



OACI

Organización de Aviación Civil Internacional  
Oficina para Norteamérica, Centroamérica y Caribe

NOTA DE ESTUDIO

GTE/22 — NE/06  
02/09/22

**Vigesimosegunda Reunión del Grupo de Trabajo de Escrutinio (GTE/22) del Grupo Regional de Planificación y Ejecución CAR/SAM (GREPECAS)**  
Ciudad de México, México, del 26 al 30 de septiembre de 2022

**Cuestión 4 del  
Orden del Día:**

**Actividades y tareas a reportar al GREPECAS  
4.2 Revisión de las tareas para reportar al GREPECAS**

**ANÁLISIS DEL ASE Y RIESGO DE COLISIÓN (CRM) DE AERONAVES EN EL ESPACIO AÉREO RVSM EN LAS REGIONES CAR / SAM (2021)**

(Presentada por CARSAMMA)

<b>RESUMEN EJECUTIVO</b>	
Esta Nota de Estudio presenta un resumen del cálculo del riesgo de colisión vertical en el espacio aéreo RVSM de las Regiones CAR/SAM para 2021, utilizando la metodología CRM	
<b>Acción:</b>	La Acción sugerida se encuentra incluida en la Sección 11.
<b>Objetivos Estratégicos:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Seguridad Operacional</li></ul>
<b>Referencias:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Doc 9574, Manual sobre una separación vertical mínima de 300 m (1 000 ft) entre FL 290 y FL 410 inclusive.</li><li>• 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.</li><li>• Informe de Grandes Desviaciones de Altitud (LHD) de 2021.</li><li>• Movimientos de aeronaves en el espacio aéreo RVSM en 2021.</li></ul>

**1. Introducción**

1.1 En todas las regiones donde se ha implementado RVSM, los Grupos Regionales de Planificación e Implementación (PIRG) han establecido Agencias Regionales de Monitoreo (RMA) para satisfacer los objetivos del programa de monitoreo de RVSM (ICAO Doc.9574, párrafo 6.4.4 y 6.4.5 – Responsabilidades de una RMA). Uno de los deberes y responsabilidades incluye proporcionar informes anuales al Grupo Regional de Planificación e Implementación.

1.2 El propósito de esta Nota es mostrar que los criterios de seguridad operacional definidos en los Documentos 9574 y 9937 de la OACI continúan cumpliéndose en las Regiones CAR/SAM.

## 2. Contexto

2.1 Para este análisis se utilizó la metodología de cálculo del modelo de riesgo de colisión vertical (CRM), según lo recomendado por la OACI para el espacio aéreo RVSM.

2.2 La Metodología de Riesgo de Colisión de la OACI utilizada para desarrollar la especificación de rendimiento del sistema global Doc.9574 de la OACI, la especificación de rendimiento de mantenimiento de altura y los requisitos de rendimiento de mantenimiento de altura de la aeronave, consisten en:

- Nivel aceptable de seguridad (TLS) (objetivo de seguridad);
- Modelo del Riesgo de Colisión (herramienta de estimación de riesgos); y
- Medios acordados para evaluar el riesgo.

2.3 El proceso de cálculo de CRM implica dos entradas:

- a) Recopilar informes de grandes desviaciones de altura (LHD) y datos de muestra de tráfico (TSD) de los proveedores de servicios de navegación aérea (ANSP) de las FIR estudiadas; y
- b) Resultados de los sistemas de monitoreo del rendimiento de mantenimiento de altura de las aeronaves de los sistemas de monitoreo regionales y el intercambio de datos con otras RMA.

2.4 La validación del LHD es realizada por CARSAMMA y las FIR durante todo 2021, trayendo consigo una mejor distribución del trabajo de análisis. Con los archivos RVSM de los Movimientos Aéreos, hay una concentración de trabajo de depuración ya que todos se entregan a principios del año en curso. Por este motivo, todos los miembros de CARSAMMA están destinados a la labor de depuración de estos archivos, ya que la mayoría de los documentos recogidos no se entregan de acuerdo con los ejemplos solicitados por esta Agencia, requiriendo tiempo y esfuerzo para utilizar al menos el 85% de la información enviada.

2.5 Sin embargo, debido a la pandemia de COVID-19, que llevó a una caída significativa en las actividades de transporte aéreo y varias restricciones tomadas en todas las regiones, como prohibiciones de viaje, restricciones de viaje, cuarentenas obligatorias, los movimientos aéreos se vieron significativamente afectados, lo que llevó a una ausencia de datos estadísticamente significativos para el año 2021.

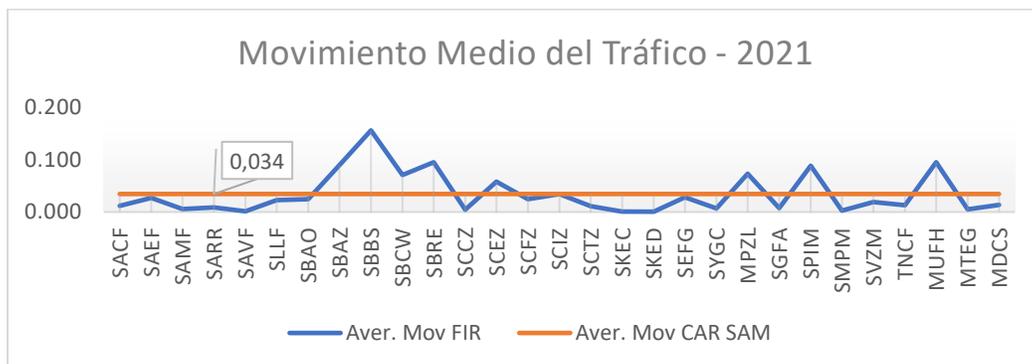


Tabla 1

Nota 1: No se pudieron considerar 5 movimientos RVSM de las FIR, debido a la no recepción de datos por parte de CARSAMMA.

### 3. Análisis

3.1 De acuerdo con los documentos 9574 y 9937, la evaluación es necesaria para garantizar que las operaciones en el espacio aéreo RVSM no generen un aumento en el riesgo de colisión, de modo que el riesgo vertical total no exceda los objetivos de seguridad definidos.

3.2 Para la evaluación cuantitativa, se utiliza el modelo de riesgo de colisión vertical del Reich, según lo recomendado por la OACI. Se trata de un modelo de fundamentos matemáticos que, tras analizar los movimientos de las aeronaves (hojas de cálculo que contienen datos sobre vuelos realizados en el espacio aéreo RVSM), calcula el nivel de seguridad (TLS) de la región de información de vuelo en estudio.

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

3.4 Se debe prestar especial atención para asegurarse de que:

- a) El riesgo técnico, o el riesgo de colisión asociado con el rendimiento de mantenimiento de la altura de la aeronave, no exceda un Nivel Aceptable de Seguridad (TLS) de  $2,5 \times 10^{-9}$  accidentes fatales por hora de vuelo (fapfh);
- b) El riesgo general, o el riesgo de colisión debido a todas las causas, que incluye el riesgo técnico y todo el riesgo debido a errores operativos, como errores de piloto / controlador, no excede un TLS de  $5 \times 10^{-9}$  fapfh;
- c) Todas las aeronaves que operan en espacio RVSM estén certificadas para RVSM;
- d) El uso de RVSM no aumente el nivel de riesgo debido a errores operativos y procedimientos de contingencia;
- e) Hay evidencia de la estabilidad del sistema de altimetría de la aeronave (ASE);
- f) La introducción de RVSM no aumenta el nivel de riesgo debido a errores operativos y contingencias de vuelo, de acuerdo con un nivel predefinido de confianza estadística;
- g) Se adoptan medidas de seguridad adicionales efectivas para reducir el riesgo de colisión debido a errores operativos y procedimientos de contingencia y cumplir con los objetivos de seguridad;
- h) Los procedimientos de control del tránsito aéreo siguen siendo eficaces.

### 4. Espacio aéreo RVSM de las Regiones CAR/SAM.

4.1 El espacio aéreo CAR/SAM cubre una amplia área que se extiende desde el Golfo de México hasta la Patagonia, abarcando 34 Regiones de Información de Vuelo (FIR) de los países enumerados en la figura a continuación. Cada parte del espacio aéreo fue tratada como un sistema aislado, con sus propios parámetros estadísticos.

4.2 Entre los diversos parámetros utilizados en el cálculo de CRM, podemos destacar algunos, pero no todos, como por ejemplo en las muestras de tráfico FIR:

- Densidad de tráfico en las aerovías de cada FIR (frecuencia de paso);
- Aerovías de una o dos vías;
- Cruce de aerovías, y el ángulo de este cruce;
- tamaño típico de las aeronaves;
- ASE promedio de las aeronaves en la muestra de cada FIR, según la base de datos de Cálculo de ASE realizada por el Laboratorio de Altimetría de CARSAMMA;
- Aeronave "pirata" que voló en la FIR.

4.3 Además del uso de la colección de LHD ocurridos en 2021, y analizada para obtener la Cantidad, duración, severidad y existencia de otro tránsito durante el evento, en la FIR.

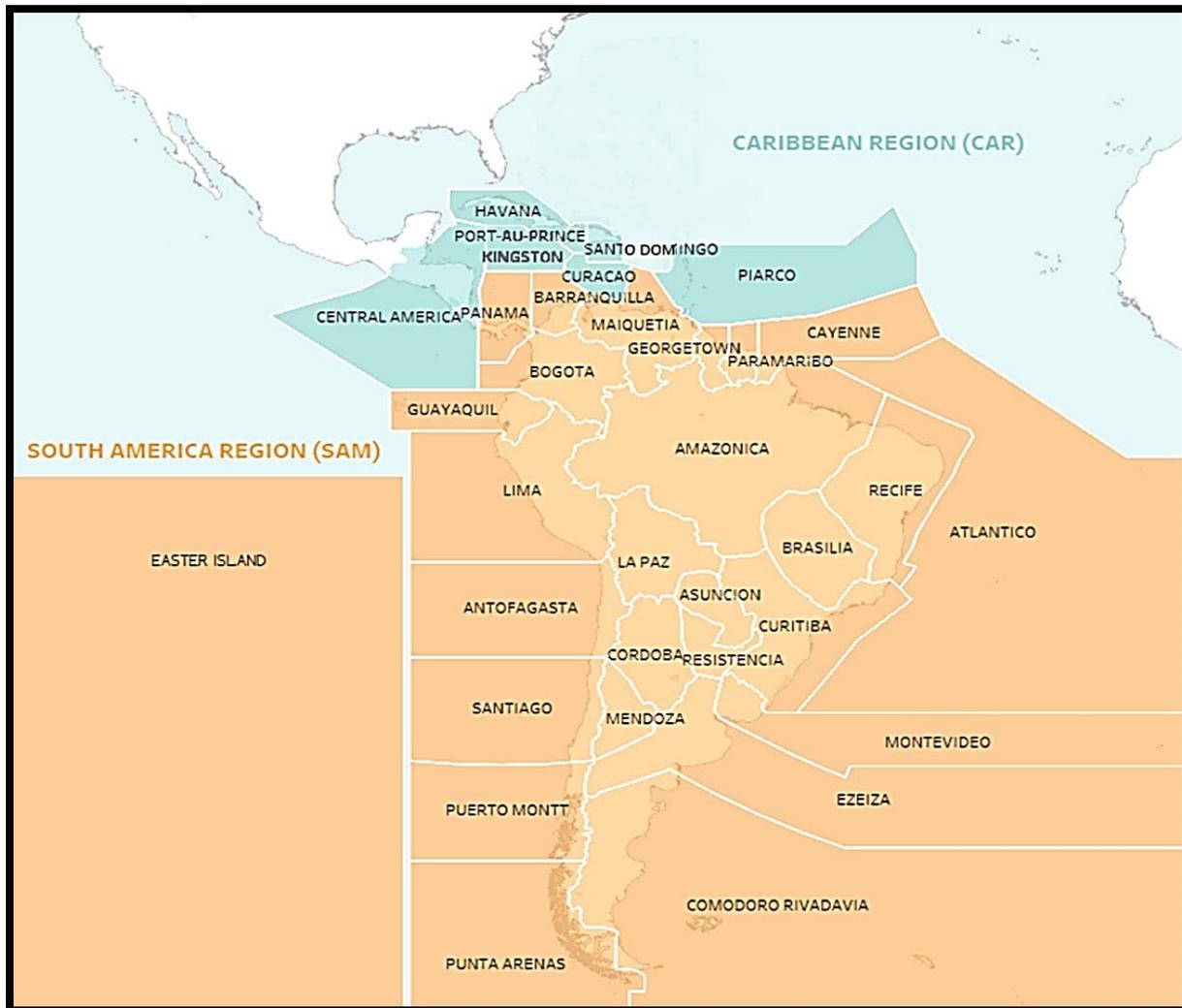


Figura 1 – Espacio aéreo CAR / SAM

## 5. Recopilación de datos de movimiento de aeronaves, un promedio ASE y desviación estándar

5.1 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 recopilaron del 1 al 31 de diciembre de 2021.

5.2 Al recibir los datos de movimiento de las aeronaves, CARSAMMA procedió a su filtrado y procesamiento de los datos recibidos de las 29 FIR CAR/SAM, que se procesaron y utilizaron para evaluar la seguridad del espacio aéreo RVSM, según lo recomendado por la OACI.

5.3 En la muestra recogida se recibieron 316.354 líneas de registros de vuelo. Todos los registros fueron depurados, dejando 243.349 líneas de registros de vuelo validados en el proceso. Sin embargo, todos los datos enviados se utilizaron en otro producto de CARSAMMA, a saber, la auditoría del espacio aéreo RVSM. Como en años anteriores, una gran parte de los datos recibidos no pudieron utilizarse en el CRM por diversas razones, incluidos errores en los tiempos de entrada / salida del espacio aéreo RVSM (menor o igual tiempo de entrada de vuelo), falta de información completa para identificar y localizar rutas fijas y fijos, o incluso enviar datos más allá de la fecha límite.

5.4 La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos y enumera las aeronaves que volaron a través del espacio CAR/SAM, con el porcentaje, promedio del ASE y la desviación estándar del ASE, por tipo de aeronave utilizado en el modelo de cálculo, así como en un avión típico.

Tipo ACFT	Longitud	Envergadura	Altura	# Vuelos	% ACFT	Promedio del ASE	Desviación Estándar del ASE	3 veces (Desv. estándar)
<b>B737NX</b>	0,021166	0,018521	0,006803	44257	18,19%	12,3	43,52	130,56
<b>A320</b>	0,020286	0,018413	0,00635	23455	9,64%	39,9	53,69	161,06
<b>A20N</b>	0,020286	0,01933	0,00635	22035	9,06%	41,5	52,75	158,26
<b>E190</b>	0,019568	0,015507	0,005707	12430	5,11%	33,1	61,06	183,18
<b>B787</b>	0,030778	0,028078	0,009179	12338	5,07%	36	12,73	38,18
<b>B767</b>	0,033153	0,028024	0,009071	9134	3,75%	-29,1	56,91	170,73
<b>B38M</b>	0,021339	0,019384	0,006636	7623	3,13%	12,3	43,52	130,56
<b>B737C</b>	0,018898	0,018521	0,006749	6263	2,57%	7,1	65,43	196,28
<b>A330</b>	0,034341	0,032559	0,009087	5814	2,39%	81,9	38,07	114,21
<b>B39M</b>	0,022765	0,019384	0,006636	3459	1,42%	-14,7	19,48	58,43
<b>A21N</b>	0,024033	0,018413	0,00635	3420	1,41%	33,34	24,09	72,27
<b>B77W</b>	0,034395	0,034989	0,010043	3060	1,26%	11,00	25,92	77,76
<b>B739</b>	0,021328	0,018521	0,006749	2371	0,97%	23,39	52,38	157,14
<b>B734</b>	0,019708	0,015605	0,005994	2129	0,87%	-69,89	54,97	164,91
<b>B772</b>	0,034395	0,032883	0,009989	2104	0,86%	13,35	37,42	112,26
<b>B733</b>	0,017279	0,016199	0,006479	2068	0,85%	-14,95	56,47	169,41
<b>B744</b>	0,038175	0,034773	0,010475	1676	0,69%	-74,99	40,36	121,08
<b>A359</b>	0,036123	0,034557	0,009125	1462	0,60%	-30,56	23,26	69,78
<b>A333</b>	0,034341	0,032559	0,009098	1455	0,60%	9,53	30,05	90,15
<b>A339</b>	0,034374	0,034557	0,009066	1440	0,59%	6,68	18,52	55,56
<b>Avión típico</b>	<b>0,026837</b>	<b>0,024539</b>	<b>0,007797</b>			<b>6,36</b>	<b>40,53</b>	<b>121,59</b>

Tabla 2 - Aeronaves que volaron en el espacio RVSM CAR/SAM, con ASE promedio

5.5 Cabe destacar que además de separar los distintos tipos de aeronaves que la utilizaron en el movimiento de aeronaves enviado por cada FIR, se realiza una verificación cruzada entre este movimiento con la base de datos de resultados de monitoreo de CARSAMMA ASE, para encontrar el ASE promedio y la desviación estándar del ASE en la muestra, ya que estos parámetros se tendrán en cuenta al calcular el riesgo vertical.

## 6. Ocurrencia de desviaciones verticales

6.1 En cuanto a la ocurrencia de desviaciones verticales (LHD) en las regiones CAR/SAM, CARSAMMA recibió un total de 520 informes de LHD en 2021. Después del análisis y la validación basados en los parámetros del CRM, 418 de estos LHD se consideraron válidos en las regiones CAR/SAM.

6.2 Se cruzaron 407 niveles de vuelo de estos LHD, con un alto tiempo de persistencia errónea en estos niveles (1099 minutos) sin contacto bilateral con el ATC. Adicionalmente, y aún más importante, se identificaron 92 aeronaves que no están en la base de datos RVSM de la CARSAMMA.

6.3 Solo en términos de comparación, se muestra a continuación una tabla con las ocurrencias de LHD divididas por el número de movimientos aéreos por FIR, teniendo las regiones CAR/SAM un promedio de 0,00046.

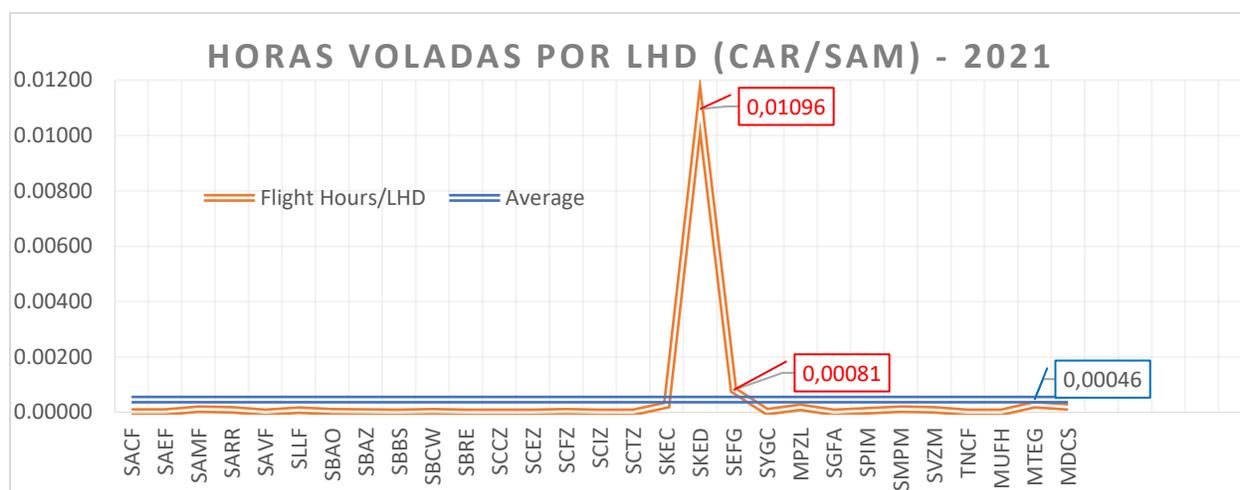


Tabla 3 – LHD por movimiento

## 7. Evaluación de la seguridad del riesgo de colisión (CRM)

7.1 Esta sección analiza los resultados de la evaluación del riesgo de colisión en el espacio aéreo RVSM.

7.2 La metodología de riesgo de colisión (CRM) aceptada internacionalmente se ha utilizado para la evaluación de la seguridad del espacio aéreo RVSM en el CAR/SAM.

7.3 Estimaciones del parámetro CRM: La estimación del riesgo de colisión vertical asociado con RVSM se compara con los objetivos de seguridad de RVSM acordados.

- **Objetivo de seguridad 1: El riesgo técnico, o el riesgo de colisión asociado con el rendimiento de mantenimiento de la altura de la aeronave, no excede un Nivel Aceptable de Seguridad (TLS) de 2,5 x 10<sup>-9</sup> accidentes fatales por hora de vuelo (fafh).**

"Riesgo técnico" es el término utilizado para describir el riesgo de colisión asociado con el rendimiento de mantenimiento de la altura de la aeronave. Algunos de los factores que contribuyen al riesgo técnico son:

- errores en la altimetría de las aeronaves y en los sistemas automáticos de control de altitud;
- los fallos del equipo de la aeronave que den lugar a una desviación no mitigada del nivel de vuelo despejado, incluidos aquellos en los que no seguir los procedimientos requeridos aumenta aún más el riesgo; y
- respuestas a avisos falsos de resolución de prevención de colisiones.

Uno de los parámetros de probabilidad de superposición vertical que tiene en cuenta el rendimiento ASE de la población de aeronaves  $P_z(1000)$ , es la probabilidad de que dos aeronaves nominalmente separadas por 1 000 pies estén en superposición vertical.

- **Objetivo de seguridad 2: Riesgo general, o el riesgo de colisión debido a todas las causas, que incluye el riesgo técnico y todo riesgo debido a errores operativos, como errores de piloto / controlador, no excede un TLS de  $5 \times 10^{-9}$  fapfh.**

- El término "error operativo" se utiliza para describir cualquier desviación vertical de una aeronave del nivel de vuelo correcto debido a una acción incorrecta por parte de ATC o la tripulación de vuelo.

El otro parámetro de probabilidad de superposición vertical que tiene en cuenta  $P_z(0)$ , es la probabilidad de que dos aeronaves que vuelan al mismo nivel de vuelo estén en superposición vertical.

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

Figura 2 – Fórmula general del modelo Reich del riesgo de colisión vertical

7.4 En la tabla 4 se resumen el material y la cantidad de la fuente utilizada para estimar los valores de cada parámetro del modelo de riesgo de colisión (CRM) internacionalmente aceptado para la evaluación de la seguridad del espacio aéreo RVSM.

$\lambda_x$	Longitud media de la muestra de aeronaves	0,026837
$\lambda_v$	Envergadura media de la muestra de aeronaves	0,024539n
$\lambda_z$	Altura media de la muestra de aeronaves	0,007797
$ \bar{V} $	Velocidad media de la muestra de aeronaves (módulo)	446,786 kt
$ \Delta V $	Velocidad relativa en la misma dirección de la muestra de aeronaves (módulo)	30,37 kt
$ \bar{V}_y $	Velocidad media relativa a la aproximación transversal de la muestra de aeronaves (módulo)	13 kt
$ \bar{V}_z $	Velocidad vertical media relativa durante la pérdida de separación vertical de la muestra de aeronaves (módulo)	1,5 kt
$P_z()$	Probabilidad de que dos aeronaves con el mismo nivel nominal se superpongan lateralmente de la muestra de aeronaves	0,298265

Tabla 4 – Parámetros RVSM

## 8. Especificaciones de rendimiento del sistema

8.1 Frecuencia de paso,  $N_x$  – 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 considerando aeronaves que volaban en la misma dirección y en direcciones opuestas, como se muestra en la Tabla 5.

Frecuencia de paso	Misma dirección	Dirección opuesta	Equivalente
	0,009937	0,083167	0,058727

Tabla 5 – Frecuencia de paso

8.2 Los valores están relacionados con el sistema de espacio aéreo CAR/SAM. Cabe señalar que la frecuencia de paso equivalente que se muestra en la Tabla 6 (0,058727) se calculó en función de las horas de vuelo en las 29 FIR CAR/SAM.

8.3 El valor estimado de  $P_z(1000)$  utilizado en nuestros cálculos fue de  $2,46 \times 10^{-8}$ .

## 9. Estimación del riesgo de colisión

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

CAR/SAM	$E_z$ (igual)	$E_z$ (opuesto)	$E_z$	$\Delta V$ (igual)	$\Delta V$ (opuesto)	$V$
	0,08277	0,02079	0,04113	31,5762	886,344	446,786 kts

Tabla 6 – Parámetros

9.2 El proceso para evaluar el error vertical total de la aeronave (TVE) y estimar  $Pz(1000)$  y  $Pz(0)$  es el mismo. Datos requeridos:

- Desviación de altitud asignada (AAD – datos radar)
- Grandes desviaciones de altura (LHD), incluidos eventos debidos a turbulencias y fallas en el equipo de la aeronave
- Población de tipo de aeronave
- Rendimiento del ASE para la aeronave observada en el espacio aéreo

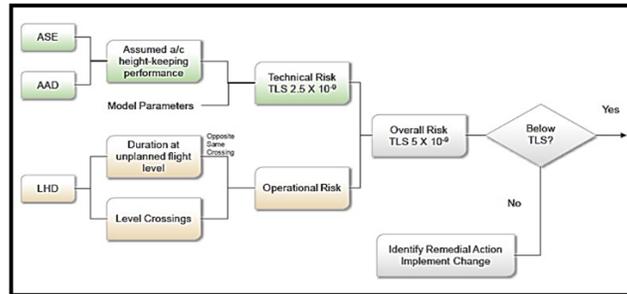


Figura 3 – Flujo de monitoreo del modelo de riesgo de colisión (CRM)

9.3 La Tabla 7 muestra el riesgo de colisión consolidado en los FIR CAR/SAM en el 2021, mostrando el riesgo de colisión vertical estimado por FIR. Debe entenderse que las FIR que presentan un informe mayor de LHD tienen un mayor riesgo.

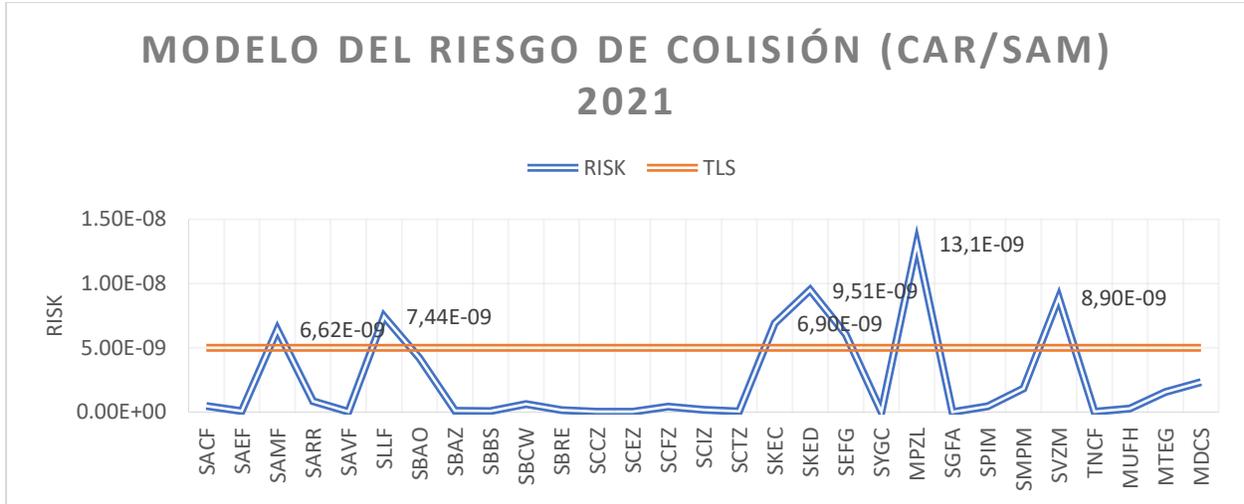


Tabla 7 – Riesgo de colisión vertical

## 10. Conclusiones de la evaluación de la seguridad (CRM)

10.1 El riesgo se estimó en base a los valores presentados en la Tabla 8, que se obtuvieron después de procesar todos los datos recibidos, compilados y procesados en el software CRM específico.

FIR	Riesgo Vertical
CAR	0,52E-09
SAM	3,09E-09
<b>RIESGO VERTICAL CAR/SAM</b>	<b>2,76E-09</b>

Tabla 8

10.2 La estimación del riesgo de colisión vertical asociado con RVSM se compara con los objetivos de seguridad de RVSM acordados.

10.3 El riesgo técnico del CAR/SAM cumple con el valor TLS, no superando  $2,5 \times 10^{-9}$  accidentes fatales por vuelo debido a la pérdida de la separación vertical estándar de 1000 pies y todas las demás causas.

10.4 El riesgo operacional no tiene un límite predefinido, de conformidad con el Doc. 9574 de la OACI.

10.5 El riesgo total estimado para las FIR CAR/SAM es de  $2,76 \times 10^{-9}$  por debajo del TLS ( $5,0 \times 10^{-9}$ )

10.6 A continuación, se muestran los resultados de los últimos seis años de riesgo de colisión vertical en nuestras regiones, en los que hemos notado una tendencia al alza.

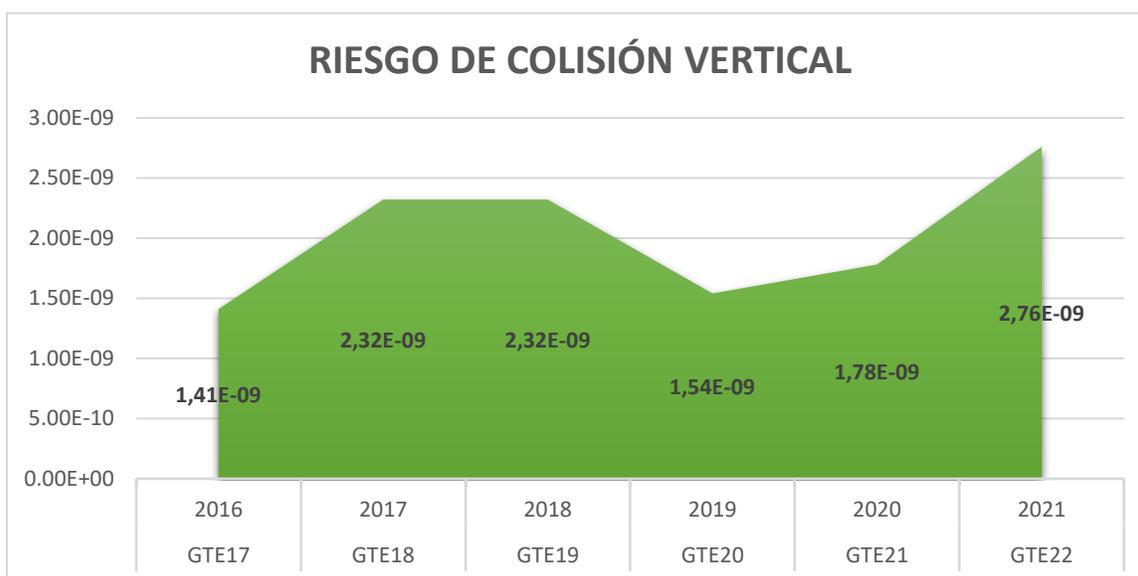


Tabla 9

**11. Acción sugerida**

11.1 Se invita a la Reunión a:

- a) Tomar nota y revisar el contenido del presente documento de trabajo;
- b) Intercambiar experiencias y comentar sobre las acciones de CARSAMMA en este asunto;  
y
- c) Se insta a los Estados/FIR a que presten atención prioritaria a abordar las fallas de coordinación entre los ACC para mejorar la seguridad RVSM, incluida la implementación de programas de concientización para mitigar las fallas de coordinación inducidas por errores humanos y la adopción de medidas correctivas para mitigar el riesgo.