

Propuesta de ubicación de estaciones de referencia para un sistema de monitoreo GNSS para la República Mexicana

Víctor José **Gatica-Acevedo**
Miguel **Sánchez-Meraz**

Instituto Politécnico Nacional,
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (Zacatenco),
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación.
Av. Instituto Politécnico Nacional s/n,
Unidad Profesional "Adolfo López Mateos",
Col. Lindavista, México, DF, CP 07738.
MÉXICO.

correo electrónico (email): vgaticaa1300@alumno.ipn.mx
mmeraz@ipn.mx

Recibido 04-12-2012, aceptado 12-03-2013.

Resumen

El presente trabajo muestra un estudio realizado para proponer una red de monitoreo GNSS para apoyar las tareas de navegación aérea dentro de la República Mexicana. El propósito de realizar este estudio fue identificar el desempeño que presentan los GNSS para apoyar las operaciones de navegación aérea bajo los criterios establecidos por la Organización de Aviación Civil Internacional, OACI. Los resultados mostrados consisten en análisis de visibilidad y desempeño del GNSS sobre nuestro país, obtenidas a partir de simulaciones, y con ello se obtuvo una propuesta de distribución de estaciones de monitoreo sobre México.

Palabras clave: GNSS, estaciones de referencia, navegación aérea, SVM, RNP, SBAS, GBAS.

Abstract
(Placement proposal of Reference Stations for a GNSS Monitoring System for Mexico)

This paper presents the works made in order to get a GNSS monitoring network, focused for support aeronautic navigation for Mexico. The main purpose at this work is to

identify GNSS performance for aeronautical navigation, following the layouts set by the International Civil Aviation Organization (ICAO). The results presented were obtained by simulations, and corresponds to visibility of GNSS satellites and the navigation based on GNSS performance over Mexico. As a result of the analysis of these simulations a configuration of a reference stations network is proposed.

Key words: GNSS, reference stations, aeronautic navigation, SVM, RNP, SBAS, GBAS.

1. Introducción

Actualmente la aviación civil internacional está integrando a los Sistemas Globales de Navegación Satelital (GNSS) como medio de navegación debido a la ventaja de cobertura global. El empleo del GNSS en el sector aeronáutico representa una oportunidad de hacer eficiente el uso del espacio aéreo mexicano. Estos sistemas no logran alcanzar los requerimientos de Navegación Basada en Desempeño (PBN) que la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) marca para las operaciones de navegación empleando GNSS [1, 2]. Para poder alcanzar estos requerimientos es necesario desarrollar sistemas de aumentación, los cuales tienen la función de monitorear y generar correcciones las señales GNSS necesarias para mantener los niveles adecuados PBN empleando GNSS. Los sistemas de aumentación generalmente están compuestos de estaciones de referencia las cuales realizan el monitoreo de las señales emitidas por el segmento espacial del GNSS, realizan comparaciones de estas señales y transmiten esta información a un centro de control (estación maestra). La estación maestra genera las correcciones y determina los niveles de integridad, los cuales son emitidos a los usuarios a través de satélites geostacionarios o transmisores colocados en tierra.

La calidad de las correcciones y los niveles de integridad generados están relacionados con la distribución, configuración y cantidad de estaciones de monitoreo que componen al sistema de aumentación. Este trabajo presenta algunos estudios realizados para hacer una propuesta de ubicación de estaciones de referencia para los trabajos de desarrollo de un sistema de monitoreo GNSS dentro de la República Mexi-

cana. Este documento presenta los resultados de las condiciones que los GNSS tienen dentro de nuestro país, esto principalmente en análisis de visibilidad y de evaluación de desempeño de operaciones de navegación aérea empleando GNSS.

2. Antecedentes

A. Sistemas globales de navegación satelital

Los GNSS son el conjunto de elementos desplegados en tierra y en el espacio, los cuales proporcionan servicio de posicionamiento geográfico empleando técnicas de medición de señales de RF [3]. Los sistemas GPS, GLONASS, *Galileo y *COMPASS están incluidos dentro de GNSS. Debido a que se emplean señales radioeléctricas, los diversos factores que afectan a estas señales degradan la precisión en el cálculo de la posición y afectan la confiabilidad en el servicio ofrecido por estos sistemas. Las principales fuentes de error en los GNSS son: errores de efemérides/reloj de los satélites, errores de retardo troposféricos e ionosféricos, errores de reloj del receptor, errores de multitrayectoria [4]. Para corregir estos efectos que degradan a las señales GNSS, se han desarrollado mecanismos que disminuyen la mayoría de los factores de error que impactan en la precisión del posicionamiento. A estos mecanismos de corrección se les conoce como sistemas de aumentación, los cuales se han venido desarrollando para ser aplicados en el sector aeronáutico.

B. Sistemas de aumentación

Los sistemas de aumentación están basados en las técnicas diferenciales desarrolladas para emplear sistemas como el GPS en navegación aérea. Las técnicas diferenciales tienen como objetivo remover los errores entre dos o más receptores que tienen a la vista los mismos satélites GPS. Esto se realiza estableciendo a uno de los receptores como punto de referencia, es decir, colocándolo en una posición fija y conocida. Este receptor fijo monitorea y calcula la posición en base a los satélites GPS que observa, compara esta posición con su posición conocida y la diferencia entre estas posiciones se retransmite como correcciones al otro receptor que se encuentra en las cercanías del receptor fijo. Al receptor fijo en estos sistemas se le denomina estación de referencia [5]. Al sistema que emplea un receptor fijo para generar correcciones diferenciales se le denomina Sistema de Aumentación de Área Local (LAAS), siendo empleado principalmente para aplicaciones en las cercanías de las pistas aéreas [6].

*Los sistemas Galileo y COMPASS se encuentran en fase de despliegue y su operación completa se estima para el año 2020.

Una aplicación regional del esquema de corrección mencionado es el realizado por el GPS Diferencial de Área Amplia (WADGPS, por sus siglas en inglés). Este esquema se compone de varias estaciones de referencia desplegadas sobre una región amplia y sobre la cual emiten las correcciones diferenciales [15]. En navegación aérea, los sistemas de aumentación que emplean este esquema son, por un lado, los Sistemas de Aumentación Basados en Satélite (SBAS) y, por otro, los Sistemas de Aumentación Basados en Tierra (GBAS).

En estos sistemas las estaciones de referencia son los elementos que recolectan la información emitida por los satélites GNSS para la generación de las correcciones diferenciales. Las correcciones diferenciales generadas son generalmente de dos tipos: correcciones de efemérides/reloj de los satélites GNSS y correcciones del retardo ionosférico. La precisión y validez de estas correcciones generadas para la región de servicio de interés, dependen del número y localización de las estaciones de referencia que integran al sistema de aumentación [7]. En diferentes regiones del planeta se han desplegado sistemas de aumentación con el objetivo de asegurar las operaciones de navegación aérea empleando GNSS. A partir de estos despliegues se han generado recomendaciones que permiten ubicar a las estaciones de referencia de forma estratégica.

C. Criterios para el establecimiento de estaciones de referencia

Existen recomendaciones para ubicar estratégicamente estaciones de referencia, las cuales surgieron a partir de los

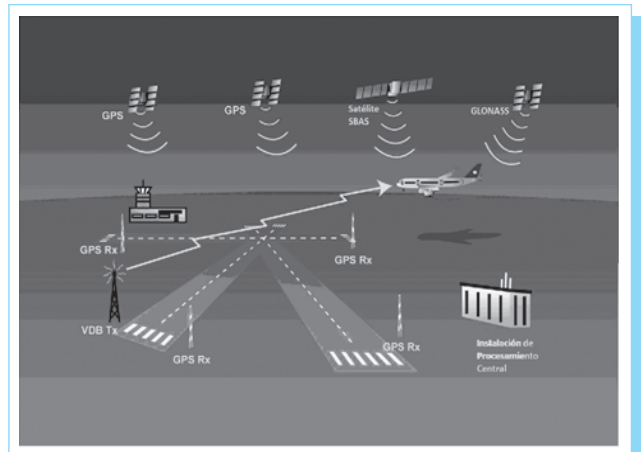


Fig. 1. Esquema de configuración de un GBAS.

despliegues de sistemas de aumentación realizados en otras regiones del planeta [7, 8]. Algunas de estas recomendaciones fueron realizadas por organismo como son la Agencia Federal de Aviación (FAA) y por los desarrolladores del sistema de aumentación de la India (Sistema GAGAN), las cuales se mencionan a continuación:

- Las estaciones de referencia deben estar por lo menos a 500 kilómetros alejadas unas de las otras.
- Las estaciones deben colocarse cerca de los límites del área de servicio.
- Se deben colocar estaciones de referencia en las ciudades que cuenten con aeropuertos, principalmente en aquellos de carácter internacional.
- En regiones donde exista un forma irregular del terreno las estaciones de referencia deben colocarse más cercanas unas de las otras.
- Analizar la visibilidad, disponibilidad y mejor Dilución de la Precisión Geométrica (GDOP).
- Aumentar el número de estaciones de referencia y colocarlas estratégicamente para disminuir el efecto de arqueamiento.
- Nuevamente, analizar para obtener las condiciones de disponibilidad, integridad y continuidad requeridas.

Para la propuesta de ubicación de estaciones de referencia dentro de México se tomaron en consideración estas recomendaciones, así como la realización de estudios para conocer las condiciones que presentan los GNSS dentro de nuestro país.

3. Desarrollo

A. Estudios de visibilidad de satélites GNSS sobre la República Mexicana

El estudio de visibilidad es importante ya que es necesario conocer cuántos satélites en promedio se encuentran a la vista en diferentes regiones del país. Así por ejemplo, si en alguna zona del país se tiene un número reducido de satélites a la vista, será necesario colocar estaciones de referencia más próximas entre sí. Para conocer la cantidad de satélites GNSS visibles dentro de la República Mexicana se apoyo del uso de herramientas informáticas como el *STK-v.9, con la cual se pudo simular las órbitas en que operan los satélites GNSS permitiendo tener una aproximación de la visibilidad en varios puntos del país (principalmente, los aeropuertos internacionales dentro de México). Dicho estudio permitió conocer que constelación de satélites GNSS presenta mejores condiciones de visibilidad, lo que dio como

*LSTK v.9 (Satellite Tool Kit versión 9) de *Analytical Graphics Inc.*

resultado que la constelación GPS presenta un número mayor de satélites visibles en comparación a la constelación GLONASS. Por lo tanto, la constelación GLONASS se descarta momentáneamente de este trabajo para el diseño de la red de monitoreo GNSS.

Los resultados obtenidos de visibilidad de satélites GPS mostraron que existe baja visibilidad en la región Norte del país y en la Península de Yucatán. Siguiendo las recomendaciones para el establecimiento de estaciones de referencia, se realizó una primera propuesta de ubicación de estaciones de referencia dentro del país en base al estudio de visibilidad. La red resultante de este primer estudio se muestra en la siguiente figura.

En la figura se presenta esta primera propuesta, en la cual los nombres indicados en color amarillo son para identificar que en este punto se obtuvo un número mínimo de seis satélites GPS visibles, los nombres en color azul indican que se obtuvo siete satélites visibles como mínimo en dicho punto y los nombres en color verde indican que se obtuvo ocho satélites visibles.

En los puntos señalados en color amarillo resultan muy importantes ya que si un satélite sale de servicio en el instante en que sólo se tenía como mínimo 6 satélites visibles, puede resultar en una degradación del servicio de posicionamiento y una falta de éste, representando un alto riesgo para operaciones de navegación que exigen altos niveles de precisión.

La geometría que forman los satélites visibles es un factor muy importante para conseguir altos grados de precisión. Esta geometría de los satélites cambia con el tiempo de acuerdo a las órbitas de los satélites y la Dilución de la Precisión (DOP) es el factor que mide la calidad de la geometría de los satélites GNSS utilizados para el cálculo de posición [9]. Los estudios de DOP sobre el territorio mexicano son muy importantes, ya que nos permite identificar aquellas regiones del país que presenten niveles altos de DOP que se reflejan como errores de gran magnitud en la solución de posicionamiento.

Los análisis de HDOP y VDOP (DOP Horizontal y Vertical respectivamente) tienen un impacto significativo en el diseño de los sistemas de aumentación para navegación aérea. Existen valores promedio mundiales de HDOP Y VDOP que aseguran niveles bajos el 95% del tiempo. Los resultados de este análisis de este factor dentro de México mostraron que se tiene un valor promedio de HDOP < 1 m el 95% del tiempo en la mayor parte del país, con excepción de la región Norte del país y en la Península de Yucatán. El valor promedio de VDOP <1.5 m el 95% del tiempo no se cumple en ningún punto del país.

Posteriormente se verificó la visibilidad simultánea de satélites GPS por un conjunto de estaciones de referencia, esto con la finalidad de cumplir con las condiciones necesarias para la reducción del efecto de arqueamiento. Esta primera propuesta cumple con las condiciones necesarias de mínimo efecto de arqueamiento, ya que en general se cumple que más de siete satélites GPS están siendo monitoreados simultáneamente por dos estaciones de referencia. Esto quiere decir que se tienen los niveles óptimos de monitoreo simultáneo de satélites GNSS, con lo que resulta en altos grados de integridad del sistema de monitoreo.

Esta primera propuesta de red está basada en resultados obtenidos a partir de estudios de visibilidad de la constelación GPS sobre México. Debemos considerar ahora las condiciones que tiene nuestro país para ofrecer servicios de navegación aérea basadas en GNSS. Para esto se considera el Desempeño Requerido de Navegación (RNP) emitidos por la OACI.

B. Análisis con base en el modelo de volumen de servicio (SVM)

Los resultados obtenidos del estudio de visibilidad de satélites GNSS permitió identificar las condiciones de geometría que presenta nuestro país respecto a las orbitas en que operan estos sistemas. A partir de dicho estudio, se pudo realizar una primera propuesta de ubicación de estaciones de referencia integrada por 26 estaciones de referencia. El siguiente paso fue evaluar esta configuración con base en el desempeño de las operaciones de navegación aérea empleando GNSS. Éste se realiza con base en los criterios marcados por la OACI para evaluar sistemas de navega-



Fig. 2. Red de estaciones de referencia obtenida del estudio de visibilidad.

ción. Para realizar esta evaluación se empleó el Modelo de Volumen de Servicio.

El Modelo de Volumen de Servicio (SVM) es una herramienta de análisis utilizada para estimar la cobertura de un sistema de aumentación basado en satélite respecto a los requerimientos de desempeño en operaciones de navegación [10].

El SMV contiene los modelos de las constelaciones GNSS, los modelos de los algoritmos implementados en la estación maestra de un sistema de aumentación para el cálculo del UDRE y el GIVE, y esquemas adicionales necesarios para la evaluación sistemas de aumentación [12] [13]. Esto nos permite evaluar escenarios tanto reales e hipotéticos, con el propósito de medir la disponibilidad para diferentes niveles de servicio ofrecidos por el sistema de aumentación a los usuarios.

El SVM se encuentra implementado como una herramienta de simulación, y para nuestro análisis se utilizó el *SBAS-Simulator. Esto nos permitió conocer el desempeño de la red de 26 estaciones de referencia, permitiendo identificar la disponibilidad para operaciones con GNSS los tipos de operaciones definidos por la OACI. Evaluar esta distribución de red permite determinar los niveles alcanzados por esta distribución en cuestión al desempeño como sistema de navegación y realizar modificaciones necesarias. Con los resultados del análisis SVM, se realizó una modificación a la red de 26 estaciones de referencia con la finalidad de mejorar la disponibilidad en las zonas que presentaron bajos niveles de desempeño. La tabla 1 presenta las ubicaciones de estaciones de referencia resultante de este análisis y la figura 3 muestra la ubicación de las estaciones dentro del país. Esta segunda propuesta se compone de 21 estaciones de referencia. La finalidad de emplear un número menor de estaciones de referencia es el reducir la complejidad computacional en el diseño de la estación maestra, la cual depende del número de estaciones de referencia. Los criterios de evaluación SVM aplicados en estas distribuciones de red se basaron en determinar los niveles de precisión y disponibilidad alcanzados dentro del país.

i) Resultados de análisis de exactitud

La exactitud es la diferencia entre la posición estimada y la posición real. Para una posición estimada en un determinado lugar, la probabilidad de que el error de posición se encuentre dentro de los requisitos de exactitud deberá cumplirse por lo menos el 95% del tiempo de medición o simulación. Los niveles de exactitud bajo el esquema del SVM se determinan

*SBAS-Simulator desarrollado por la Agencia Espacial Europea en conjunto con IGUASSU Software Systems.

Tabla 1. Red de estaciones de referencia obtenidas del estudio SVM.

Estación de referencia	Estación de referencia	Estación de referencia
1. Campeche	8. Cozumel	15. Merida
2. Cancún	9. Ensenada	16. Nogales
3. Ciudad Acuña	10. Guerrero Negro	17. Puerto Escondido
4. Ciudad Juárez	(Baja California)	18. Pto. Vallarta
5. Ciudad de México	11. Hermosillo	19. Tapachula
6. Chetumal	12. Los Cabos	20. Tijuana
7. Chihuahua	13. Los Mochis	21. Zihuatanejo
	14. Matamoros	

a partir del Límite de Protección Horizontal (HPL) y el Límite de Protección Vertical (VPL). El HPL y el VPL se derivan a partir de los algoritmos de estimación del UDRE y del GIVE.

La OACI define umbrales de alarma establecidos para cada plano, esto es Límite de Alerta Horizontal (HAL) y Límite de Alerta Vertical (VAL). Estos límites de alarma HAL y VAL son comparados con los valores de HPL y VPL respectivamente definiendo los tipos de operaciones de navegación que el sistema de aumentación puede apoyar [14]. La figura 4 y la figura 5 muestran los valores de exactitud obtenidos para la configuración de 26 y 21 estaciones de refe-

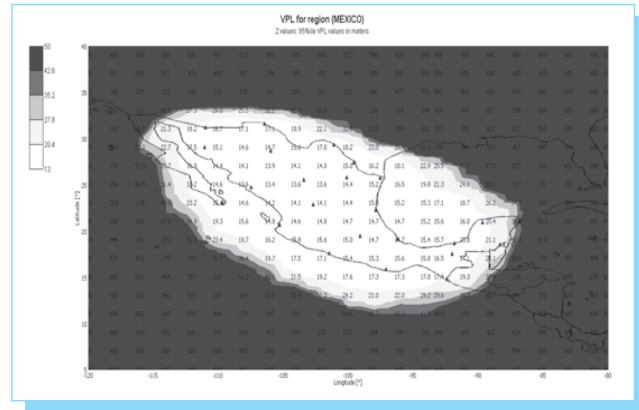


Fig. 4. Mapa donde se proyectan los niveles de protección vertical obtenidos por la configuración de 26 estaciones de referencia.

rencia respectivamente. La tabla 2 reporta la comparación de los niveles alcanzados por las dos configuraciones de red, con base en los límites de alerta horizontal y vertical. Con esto identificamos los tipos de operación que estas propuestas de red nos permiten alcanzar. La categoría de Aproximación con Guía Vertical del tipo I (APV-I) es la máxima categoría que logran alcanzar las dos propuestas.

Para alcanzar las categorías que exigen mayor precisión se hace necesario ajustar los modelos de estimación de error, principalmente los que tienen que ver con los errores de retardo ionosféricos ya que éstos impactan principalmente en el error para el plano vertical.

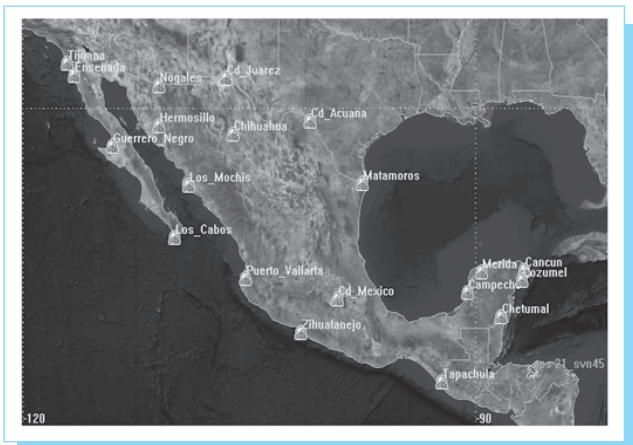


Fig. 3. Red de 21 estaciones de referencia.

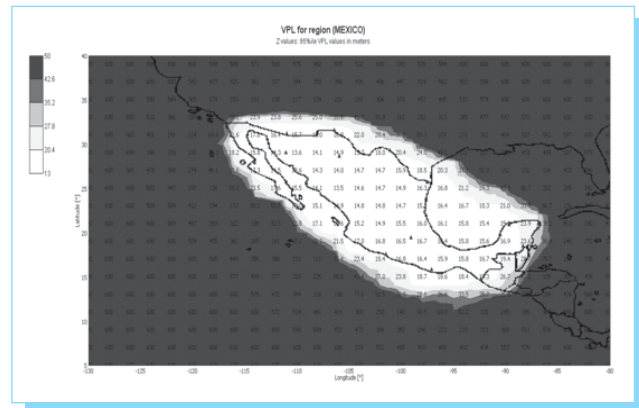


Fig. 5. Mapa donde se proyectan los niveles de protección vertical obtenidos por la configuración de 21 estaciones de referencia.

Tabla 2. Tabla comparativa de las operaciones permitidas con las dos propuestas de red de monitoreo.

Operación ordinaria	Límite de alerta horizontal	Límite de alerta vertical	Tiempo máximo de emisión de alerta	Red de 26 estaciones	Red de 21 estaciones
En ruta (oceánica/continental de baja densidad)	7.4 km (4 NM)	no asignado	5 minutos	cumple	cumple
En ruta (continental)	3.7 km (2 NM)	no asignado	5 minutos	cumple	cumple
En ruta, de terminal	1.85 km (1 NM)	no asignado	15 segundos	cumple	cumple
NPA	556 m (0.3 NM)	no asignado	10 segundos	cumple	cumple
APV-I	40 m (130 ft)	50 m (164 ft)	6 segundos	cumple	cumple
APV-II	40 m (130 ft)	20 m (66 ft)	6 segundos	no cumple	no cumple
Aproximación de precisión de categoría I	40 m (130 ft)	15 a 10 m (50 ft a 33 ft)	6 segundos	no cumple	no cumple

ii) Resultados de análisis de disponibilidad

La disponibilidad del GNSS se caracteriza como la parte del tiempo en que el sistema puede utilizarse para la navegación mientras se presenta información confiable de navegación. Esto se refiere al tiempo en que se mantienen los niveles de HPL y VPL por debajo de los valores límite HAL y VAL requeridos para cierta categoría de operación. Se evaluó la disponibilidad para las dos distribuciones de estaciones de referencia y la máxima categoría alcanzada por estas redes fue para operaciones tipo APV-I.

La red con 21 estaciones de referencia presentó el mejor caso de disponibilidad llegan-

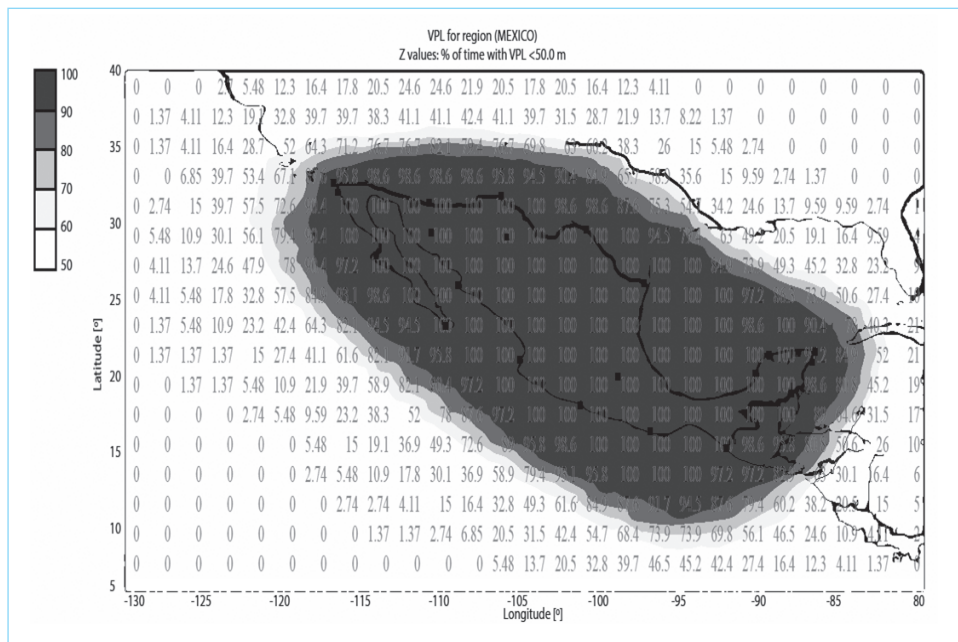


Fig. 6. Mapa de contorno de disponibilidad respecto al VPL obtenido de la red de 21 estaciones de referencia.

do a un porcentaje del 100% en la mayor parte de la República Mexicana, excepto para una pequeña región del Caribe mexicano donde solamente se consigue alcanzar 98.6% de disponibilidad. La figura 6 muestra el mapa con el contorno de disponibilidad para el caso de la red de 21 estaciones de referencia.

Aplicar el esquema de evaluación SVM permite identificar el desempeño de la navegación basada en GNSS dentro de México. Esto permite conocer si la configuración de red propuesta puede apoyar las operaciones de navegación aérea asegurando los niveles de desempeño marcados por la OACI.

3. Conclusiones

La comunidad aeronáutica está migrando al uso de los GNSS como medios primario de navegación, debido a las ventajas de acceso, operativas y económicas que éstos ofrecen. Es necesario crear sistemas que mejoren el servicio de posicionamiento estándar y que se mantengan monitoreando de manera continua a los GNSS.

Los resultados mostrados en este trabajo permitieron conocer las condiciones que presentan los GNSS sobre la República Mexicana, identificando las zonas que presentan problemas de desempeño de estos sistemas. El estudio de visibilidad permitió identificar las zonas que posiblemente presentan problemas de acceso de la señal GNSS que resultaría en una degradando el servicio de posicionamiento geográfico.

Esto es necesario para la integración del sistema de monitoreo GNSS que apoye las operaciones de navegación aérea dentro de México.

Uno de los puntos clave para el diseño del sistema de monitoreo es la distribución y el número de estaciones de referencia, ya que la distribución impacta en la precisión que estos sistemas ofrecen. El número de estaciones de referencia tiene un impacto en la eficiencia y diseño de una estación maestra. Por esta razón se buscó reducir el número de estaciones de referencia de 26 estaciones a 21 estaciones. El estudio del modelo de volumen de servicio permitió identificar el desempeño obtenido en base a los criterios de la OACI por las dos configuraciones de red. Esta evaluación permitió tener una aproximación de los resultados de precisión y disponibilidad obtenidas si estas redes operarán como un sistema de aumentación. Esto se realizó utilizando herramientas informáticas que tienen implementados los algoritmos que usan los sistemas de aumentación, los cuales emplean parámetros generales de operación. Por esta

razón, es necesario realizar algoritmos ajustados a las condiciones presentes en nuestro país, principalmente aquellos que tienen relación con los retardos ionosféricos. Es necesario desarrollar modelos del comportamiento de la ionosfera para México con el propósito de mejorar los algoritmos de estimación del retardo ionosférico.

Referencias

- [1] Organización de Aviación Civil Internacional, "Doc. 9750. Plan Mundial de Navegación Aérea". 3ª ed., 2007.
- [2] Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), "Telecomunicaciones aeronáuticas, Volumen I, Radioayudas para la navegación, Anexo 10". 2006.
- [3] S. Gleason Demoz, y G. Egziabher, *GNSS Applications and Method*, Artech House, 2009.
- [4] P. D. Groves, *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*, Artech House, 2008.
- [5] B. W. Parkinson, J. J. Spilker Jr., P. Axelrad, y P. Enge, *Global Positioning System: Theory and applications Vol. I & Vol II*, Progress in Astronautics and Aeronautics.
- [6] J. Shau-Shiun, "Aircraft landing using a modernized global positioning system and the wide area augmentation system", Tesis PhD, Stanford University, 2003.
- [7] J. C. Jubin, y D. L. Shaver, "Wide-Area Differential GPS Reference-Station Placement", *Proceedings of IEEE's Position Location And Navigation Symposium (PLANS-96)*, Atlanta, pp. 503-514, abril, 1996.
- [8] P. L. Arayana, K.V.S Saiprasad, y D.C. Reddy, "Wide Area Reference Station Placement for an Indian WAAS" *ION NTM-2001*, 22-24, enero 2001, Long Beach, CA.
- [9] M. S. Grewal, L. R. Weill, y A. P. Andrews, *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration*, John Wiley & Sons Inc. Publications, 2001.
- [10] R. Malla, y W. Jiun-Tsong, "The Service Volume Module Its Philosophy and Implementation" *Proceedings of the 11th International ION GPS*, 1998.
- [11] Organización de Aviación Civil Internacional, "Doc. 9613. Manual de Navegación Basada en el Desempeño (PBN)". 3ª ed., 2008.
- [12] E. Sardon, J.A. de la Fuente, N. Zarraoa, J. Nieto, y J. Cosmen, "UDRE computation: a key issue for space based augmentation system performance", GMV S.A.
- [13] S. N. Thipparthi, "Improving positional accuracy using carrier smoothing techniques in inexpensive GPS receivers", Tesis de Maestría, Ingeniería Eléctrica, New Mexico State University, 2004.
- [14] Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), "Handbook on radio frequency spectrum requirements for civil aviation", 2010.