RESULTADO OPERACIONAL

**Decisión coordinada MET-ATC-OPERACIONES**

mitigación → riesgo residual → recuperación → aprendizaje

MHEWS ORIENTADO AL SMS

**MULTIFUENTE · MULTIESCALA ·  
PREDICTIVO · LOCALIZADO**

BRIEFING OPERATIVO

Fenómeno → ubicación → ETA → confianza → fase → consecuencia → acción → actualización

ESCALAMIENTO DE RESPUESTA

VERDE

**Vigilar**

monitoreo y sensores

AMARILLO

**Preparar**

coordinar y revisar  
escenarios

NARANJA

**Mitigar**

reducir capacidad · cambiar  
pista

ROJO

**Proteger**

suspender · cerrar · usar  
alternativos

RECUPERAR

**Restablecer**

inspeccionar · verificar · reabrir

APRENDER DE CADA EVENTO

Anticipación · detección · falsas alarmas · acción · recuperación

La retroalimentación ajusta umbrales, barreras y riesgo residual.

LA TRANSFORMACIÓN CLAVE

qué riesgo · qué operación  
qué decisión · cuándo



- Ninguna fuente resuelve sola el problema de detección, evolución e impacto.
- La mejor alerta fusiona fuentes con escalas distintas

## Arquitectura para un sistema de alerta temprana desde el SMS.

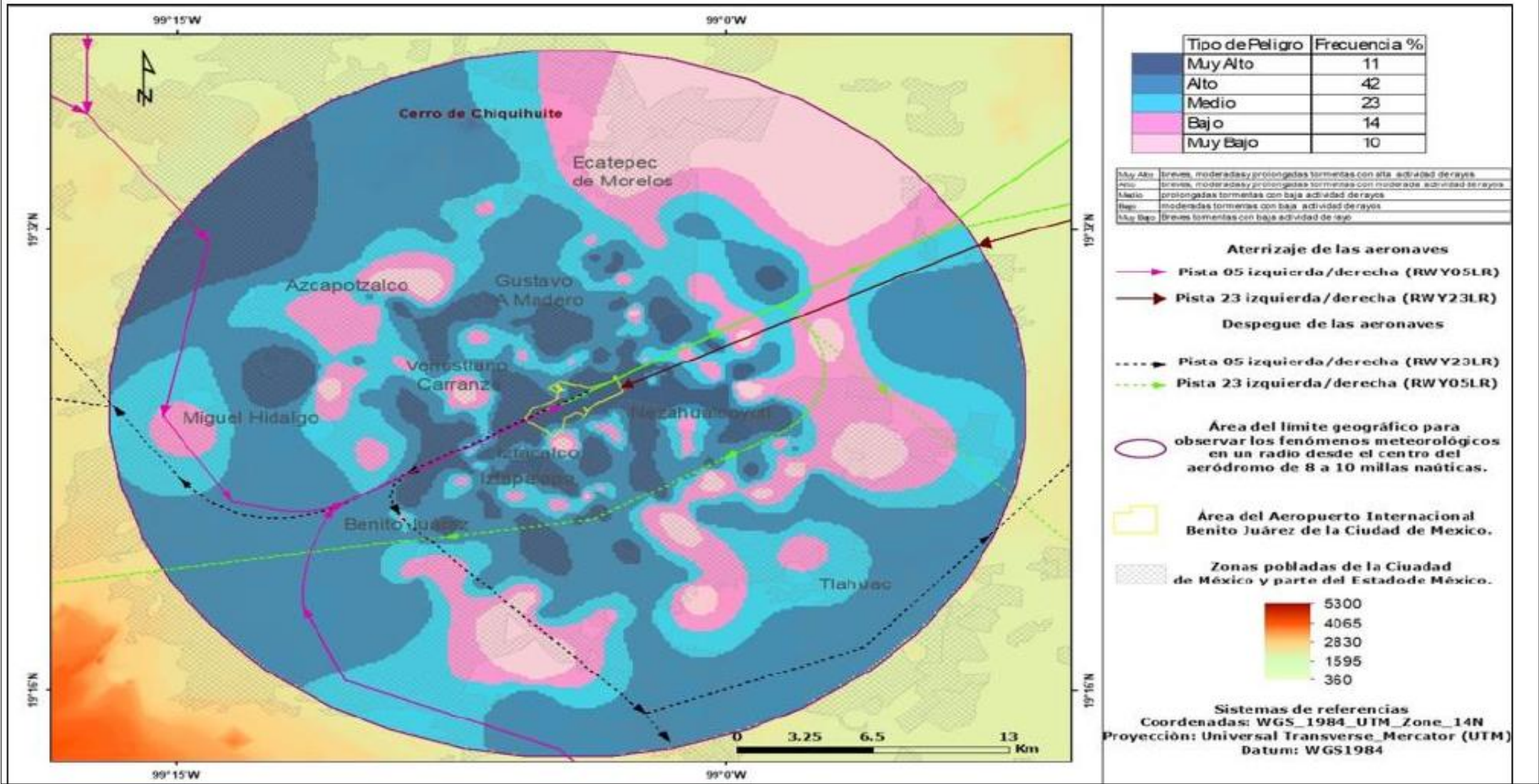
---



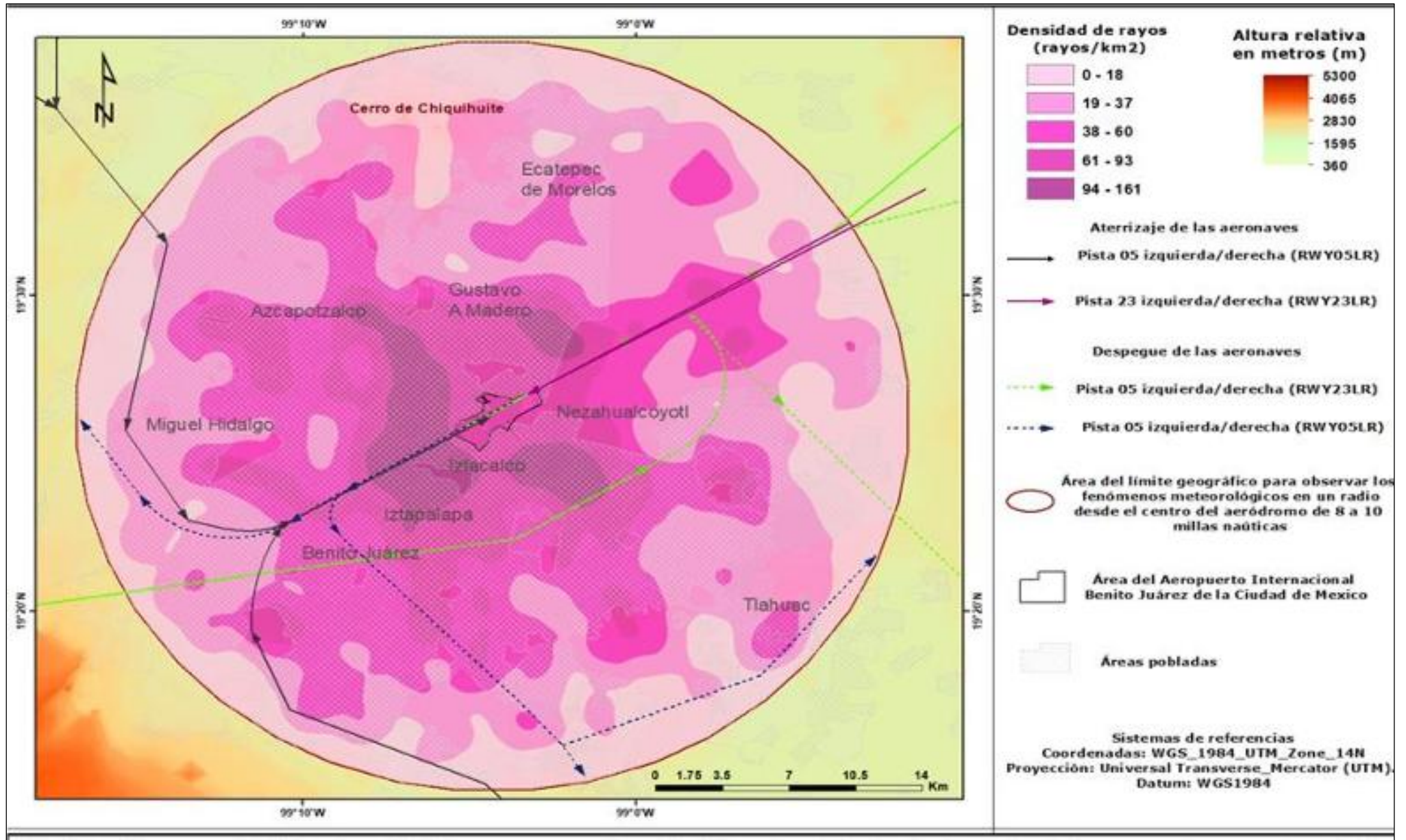
- Los menores márgenes de altura, velocidad y tiempo de reacción se concentran en salida y llegada.
- La vulnerabilidad cambia con la fase del vuelo.

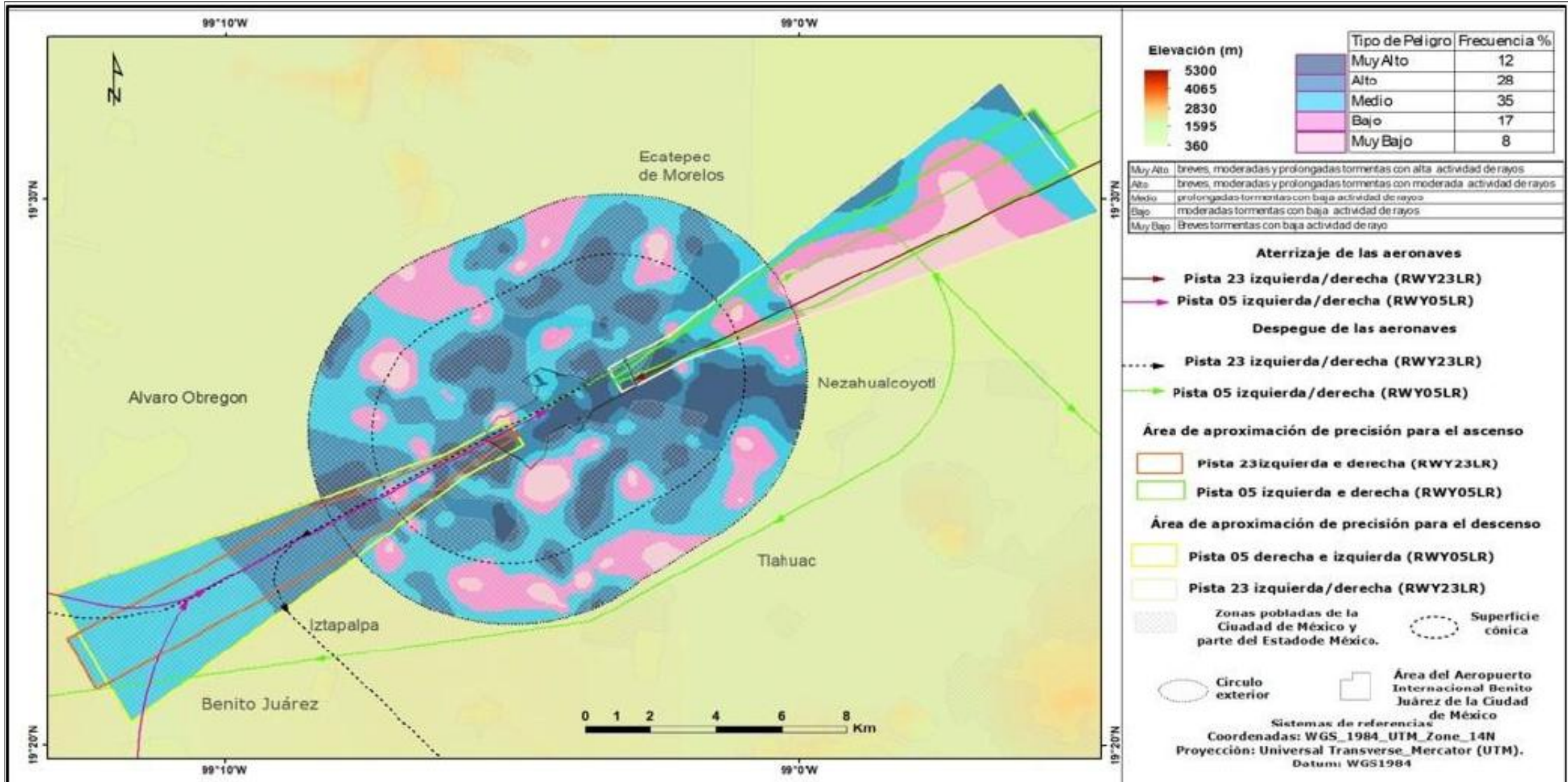
Representación cartográfica basada en impactos para el SMS localiza dónde se concentra la exposición

21 km · entorno

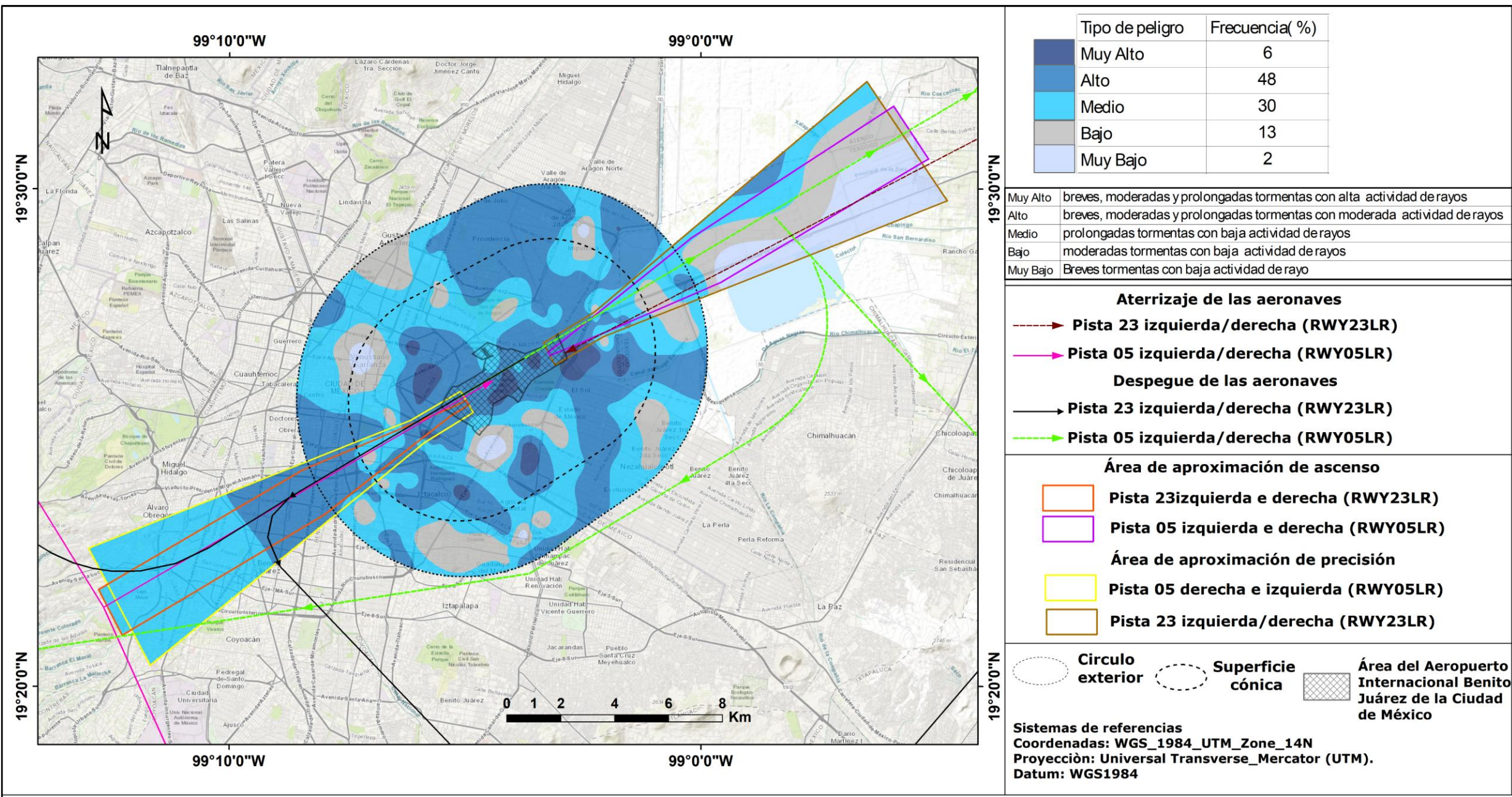


21 km · entorno

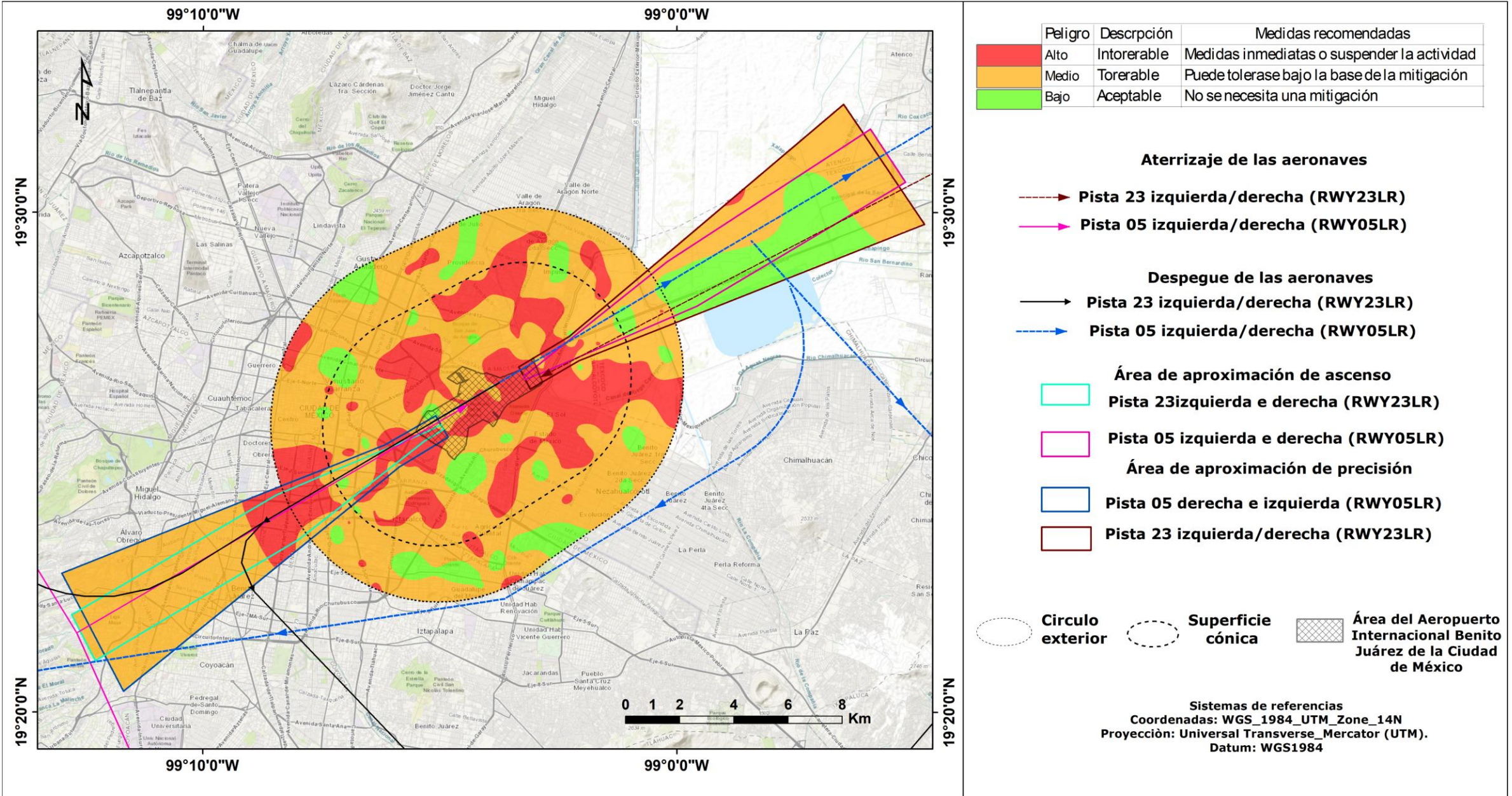


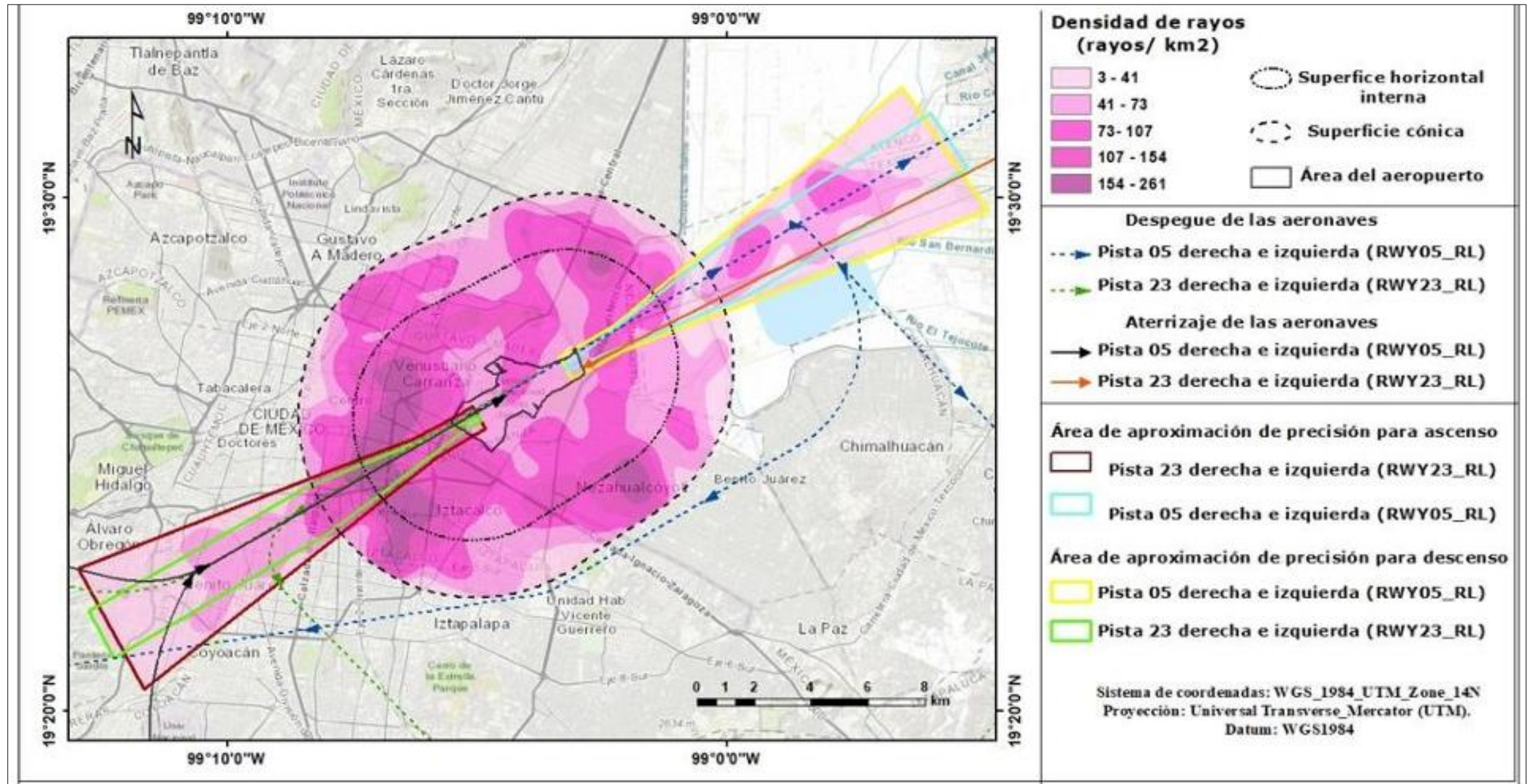


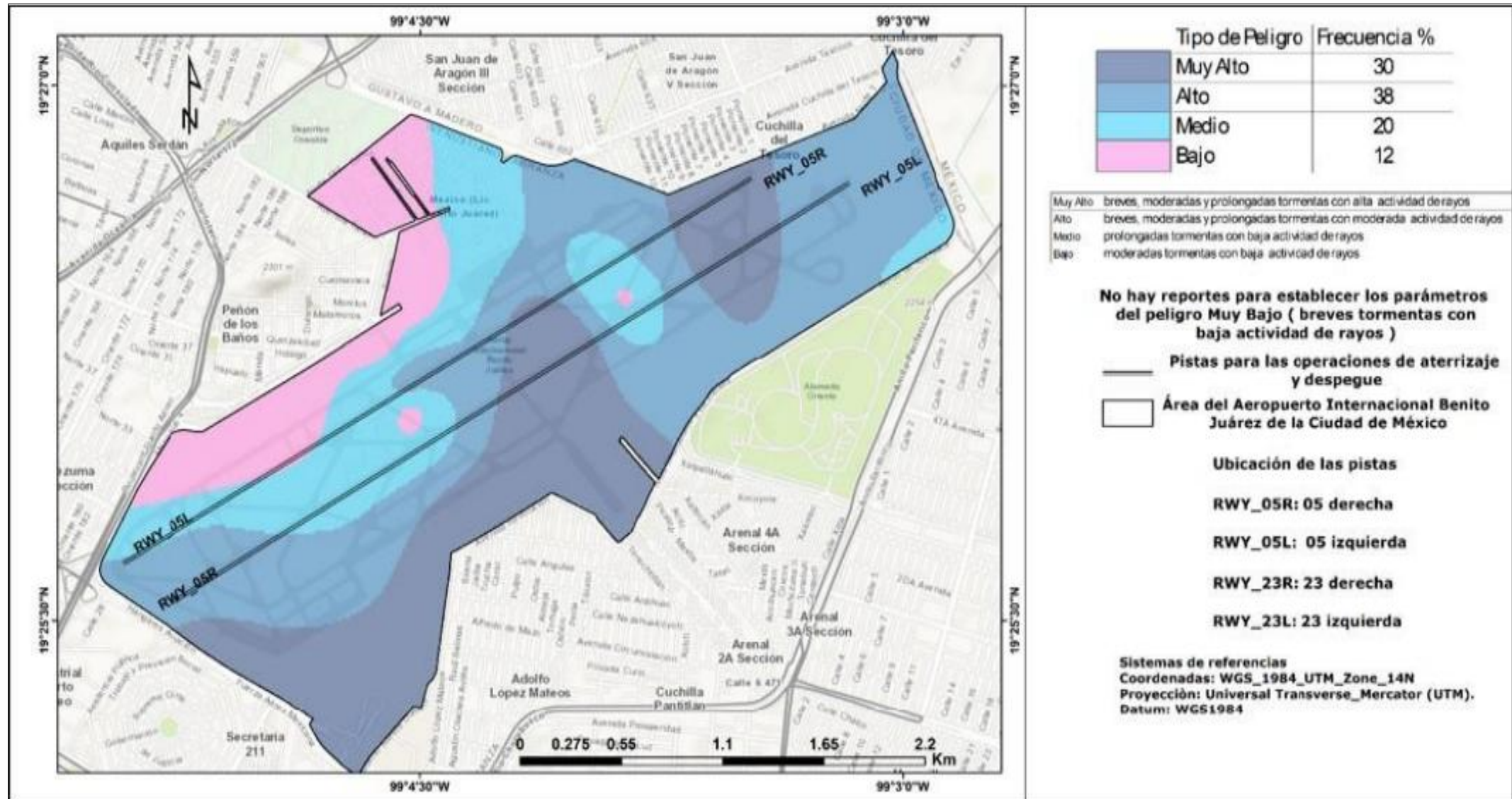
2018-2022



## Aproximación final

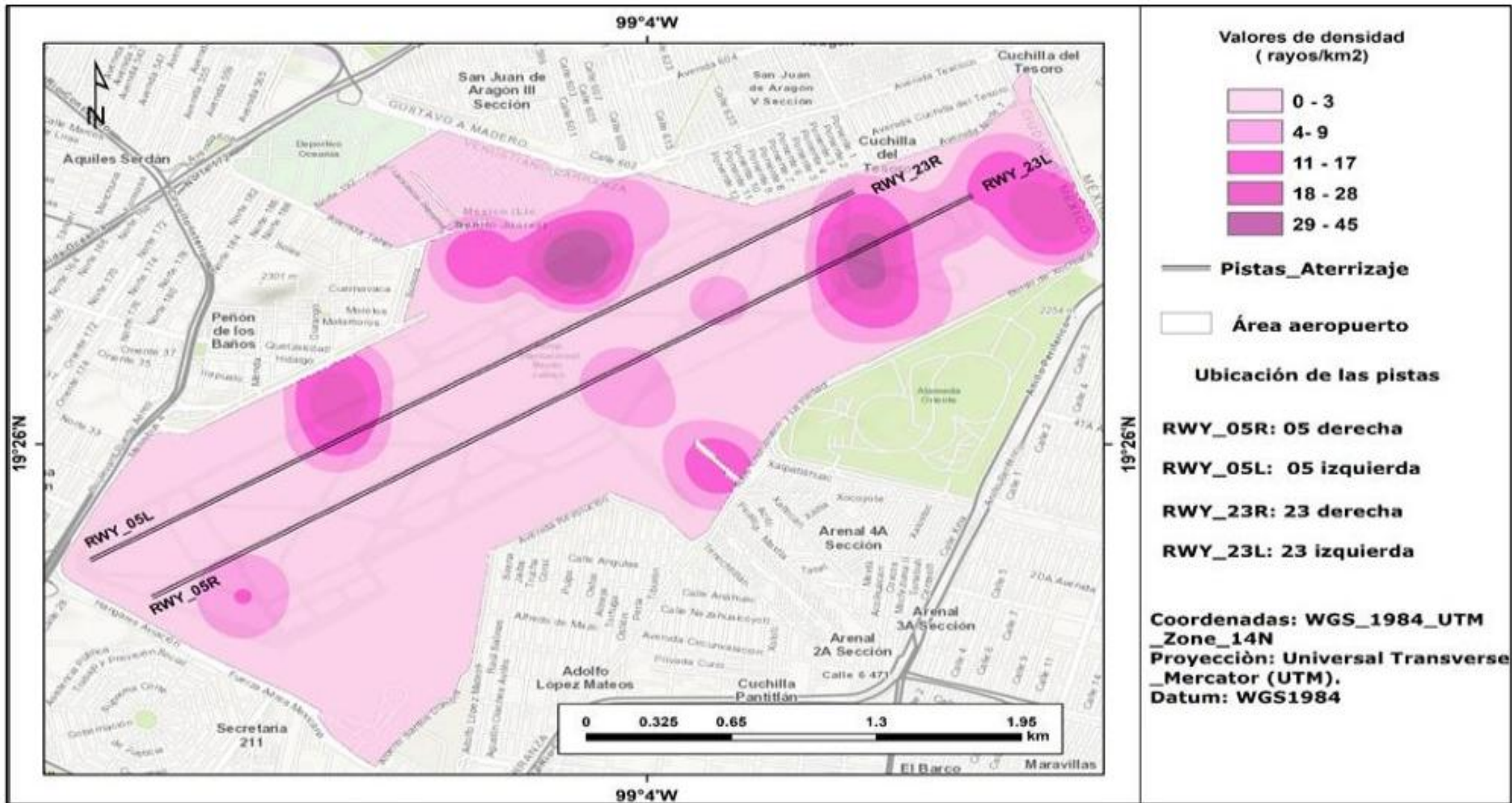






**Peligro por tormentas eléctricas en el Aeropuerto Internacional Benito Juárez, para el periodo 2018 – 2023. Fuente: Observaciones meteorológicas aeronáuticas del aeropuerto. Geostationary Lightning Mapper (GLM). Laboratorio Nacional de la Tierra.**

## aeródromo







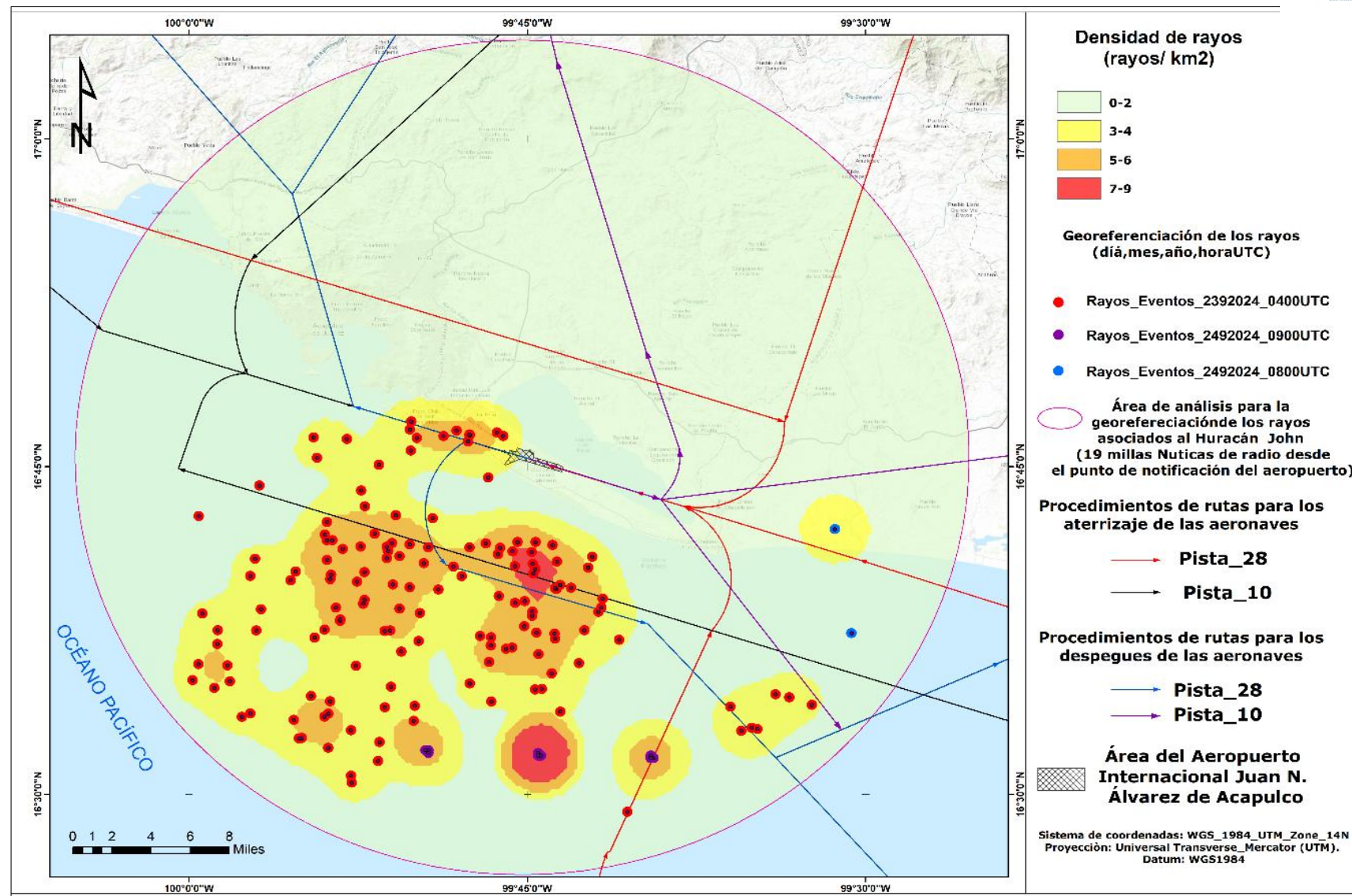
# El evento severo permite verificar la cadena completa de decisión

-**Observación:** descargas y evolución del sistema.

-**Interpretación:** sectores y corredores expuestos.

-**Evaluación:** fase de vuelo, severidad y capacidad.

-**Respuesta:** coordinación, restricción y recuperación.



Densidad de los rayos de durante el tránsito del Huracán John en el área de estudio. Fuente: Observaciones meteorológicas aeronáuticas del aeropuerto. Geostationary Lightning Mapper (GLM). Laboratorio Nacional de la Tierra. <https://www.flightradar24.com/16.60,-99.13/8> y <https://skyvector.com/>.

Capacidad transferible y disponible para su aplicación en las diferentes fases de vuelo, aeropuertos, TMA y sectores de vuelo.



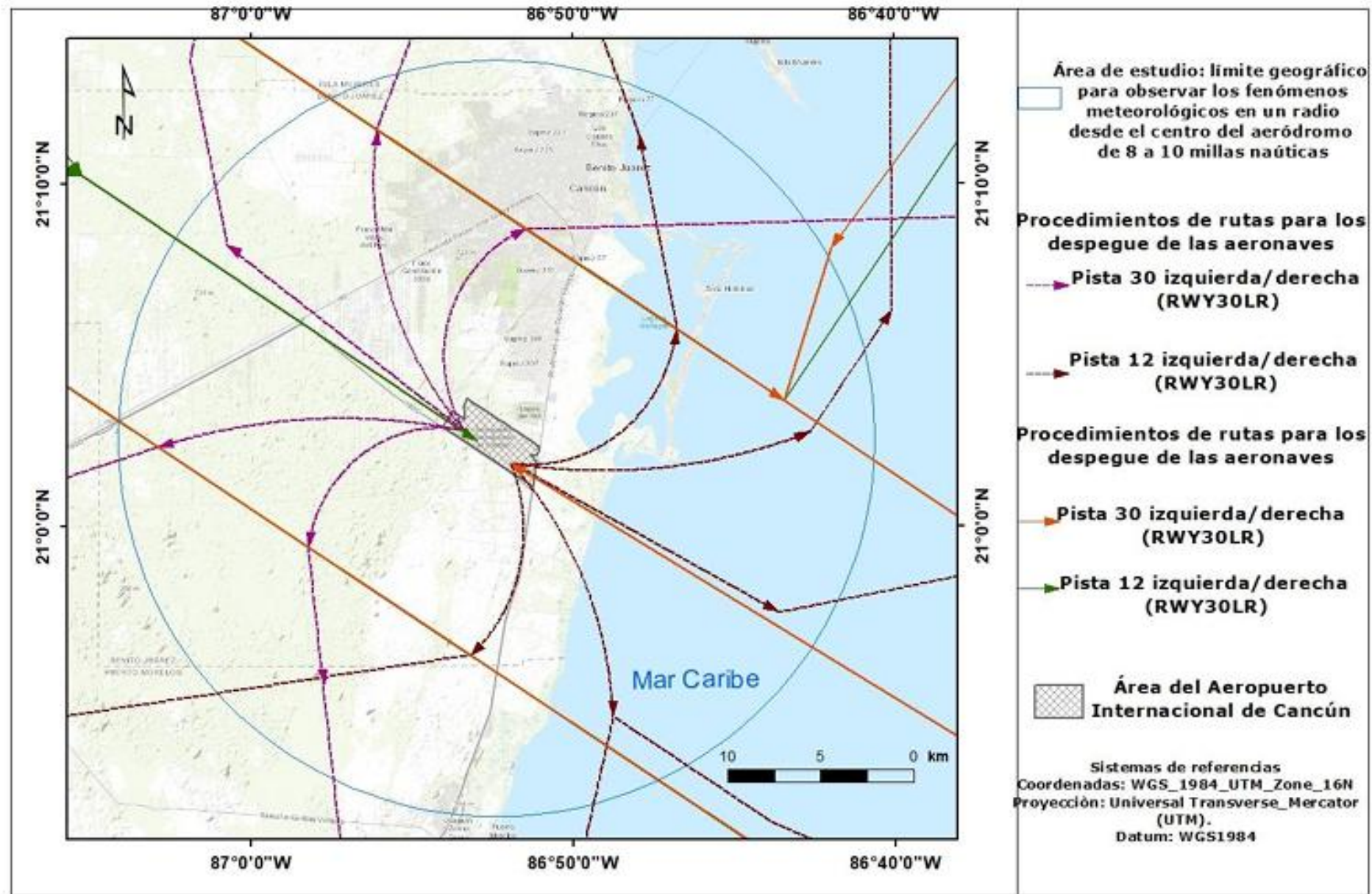


Figura. Área de estudio para el compendio de la representación cartográfica de mapas de peligro por tormentas eléctricas, en el contexto aeronáutico. Fuente. Datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía y de la información de vuelo del sitio <https://www.flightradar24.com/22.58,-85.12/8>,

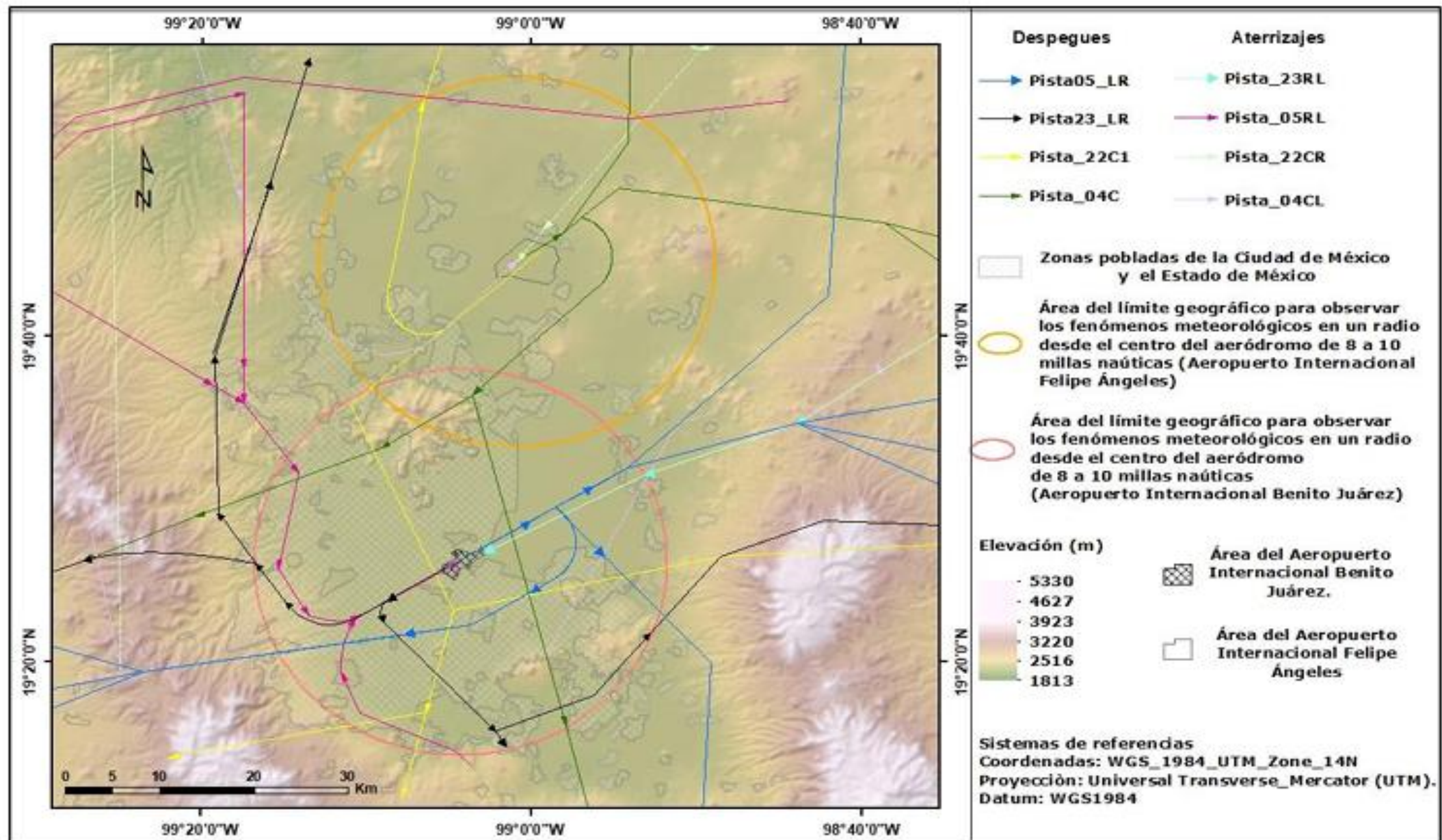


Figura 1. Áreas de estudios para el compendio de la representación cartográfica de mapas de peligro por tormentas eléctricas, en el contexto aeronáutico. Fuente. Datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía y de la información de vuelo del sitio <https://www.flightradar24.com/22.58,-85.12/8>,

# CONCLUSIONES

- 1 Interpretar** La meteorología aeronáutica debe evolucionar de la descripción del fenómeno hacia la anticipación del riesgo operacional. No es solo decodificar: es reconocer impacto.
- 2 Cartografiar** La eficacia del Sistema de Alerta Temprana depende de la fusión **MULTIFUENTE . MULTIESCALA · PREDICTIVO · LOCALIZADO**
- 3 Alertar** La comunicación directa MET–ATC-OPERACIONES convierte la alerta meteorológica en una barrera activa de seguridad. Es comunicar una acción verificable y oportuna.

**La meta no es producir más información meteorológica, sino transformarla para las decisiones más seguras.**

# Muchas Gracias



(+52) 9983111108

lemay081976@gmail.com