Organización de Aviación Civil Internacional
Grupo Regional de Planificación y Ejecución CAR/SAM (GREPECAS)

NOTA DE ESTUDIO

GTE/26 — NE/06rev
21/09/26

Vigésimo Sexta Reunión del Grupo de Trabajo de Escrutinio (GTE/26)
del Grupo Regional de Planificación y Ejecución CAR/SAM (GREPECAS)
Asíncrona: virtual del 9 al 25 de septiembre de 2026
Presencial: Ciudad de México, México, 12 al 16 de octubre de 2026

Cuestión 3 del Orden del Día: **Revisión de resultados del análisis de Grandes Desviaciones de Altitud (LHD) y del Modelo de riesgo de colisión (CRM)**
3.7 Presentación del CRM 2025 y un análisis de las causas que contribuyeron a estos riesgos en Regiones de información de vuelo (FIR) que presentaron un valor superior al Nivel deseado de seguridad (TLS) de la Evaluación de riesgo de colisión (CRA)

CÁLCULO DEL RIESGO DE COLISIÓN VERTICAL EN REGIONES CAR/SAM EN 2025

(Presentada por CARSAMMA)

RESUMEN EJECUTIVO

En esta Nota de Estudio se presenta la evaluación cuantitativa del Modelo de Riesgo de Colisión (CRM) correspondiente al año 2025. Asimismo, se analizan los factores contribuyentes en aquellas Regiones de Información de Vuelo (FIR) cuyos valores superaron el Nivel Deseado de Seguridad (TLS) en la Evaluación del Riesgo de Colisión Vertical (CRE).

Acción:	Las Acciones Sugeridas se encuentran detalladas en la Sección 7.
Objetivos Estratégicos:	• Todos los vuelos son seguros y protegidos • La aviación es sostenible en términos medioambientales • Movilidad fluida, accesible y confiable • Ningún país se queda atrás • Marco jurídico integral • Desarrollo económico
Referencias:	• Doc. 9574 - Manual sobre una separación vertical mínima de 300 m (1 000 pies) entre los niveles de vuelo FL 290 y FL 410 inclusive. Tercera edición, 2012. • Doc. 9937 - Procedimientos y métodos operacionales para los organismos regionales de vigilancia en relación con el uso de una separación vertical mínima de 300 m (1 000 pies) entre FL 290 y FL 410 inclusive. Segunda edición, 2019. • Datos de movimiento de aeronaves en espacio aéreo RVSM CAR/SAM (diciembre de 2025). • Informes validados de Grandes Desviaciones de Altitud (LHD) del año 2025.

1. Introducción

1.1 Este documento evalúa el cumplimiento de la seguridad operacional (Doc 9574 y Doc 9937 OACI) en el espacio aéreo RVSM CAR/SAM.
1.2. La agencia CARSAMMA presenta la evaluación de riesgo de colisión vertical del año 2025 para las 34 FIR de su jurisdicción.

2. Marco Metodológico y Criterios de Evaluación

2.1 Seguridad Operacional

2.1.1 Es obligatorio evaluar la seguridad en el espacio RVSM para garantizar que los cambios de tráfico o desviaciones no superen los límites de riesgo de colisión vertical regulados.

2.2. Modelo adoptado por Riesgo

2.2.1 Se utiliza el Modelo de Colisión Vertical de Reich (OACI) para estimar probabilísticamente el riesgo frente al Nivel Deseado de Seguridad (TLS).

2.3. Procesamiento de Datos

2.3.1 CARSAMMA procesa e integra datos multidimensionales analizando periodos de doce meses consecutivos.

2.4. Herramientas y Criterios de Validación de la Evaluación RVSM

2.4.1 La validación se fundamenta en:

- **Metodología de evaluación de riesgos:** Modelado analítico del riesgo de colisión por pérdida de separación.
- **Aeronavegabilidad continua y certificación RVSM:** Exigencia de aprobación operacional válida (Doc 9574) por el Estado de Registro/Operación.
- **Nivel Deseado de Seguridad (TLS):** Umbral regulatorio máximo de accidentes mortales por hora de vuelo (causas técnicas y operacionales).
- **Estabilidad del Error del Sistema (ASE) de altimetría:** Control estadístico continuo de la estabilidad del error altimétrico en las flotas.
- **Impacto de errores operacionales y contingencias:** Control de riesgos derivados de desviaciones operacionales o eventos en vuelo.
- **Medidas de mitigación de seguridad:** Implementación de barreras y mejoras procedimentales contra errores sistémicos.
- **Eficacia de los procedimientos ATC:** Verificación del control del tráfico aéreo para garantizar la integridad de trayectorias verticales.

3. Espacio Aéreo RVSM CAR/SAM

3.1. Monitoreo y Análisis de Datos RVSM

3.1.1 CARSAMMA monitorea de forma sistemática 34 Regiones de Información de Vuelo (FIR) en las regiones CAR/SAM, analizando cada FIR como un subsistema estocástico independiente.

3.2. Recogida de Datos de Muestreo de Tráfico (TDA)

3.2.1 La determinación de parámetros dinámicos y de frecuencia de paso se basó en el muestreo de datos de tráfico entre el 1 y el 31 de diciembre de 2025 en 31 FIR activas.

3.2.2 Se procesaron 10.184.412 horas de vuelo y 354.030 registros de trayectoria, distribuidos de la siguiente manera:

- Región CAR: 2.275.672 horas de vuelo (22,34% del total).
- Región SAM: 7.908.739 horas de vuelo (77,66% del total).

Nota:

Limitaciones clave

• **Ausencia de datos de diciembre de 2025**: Es importante destacar que CARSAMMA no recibió datos de movimiento de tráfico correspondientes a diciembre de 2025 de las FIR de **Cayena (SOOO), Paramaribo (SMPM)** y **Lima (SPIM)**. En consecuencia, dichos movimientos se excluyeron de la evaluación del riesgo de colisión vertical.

• **Vacíos en los datos históric**os: La falta de datos trasciende el periodo de diciembre de 2025. Los datos más recientes recibidos de cada FIR corresponden a fechas considerablemente anteriores:

o **Lima (SPIM)**: diciembre de 2024

o **Paramaribo (SMPM)**: diciembre de 2022

o **Cayena (SOOO)**: diciembre de 2020

Impacto operacional

• **Modelado de exposición incompleto**: El modelo de riesgo de colisión vertical se basa en datos de movimiento de tráfico para caracterizar la exposición y estimar la ocupación simultánea del espacio aéreo o de los niveles de vuelo.

• **Representatividad reducida**: La ausencia de datos actualizados de estas tres FIR compromete la integridad de la muestra de tráfico, lo que podría afectar la precisión y representatividad de la evaluación general del riesgo para la Región CARSAM.

Recomendación: Los resultados de la evaluación del riesgo de colisión vertical en la Región CARSAM deben interpretarse teniendo en cuenta esta limitación. Los análisis futuros deberían priorizar la obtención de datos actualizados por parte de las FIR afectadas.

3.3. Tratamiento de desviaciones significativas de altitud (LHD)

3.3.1 En 2025 se reportaron 507 eventos de desviación de altitud (LHD) en CAR/SAM. Tras el análisis y validación conjunta entre CARSAMMA, la OACI (oficinas NACC y SAM) e IATA, se integraron 309 eventos LHD en el Modelo de Riesgo de Colisiones (CRM).

4. Procesamiento de Datos de Movimiento RVSM

4.1. Los datos de la muestra del periodo de referencia se utilizaron para estimar los parámetros físicos y cinemáticos típicos del escenario operacional.

4.2. CARSAMMA filtró y procesó estadísticamente los datos en bruto. La Tabla 2 (Apéndice 1) consolida el perfil dimensional de las 20 flotas más representativas de la región CAR/SAM, definiendo así los parámetros de la "aeronave típica" usada en el modelo CRM de Reich.

5. Estimación del Riesgo de Colisión Vertical (CRE)

5.1. Análisis de los resultados de estimación de riesgos Se presentan los resultados cuantitativos de 2025, calculados probabilísticamente por FIR e integrados para las regiones CAR/SAM.

5.2. Parámetros metodológicos del modelo CRM Los datos operacionales y de tráfico utilizados para estimar los parámetros del modelo de Reich se detallan en la Tabla 3 (Apéndice 2).

5.3. Viabilidad técnica de RVSM en las regiones CAR/SAM La sostenibilidad operacional de la RVSM regional se evalúa mediante tres parámetros críticos de modelación:

- Frecuencia de paso equivalente ($\boldsymbol{N_x}$): Métrica que representa la densidad de tráfico y la exposición geométrica al riesgo en trayectorias en la misma dirección y opuestas (Tabla 4 - Apéndice 2). El valor consolidado estimado para el sistema CAR/SAM fue **1,6064 E-02**.
- Probabilidad de superposición lateral ($\boldsymbol{P_y(0)}$): Probabilidad cinemática de pérdida de separación lateral nominal de aeronaves que operan en la misma ruta, y valor de **6,28 E-02**.
- Probabilidad de superposición vertical ($\boldsymbol{P_z(1000)}$: Métrica probabilística estándar de pérdida por separación vertical de 1.000 pies para este ciclo, el valor paramétrico de **2,46 x E-08.**

5.4 La prueba de la viabilidad del sistema requiere el cumplimiento acumulado de:

- Margen de seguridad compatible con TLS global consolidado.
- Estabilidad estadística de la desviación del Error del Sistema de Altimetría (ASE).

5.4.1 La Tabla 5 (Apéndice 2) detalla los otros parámetros dinámicos estimados. Se refuerza que estos valores se calcularon teniendo en cuenta la premisa conservadora del aislamiento sistémico por región de información de vuelo.

6. Conclusiones sobre la estimación del riesgo de colisión vertical (CRE)

6.1. Evaluación del perfil de riesgo por FIR

6.1.1 A pesar de que las regiones CAR/SAM presentan un riesgo estimado de 0,7834 E-09 (por debajo del límite global de 5,0 E-09), las FIR de Puerto Príncipe, Asunción, La Paz, Curazao y Guayaquil superaron individualmente el TLS. Los principales factores identificados son:

- **Aeronaves sin aprobación RVSM:** Vuelos no certificados incrementan el riesgo. Se insta a los ANSP y CAA a aplicar controles estrictos en los planes de vuelo, incluidos los de aeronaves estatales.
- **Proximidad táctica entre aeronaves:** Tráficos en niveles adyacentes a menos de 30 minutos elevan la probabilidad de colisión. ***CARSAMMA emitirá estos informes para las FIR que superen el límite TLS.***
- **Severidad y duración de los LHD:** La duración y los niveles cruzados en un evento penalizan el cálculo de riesgo, especialmente en FIR oceánicas o con puntos de notificación distantes.
- **Cumplimiento de errores técnicos**: El riesgo por errores técnicos (**2,88 E-11**) es muy inferior al techo regulatorio (**2,5 E-09**), confirmando la solidez en la certificación de altimetría de las flotas.

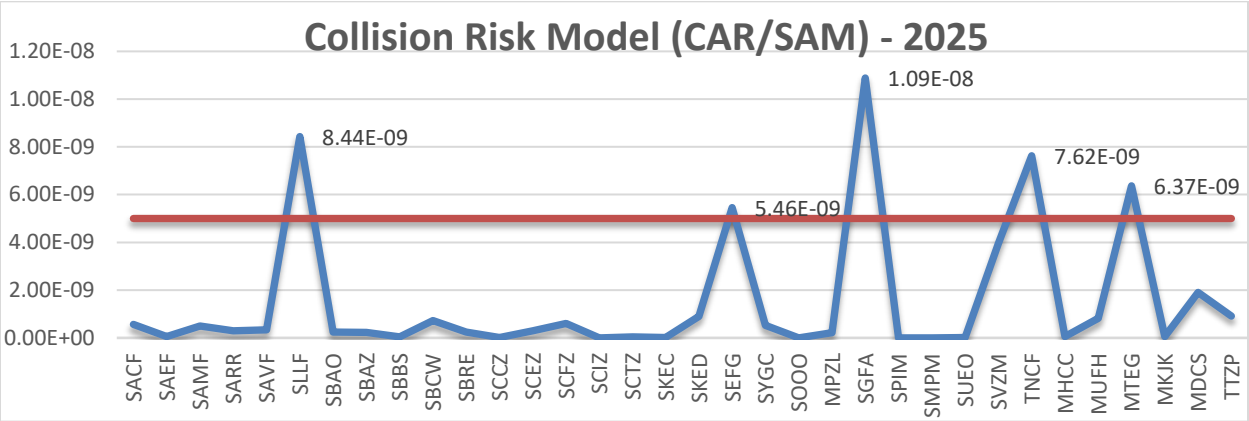


Figura 1 - Estimación del Riesgo de Colisión (CRE)

CAR/SAM RVSM airspace – Estimated Flight Hours = 10,184,412 hours			
Source of Risk	**Estimated Risk**	**TLS**	**Observation**
Technical Error	**0.0288 x 10-9**	**2.5 x 10-9**	**Below**
Operational Error	**0.784 x 10-9**	**-**	**-**
Risk	**0.7834 x 10-9**	**5.0 x 10-9**	**Below**

Tabla 1 – Riesgo CAR/SAM

7. Acciones Sugeridas

7.1. La reunión está invitada a:

a) Tomar nota de la información técnica y los datos presentados; y
b) Formular recomendaciones para apoyar las medidas continuas de monitoreo y mitigación de eventos LHD lideradas por CARSAMMA.

— — — — — — — — — — —

APÉNDICE 1

MODELO DE RIESGO DE COLISIÓN VERTICAL DE REICH

$$N_{ax} = 2P_y(0)P_z(0)\left(\frac{\overline{|\dot{x}(m)|}}{2\lambda_x} + \frac{\overline{|\dot{y}_0|}}{2\lambda_y} + \frac{\overline{|\dot{z}_0|}}{2\lambda_z}\right)\frac{2\lambda_x}{\overline{|\dot{x}(m)|}}\frac{1}{T}\sum_s E(s)Q(s)$$

Figura 2 – Fórmula general del modelo REICH del Riesgo de Colisión Vertical

ACFT Type (Top 20)	Lenght λx	Wingspan λy	Height λz	Flights %	Lenght λx X %	Wingspan λy X %	Height λz X %
A320	0.020286	0.018413	0.00635	18.81%	0.003816	0.003463	0,001194
B738	0.021328	0.01933	0.006749	15.10%	0.003221	0.002919	0,001019
A20N	0.020286	0.018413	0.00635	12.12%	0.002459	0.002232	0,000770
B38M	0.021312	0.019395	0.006641	11.54%	0.002459	0.002238	0,000766
A321	0.024033	0.018413	0.00635	6.05%	0.001454	0.001114	0,000384
B763	0.029665	0.025686	0.008558	4.36%	0.001293	0.001120	0,000373
B39M	0.022765	0.019395	0.006641	3.72%	0.000847	0.000721	0,000247
A21N	0.024033	0.018413	0.00635	3.37%	0.000810	0.000621	0,000214
B789	0.033909	0.032451	0.009179	2.57%	0.000871	0.000834	0,000236
A332	0.031749	0.032559	0.009395	2.46%	0.000781	0.000801	0,000231
B788	0.030616	0.032451	0.009125	2.36%	0.000723	0.000766	0,000215
A319	0.018272	0.018413	0.000635	2.36%	0.000431	0.000435	0,000015
B737	0.018898	0.018521	0.006749	2.07%	0.000391	0.000383	0,000140
A359	0.036123	0.034557	0.009125	1.94%	0.000701	0.000670	0,000177
E295	0.022408	0.01896	0.00589	1.84%	0.000412	0.000349	0,000108
E190	0.019568	0.015507	0.005707	1.75%	0.000342	0.000271	0,000100
B772	0.034411	0.0329	0.01	1.34%	0.000461	0.000441	0,000134
B77W	0.039903	0.034989	0.009989	1.06%	0.000423	0.000371	0,000106
A339	0.034341	0.032559	0.009098	0.94%	0.000323	0.000306	0,000086
A333	0.034341	0.032559	0.009098	0.93%	0.000319	0.000303	0,000085
Typical acft				**96.70%**	**0.022538**	**0.020358**	**0.006600**

Tabla 2 – Los 20 tipos de aeronaves más utilizados que volaron bajo el régimen RVSM en las regiones CAR/SAM (Las medidas de dimensión se expresan en millas náuticas)

— — — — — — — — — — —

APÉNDICE 2

PARÁMETROS DEL CRM

CRM Parameter	Description
N_{az}	Number of fatal accidents per flight hour due to loss of vertical separation.
S_z	Vertical Separation minimum.
$P_z(S_z)$	Probability that two aircraft nominally separated by the vertical separation minimum S_z are in vertical overlap.
$P_y(0)$	Probability that two aircraft on the same track are in lateral overlap.
λ_x	Average aircraft length.
λ_y	Average aircraft wingspan.
λ_z	Average aircraft height with undercarriage retracted.
S_x	Length of longitudinal window used to calculate occupancy.
$E_z(\text{same})$	Same direction vertical occupancy.
$E_z(\text{opp})$	Opposite direction vertical occupancy.
V_m	Average aircraft ground speed.
$\dot{Y}_m$	Average relative cross track speed for an aircraft pair nominally on the same track.
$\dot{Z}_m$	Average relative vertical speed of an aircraft pair that have lost all vertical Separation

Tabla 3 - Estimaciones de los parámetros del CRM

	Same Direction	Opposite Direction	Equivalent	Flight Hours
Pass Frequency	0.008942	0.073876	0.016064	10,184,412

Tabla 4 – Frecuencia de paso

CAR/SAM	Ez (same)	Ez (opp)	V	ΔV (same)	ΔV (opp)
	0.0788701	0.018462	426.27 kt	23.388 kt	857.5724 kt

Tabla 5 – Parámetros físicos y dinámicos

— — — — — — — — — — —

APÉNDICE 3

ANÁLISIS DE LHD

Month	# LHD	Duration (min)	Crossed Levels
January	29	198.53	32
February	27	322.57	28
March	24	349.80	19
April	34	553.50	15
May	17	181.00	20
June	6	7.00	8
July	18	22.00	16
August	26	173.50	30
September	26	272.00	17
October	29	271.98	23
November	43	1058.80	26
December	30	112.50	36
Total	309	3523.18	270

Tabla 6 – LHD por mes (CRM)

Code	A	B	C	D	E1	E2	F1	F2	G	H	I	J	K	L	M	Total
#LHD	4	2	0	3	126	75	18	1	0	3	5	1	0	69	2	309

Tabla 7 – Número de LHD validados

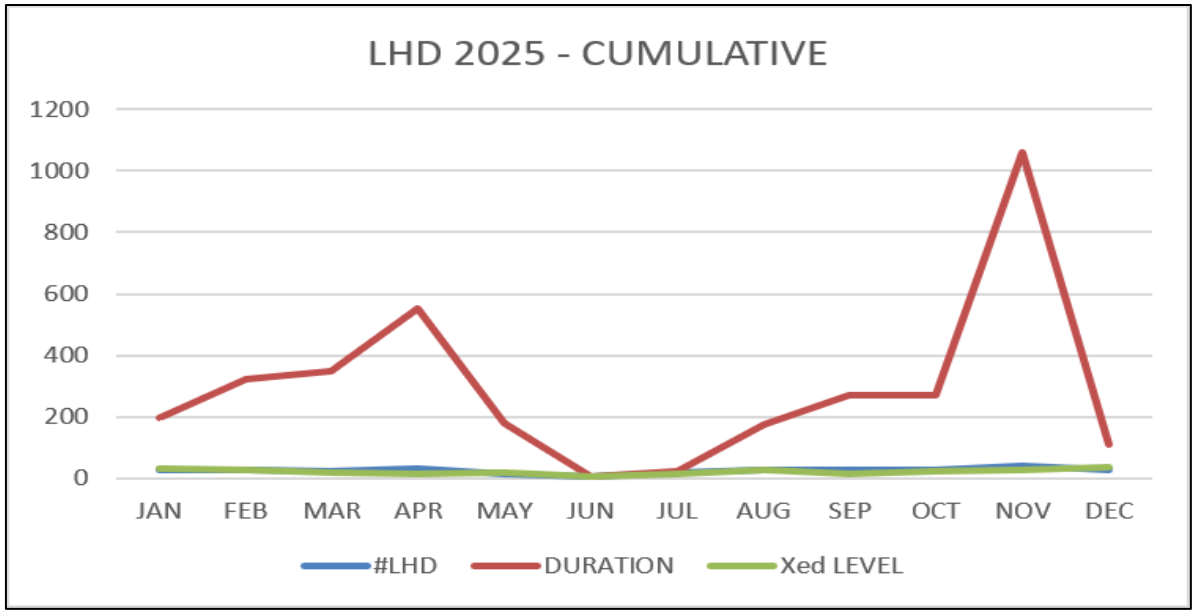


Figura 3 – LHD acumulativo (CRM)

— FIN —