



OACI

Organización de Aviación Civil Internacional
Oficina Regional Sudamericana

NOTA DE ESTUDIO

GTE/23 — NE/03
24/08/23

Vigésimo Tercera Reunión del Grupo de Trabajo de Escrutinio (GTE/23) del Grupo Regional de Planificación y Ejecución CAR/SAM (GREPECAS)

Lima, Perú, del 11 al 15 de septiembre de 2023

**Cuestión 2 del
Orden del Día:**

Revisión de los resultados del análisis de Grandes Desviaciones de Altitud (LHD)

CÁLCULO DE RIESGO DE COLISIÓN VERTICAL (CRM)

(Presentada por CARSAMMA)

RESUMEN EJECUTIVO	
Esta nota de estudio presenta un resumen del cálculo del riesgo de colisión vertical en las Regiones CAR/SAM en 2022 utilizando la metodología CRM.	
Acción:	Tomar nota y revisar el contenido de esta Nota de Estudio.
Objetivos Estratégicos:	<ul style="list-style-type: none">Objetivo estratégico 1 – Seguridad Operacional
Referencias:	<ul style="list-style-type: none">ICAO Doc. 9574 - <i>Manual sobre una separación vertical mínima de 300 m (1 000 ft) entre FL 290 y FL 410 inclusive.</i>ICAO 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 ft) entre FL 290 y FL 410 inclusive.Movimiento de Aeronaves en el espacio RVSM en 2022.Reportes de Desviaciones de Altitud Importantes (LHD) en 2022.

1. Introducción

1.1 El propósito de esta Nota de Estudio es mostrar que los criterios de seguridad operacional definidos en el Doc. 9574 y en el Doc. 9937 de la OACI continúan cumpliéndose en el espacio aéreo RVSM de las Regiones CAR/SAM.

1.2 Este documento informa sobre el análisis del riesgo de colisión vertical en el espacio aéreo RVSM en 2022 en las Regiones de Información de Vuelo (FIR) del Caribe y Sudamérica.

2. Análisis

2.1 Según el Doc. 9574 y el Doc. 9937, la evaluación debe hacerse para asegurar que las operaciones en el espacio aéreo RVSM no induzcan un aumento en el riesgo de colisión vertical de manera que el riesgo vertical total no exceda los objetivos de seguridad operacional definidos.

2.2 Para la evaluación cuantitativa, se utiliza el Modelo de Riesgo de Colisión Vertical de Reich, según lo recomendado por la OACI. Este es un modelo de intensos fundamentos matemáticos que, después de analizar los movimientos de aeronaves (hojas de cálculo que contienen datos sobre vuelos realizados en el espacio aéreo RVSM), calcula el nivel de seguridad operacional (TLS) de la Región de Información Vuelo en estudio. Varias herramientas de cálculo y bases de datos se utilizan para los diversos cálculos durante el proceso, así como varias horas de análisis por parte de los expertos de CARSAMMA.

2.3 La evaluación de la seguridad RVSM cubre un período de doce meses consecutivos.

2.4 Herramientas para la evaluación de la seguridad:

- Metodología del riesgo de colisión de la OACI;
- Se utiliza para desarrollar la Especificación de Rendimiento del sistema global el Doc. 9574 de la OACI, con la especificación y los requisitos de rendimiento de mantenimiento de altura de aeronaves;
- Todas las aeronaves que operen en espacio aéreo de separación vertical mínima reducida deben estar certificadas RVSM;
- La certificación de la aeronave es actual;
- Se sigue cumpliendo el nivel deseado de seguridad operacional (TLS) de 5×10^{-9} accidentes mortales por hora de vuelo (en una **muestra representativa** de aeronaves);
- Hay evidencia de estabilidad del error del sistema de altimetría de las aeronaves (ASE);
- La introducción de RVSM no aumenta el nivel de riesgo debido a errores operacionales y contingencias de vuelo, de acuerdo con un nivel predefinido de confianza estadística;
- Se adoptan medidas adicionales de seguridad eficaces para reducir el riesgo de colisión vertical y cumplir con las metas de seguridad operacional debido a errores operacionales y procedimientos de contingencia; y
- Los procedimientos de control del tránsito aéreo continúan siendo efectivos.

2.5 El modelo de riesgo se adaptó para tener en cuenta:

- Riesgo técnico de la aeronave en la misma aerovía y en las aerovías de intersección; y
- El efecto de las desviaciones de altura importantes (LHD) en el riesgo del sistema.

3. Espacio Aéreo CAR/SAM

3.1 El espacio aéreo RVSM monitoreado por CARSAMMA está compuesto por 34 Regiones de Información de Vuelo (FIR) del Caribe y Sudamérica. Cada parte de ese espacio aéreo fue tratada como un sistema aislado, con sus propios parámetros estadísticos.

3.2 Recolección de Tráfico de Datos - La muestra utilizada para evaluar la frecuencia de pasaje y parámetros físicos y dinámicos de las aeronaves típicas para evaluar el riesgo de colisión vertical, se recogió en el período comprendido entre el 01 y el 31 de diciembre de 2022 de las 34 FIR de CAR/SAM. En estos datos de movimientos, en términos de horas de vuelo de las muestras recogidas se recibieron 287.439 líneas de vuelos con 491.925,68 horas de duración de las FIR mencionadas, siendo 104.780,17 horas de la Región CAR (21,30%) y 387.145,51 horas de la Región SAM (78,70%).

3.3 En cuanto a la ocurrencia de desviaciones de altura importantes (LHD) reportadas en las Regiones CAR/SAM, CARSAMMA recibió un total de 1,280 LHD en 2022. Tras el análisis y validación realizado a través de teleconferencias con representantes de las Oficinas de la OACI Lima y México, IATA y CARSAMMA, 711 de estos LHD se consideraron válidos en las Regiones CAR/SAM.

3.4 Por lo tanto, el total de LHD analizados por los parámetros del CRM fueron:

Code	A	B	C	D	E1	E2	F	G	H	I	J	K	L	M	Total
#LHD	1	8	0	2	401	284	0	0	3	5	3	0	1	3	711

Tabla 1 – Total LHD

3.5 En la siguiente tabla se describe la distribución de LHD al mes:

Month	# LHD	Duration (min)	Crossed Levels
Enero	43	30.50	42
Febrero	39	28.50	35
Marzo	51	79.50	74
Abril	80	55.00	87
Mayo	50	86.50	47
Junio	57	34.00	82
Julio	66	81.00	113
Agosto	52	57.83	70
Septiembre	73	173.50	82
Octubre	60	62.22	51
Noviembre	73	76.98	82
Diciembre	67	85.50	65
Total	711	851.03	830

Tabla 2 – LHD mensual

4. Recolección de datos de movimiento de aeronaves

4.1 Los datos de la muestra para estimar la frecuencia de paso y los parámetros físicos, así como la dinámica de una aeronave típica para la evaluación del riesgo de colisión vertical se recolectaron del 1 al 31 de diciembre de 2022.

4.2 Al recibir los datos de movimiento de las aeronaves, CARSAMMA procedió a filtrar y procesar los datos. En la Tabla 3 se muestran los resultados y lista los tipos de aviones que volaron a través de las FIR de CAR/SAM, con sus dimensiones y porcentaje de números de vuelo, incluyendo un avión típico, utilizado como una dimensión del Modelo de Cálculo de Riesgo Vertical.

ACFT Type	Length λ _x	Wingspan λ _y	Height λ _z	Flights	% of Flights
B738	0.021328	0.018521	0.006749	53628	20.4%
A320	0.020286	0.018413	0.006350	47499	18,1%
A20N	0.020286	0.018413	0.006350	27376	10.4%
B38M	0.021312	0.019395	0.006641	20945	8.0%
A321	0.024033	0.018413	0.006350	17583	6.7%
E190	0.019568	0.015507	0.005707	12114	4.6%
A319	0.018272	0.018413	0.000635	11344	4.3%
B763	0.029644	0.025702	0.007559	10821	4.1%
B737	0.018898	0.018521	0.006749	9342	3.6%
B789	0.034017	0.034017	0.009179	6421	2.4%
A332	0.031749	0.032559	0.009395	5894	2.2%
B788	0.030778	0.032397	0.009179	5887	2.2%
A21N	0.024033	0.018413	0.006350	5505	2.1%
B772	0.034395	0.032883	0.009989	4376	1.7%
B77W	0.034395	0.034989	0.010043	3936	1.5%
A359	0.036123	0.034557	0.009125	3299	1.3%
B739	0.021328	0.018521	0.006749	3055	1.2%
B752	0.025551	0.020788	0.007322	2411	0.9%
E295	0.025476	0.021823	0.006773	1821	0.7%
B734	0.019708	0.015605	0.005994	1808	0.7%
A333	0.034341	0.032559	0.009098	1776	0.7%
B744	0.038175	0.034773	0.010475	1762	0.7%
A339	0.034341	0.032559	0.009098	1592	0.6%
B77L	0.034395	0.034989	0.010043	1290	0.5%
B733	0.017279	0.016199	0.006479	1067	0.4%
Typical acft	0.023050	0.020780	0.006690	262552	91.3 %

Tabla 3 – Las Top aeronaves que volaron RVSM en las FIR CAR/SAM en términos de vuelos
(Las medidas de las dimensiones se expresan en millas náuticas)

5. Evaluación del riesgo de colisión vertical (CRM)

5.1 En esta sección se analizan los resultados de la evaluación del riesgo de colisión vertical del espacio aéreo RVSM en la FIR CAR/SAM.

5.2 La metodología de riesgo de colisión vertical internacionalmente aceptada (CRM) se ha utilizado para la evaluación de seguridad operacional del espacio aéreo RVSM en el Caribe y Sudamérica.

5.3 Estimaciones del parámetro CRM:

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

Figura 1 – Fórmula general del Modelo del Riesgo de Colisión Vertical de REICH

5.4 El material y la cantidad de la fuente utilizada para estimar los valores de cada parámetro del modelo de riesgo de colisión vertical aceptado internacionalmente (CRM) utilizado para evaluar la seguridad operacional del espacio aéreo RVSM se resumen en la Tabla 4 (disponible únicamente en inglés).

λ_x	Average length of the aircraft sample 0.023050 Nm
λ_y	Average wingspan of the aircraft sample 0.020780 Nm
λ_z	Average height of the aircraft sample 0.006690 Nm
$ \dot{V} $	Average speed of the aircraft sample (module) 432.355 kts
$ \Delta \dot{V} $	Relative speed of the same direction of the sample of the aircraft (module) 30.8340 kts
$ \dot{y} $	Average speed relative to the transverse approximation of the sample of the aircraft (module) 13 kts
$ \dot{z} $	Average relative vertical velocity during loss of vertical separation of the aircraft sample (module) 1.5 kts
$P_z(0)$	Probability that two aircraft with the same nominal level overlap laterally in the sample of the aircraft 0.344891

Tabla 4 - Estimaciones de parámetros de CRM

5.5 Demostración de la viabilidad técnica de la RVSM en las Regiones CAR/SAM:

- Frecuencia de paso **Nx**;
- Probabilidad de superposición vertical **Pz (1000)**; y
- Probabilidad de superposición lateral **Py (0)**.

Para demostrar esto, se establecieron los siguientes objetivos:

- Generar confianza en el cumplimiento del TLS técnico; y
- Certificar la estabilidad del ASE.

5.5.1 Frecuencia de paso, Nx - Este es el parámetro del espacio aéreo en el que la aeronave está expuesta al riesgo de colisión vertical. La frecuencia de paso equivalente se estimó teniendo en cuenta los aviones que vuelan en la misma dirección y en direcciones opuestas, como se muestra en la **Tabla 5**.

Pass Frequency CAR/SAM	Same Direction	Opposite Direction	Equivalent	Flight Hours
	0.008463	0.098498	0.066599	491,925.68

Tabla 5 – Frecuencia de Paso

5.5.2 Los valores se relacionan con el sistema del espacio aéreo CAR/SAM. Se debería observar que se ha calculado que la frecuencia de paso equivalente mostrada en la **Tabla 5 (0.066599)** se calculó sobre la base de las horas de vuelo de las 32 FIR CAR/SAM.

El valor estimado de **Pz (1000)** utilizado en nuestros cálculos fue de **2.46 x 10⁻⁸**.

5.5.3 La Tabla 6 contiene los conjuntos de los parámetros físicos y dinámicos que se estiman en el perfil de riesgo, así como el seguimiento de los parámetros principales para las FIR CAR/SAM. Todos los parámetros se determinaron basados en el espacio aéreo de cada región que se considera un sistema aislado.

CAR/SAM	E (same)	ΔV (same)	Ez (opp)	ΔV (opp)	Ez	V
	0.09539	17.2347 kt	0.02462	878.358 kt	0.05254	432.355 kt

Tabla 6 – Parámetros físicos y dinámicos

6. Conclusiones de la evaluación del Riesgo de Colisión Vertical (CRM)

6.1 Riesgo de Colisión - La Figura 2 muestra los riesgos de colisión vertical calculados para cada FIR de las Regiones CAR/SAM durante el año 2022. **Las FIR Bogotá, Piarco, Asunción, Guayaquil y Port-au-Prince fueron las que SUFRIERON riesgo por encima del Nivel de Seguridad Deseado (TLS).**

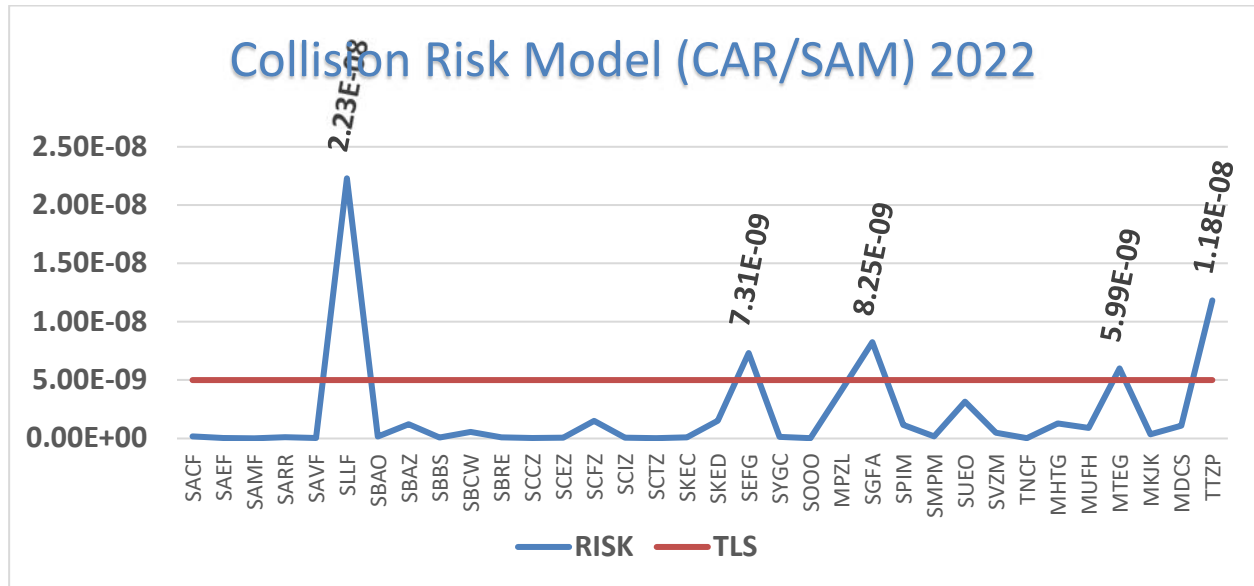


Figura 2 - Riesgo de Colisión

6.2 El laboratorio de Altimetría de CARSAMMA anexó a esta nota de estudio los principales parámetros cuantitativos que influyeron en los cálculos de CRM de las 05 FIR que superaron el TLS en 2022, e incluye una lista de LHD ocurridos.

6.3 Al final de este trabajo, quisiéramos recordar algunos datos que componen nuestros cálculos:

- Fueron recibidos 287.439 movimientos de aeronaves que después del procesamiento se validaron 247.198 registros de vuelos. En relación con años anteriores, este aprovechamiento es satisfactorio.
- En el cálculo CRM una aeronave sin certificación que utilice el espacio aéreo RVSM induce a un aumento significativo del riesgo de colisión vertical. Es necesario un esfuerzo mayor por parte de las AAC y de los PSNA de las regiones CAR SAM para el uso correcto del espacio RVSM.
- Entre los 247.198 movimientos validados, fueron identificados al final de un proceso de auditoría hecho por CARSAMMA, con el apoyo de las RMA y AAC de las regiones CAR\SAM, algunas aeronaves cuyo registro no constan en la base de datos de aprobación RVSM de CARSAMMA.

Esto puede haber sido ocasionado por:

- a) error en la escritura del F2 (aprobación RVSM) por parte de la AAC;
- b) falta de envío a CARSAMMA del F2 por la AAC;
- c) error en la escritura del F2 por parte de CARSAMMA en el banco de datos RVSM; o
- d) que la aeronave en verdad NO está certificada RVSM.

- Considerando las ocurrencias en el espacio RVSM, 711 LHD fueron validados durante las teleconferencias efectuadas durante el año por el sector de los LHD en CARSAMMA.
- Los parámetros de duración de evento LHD (tiempo) y cruce de niveles, también influye negativamente en el cálculo de CRM. Las FIR que posean áreas con región oceánica, o grandes distancias entre posiciones de reporte obligatorio, son las más afectadas en este cálculo.

6.4 El error técnico de las **FIR CAR/SAM** satisface el objetivo que establece que no debe exceder $2,5 \times 10^{-9}$ accidentes mortales por hora de vuelo debido a la pérdida de la separación vertical estándar de 1000 pies y todas las demás causas.

El riesgo operacional no tiene un límite predeterminado de acuerdo con el Doc.9574 de la OACI.

6.5 **En el caso de las Regiones CAR/SAM, el riesgo medio estimado es $1,255 \times 10^{-9}$ por debajo del TLS, que es de $5,0 \times 10^{-9}$.**

CAR/SAM RVSM airspace – Estimated Flight Hours = 491,925.68 hours			
Fuente del riesgo	Riesgo Estimado	TLS	Observación
Error Técnico	0.033×10^{-9}	2.5×10^{-9}	Debajo
Error Operacional	1.073×10^{-9}	-	-
Riesgo	1.255×10^{-9}	5.0×10^{-9}	Debajo

Tabla 7

7. Acciones Sugeridas

7.1 Se invita a la Reunión a:

- Tomar nota y revisar el contenido de este documento de trabajo;
- tomar acciones para reducir el riesgo en aquellas FIR por encima del valor máximo esperado
- compartir experiencias y expresar opiniones sobre las acciones de CARSAMMA en esta materia.