

GPS CINEMÁTICO DE PRECISIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DE PUNTOS EN LOS AEROPUERTOS

Jorge Moya Zamora y Julio Roldán Rodríguez

Escuela de Topografía, Catastro y Geodesia, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica
Email: jmoya@una.ac.cr; jroldan@una.ac.cr

RESUMEN

El establecimiento del apoyo terrestre para la navegación aérea es de vital importancia. De esa manera, el empleo del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es el medio más utilizado actualmente, tanto para la navegación de las aeronaves, como en la determinación de los puntos de ayuda para dicha navegación, en lo que se refiere a las aproximaciones de las aeronaves, sus aterrizajes y ubicación en los puentes de las terminales aéreas. Estas redes de puntos se deben definir con base en normas ya establecidas y reguladas por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI). Entre las características más sobresalientes para la determinación de los puntos están el vínculo al Sistema Geodésico Mundial WGS84 y, evidentemente, la exactitud en las coordenadas de los puntos, la cual es fundamental para garantizar las actividades propias de la navegación aérea. Se expondrán a continuación los resultados obtenidos al aplicar la metodología GPS cinemática en la determinación de estos puntos.

PALABRAS CLAVES: GPS cinemático, aeropuertos, ajuste.

ABSTRACT

The establishment of terrestrial support for aerial navigation is very important. Nowadays the use of Global Positioning System (GPS) is the most popular technique for aerial navigation, as is it used in the determination of ground control points, which are used for the approximations of planes, their

landings and their locations on the bridges at airports. These networks must meet some norms, which are regulated by the Organización de Aviación Civil Internacional (OACI). Their most important characteristics are the link to the World Geodetic System (WGS84), and the accuracy of the coordinates, which are fundamental to guarantee the activities of aerial navigation. In this article we present the kinematic GPS measurements in the establishment of this kind of points.

KEYWORDS: kinematic GPS, airports, adjustment.

INTRODUCCIÓN

En Costa Rica, la Dirección General de Aviación Civil (DGAC) necesitaba implementar el sistema WGS84 en las terminales aéreas de carácter internacional de acuerdo con las normas de la OACI. Es entonces, cuando se contacta a la Escuela de Topografía, Catastro y Geodesia, de la Universidad Nacional (UNA), como la institución para asumir el proyecto. Los trabajos en los aeropuertos internacionales Juan Santamaría y Daniel Oduber Quirós se realizaron con la modalidad de venta de servicios, que efectúan las escuelas de la UNA a la sociedad costarricense. El establecimiento de las redes básicas en los dos aeropuertos se hizo utilizando la metodología de medición estática GPS, mientras que para la determinación de una serie de puntos adicionales, incluidos los ejes de las pistas, se hicieron mediciones GPS cinemáticas. Se debe hacer notar que esta variante de medición GPS

cumplió a cabalidad con los requerimientos solicitados en la determinación de los puntos de interés.

MATERIALES Y MÉTODOS

La modalidad GPS cinemática se aplica a la solución de los mismos problemas que resuelve el posicionamiento estático estándar, el cual fue presentado por primera vez en 1985 por el Dr. Benjamín Remondi del US National Geodetic Survey. El método consiste en la determinación de los incrementos en coordenadas (ΔX , ΔY , ΔZ) en forma *estática y relativa* con respecto a un punto fijo (NÚÑEZ *et al.* 1992). El posicionamiento cinemático relativo involucra al menos dos receptores, uno estacionario y otro en movimiento y ambos deben medir en forma simultánea, obteniendo exactitudes en los resultados del orden métrico cuando se trabaja por código y centimétrica cuando se emplea medición por fase (HOFFMAN-WELLENHOF *et al.* 1992).

Durante la etapa de medición, uno de los receptores permanecerá fijo, el denominado máster y el otro receptor será móvil, el llamado róver que hará el recorrido sobre los puntos a determinar. Es esencial que durante la medición, ambos receptores realicen observaciones manteniendo señal constante por lo menos a 4 satélites. Se identifican dos etapas durante el proceso: la *iniciación* y el *itinerario*. En la primera, el objetivo fundamental es la determinación de una serie de constantes instrumentales entre la pareja de aparatos, pero fundamentalmente la resolución de ambigüedades. El itinerario, por su parte, lo realiza el receptor móvil, haciendo paradas sobre los puntos de interés el tiempo programado, sin perder la señal y regresando al final al punto de salida.

ESPECIFICACIONES

La OACI, como órgano encargado de la regulación de la navegación aérea civil, tiene entre sus funciones actuales la unificación de sistemas de referencia con fines de navegación. Dichos sistemas de referencia consisten en puntos ubicados en los aeropuertos de las ciudades, los cuales deben cumplir con diversas normas estipuladas por la misma OACI. Entre las regulaciones adoptadas está el vínculo de esas redes de puntos al sistema

WGS84, a través de mediciones GPS, las cuales deben cumplir con ciertos criterios.

Para el establecimiento de las redes básicas de apoyo en los aeropuertos internacionales Juan Santamaría y Daniel Oduber Quirós se empleó la modalidad estática, mientras que para una serie de puntos de interés adicional se definieron sus coordenadas usando mediciones GPS cinemáticas. Las especificaciones para las mediciones en estos puntos implicaban lograr una exactitud de $\pm 0,250$ m en las coordenadas ajustadas de latitud y longitud elipsóidicas, hacer una ocupación de 3 minutos con un intervalo de rastreo (medición) de 3 segundos. El equipo utilizado en estas mediciones consistió en un receptor GPS CORS 5700 y una antena Zephyr Geodetic, ambos de Trimble®, el cual se ubicó en uno o varios de los vértices de la red básica principal de acuerdo con previa planificación; este equipo funcionaba como el máster. La parte móvil consistió en un receptor geodésico 4000 SST y una antena LI Compact Dome, ambos de Trimble®.

REPLANTEO CONVENCIONAL

El proyecto necesitaba, además del vínculo al sistema WGS84 de las redes básicas, el replanteo por medios convencionales del eje de la pista principal, intersecciones de entrada y salida de aviones y otros puntos adicionales de interés particular. Para esta etapa se trabajó con una estación total Topcon® GTS 225 de exactitud nominal $\pm 5''$ y ± 2 mm ± 2 ppm en la parte angular y lineal, respectivamente; haciendo un arreglo especial con los prismas y señales luminosas (halógenos), para poder replantear los puntos del eje, los cuales después, servirían de base para el replanteo de las intersecciones. En esta etapa se suministraron planos de los aeropuertos a partir de los cuales se pudo extraer la información necesaria para el replanteo. En el cuadro 1 se muestra la totalidad de puntos replanteados por medios convencionales en los dos aeropuertos.

MEDICIÓN GPS CINEMÁTICA

La literatura contempla tres posibilidades de hacer la inicialización del método cinemático GPS. La primera con *base estática*, la cual consiste en observar una base como si se tratara de un

Cuadro 1. Descripción y total de puntos replanteados convencionalmente en los aeropuertos internacionales Juan Santamaría y Daniel Oduber Quirós.

Aeropuerto Internacional Juan Santamaría		Aeropuerto Internacional Daniel Oduber Quirós	
Descripción	Total de puntos	Descripción	Total de puntos
Eje de la pista principal	20	Eje de la pista principal	9
Intersecciones	37	Intersecciones	25
Puntos adicionales	8	Puntos adicionales	12

posicionamiento relativo normal; está la *base conocida*, en la que se emplean los extremos de una base cuyas coordenadas sean conocidas con una exactitud centimétrica; y por último el *intercambio (swapping)*, donde se hacen las observaciones en una base relativamente corta y después de un tiempo se intercambian las antenas manteniendo siempre la señal (NÚÑEZ *et al.* 1992).

De las posibilidades descritas anteriormente, se aplicó la segunda, ya que los puntos de las redes de apoyo se determinaron con una alta exactitud, suficiente para el método. Teniendo replanteados los puntos a determinar se procedió a realizar el levantamiento cinemático, el cual se describe en los siguientes apartados haciendo referencia a la figura 1.

- Por las exigencias en cuanto al acceso a las instalaciones del aeropuerto, la mayoría de las mediciones se realizaron entre las 00:00 horas y las 05:30 horas, lo que limitaba evidentemente el avance en el replanteo y levantamiento.
- En los puntos de la red básica principal, marcados con triángulos de color negro en la figura, se tenía la posibilidad de realizar controles durante la medición. De acuerdo con la programación establecida, se instalaba la estación máster y se hacía la iniciación con el receptor móvil en otro punto conocido, por ejemplo, los puntos M011 y UM00, respectivamente, según la figura 1. Particularmente por las distancias entre los puntos de interés, se optó por acondicionar uno de

los vehículos de la ETCG, de forma que el receptor y un operador se ubicaran dentro del mismo y otra persona se encargara de posicionar la antena sobre los puntos. En la figura 1 se esquematizan éstos, por los círculos numerados de color magenta.

- Específicamente, la metodología comprende iniciar en un punto conocido, recorrer los puntos nuevos y cerrar en el punto inicial. Tomando en cuenta las especificaciones de la OACI se realizaba posicionamiento cinemático sobre los puntos por un lapso de 3 minutos con un rastreo de 3 segundos. Se tenían, entonces, un total de 60 mediciones, intercalando mediciones en puntos conocidos para un control adicional. El proceso se repetía dos veces, es decir, se tomaban dos conjuntos de 60 mediciones para cada punto, procurando que entre las mediciones transcurriera un lapso de una hora aproximadamente. De esta forma, en cada punto se tomaron un total de 120 mediciones. En la figura se destaca el recorrido del rover con la línea de color rojo. El recorrido doble implica pasar del punto M016 al punto UM00 y luego repetir las mediciones sobre todos los puntos.
- Entre los cuidados se destacan el mantenimiento de la señal durante toda la medición, el chequeo del número de satélites y la vigilancia de la altura de la antena, así como de la verticalidad del bastón. Estos cuidados no fueron mayor problema, ya que evidentemente se trabajó sobre las pistas y zonas

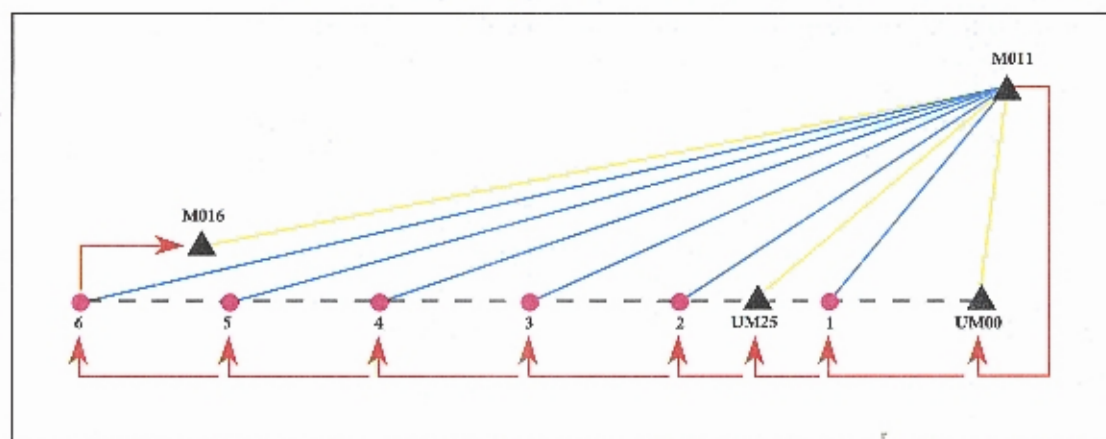


Figura 1. Descripción de la metodología de medición GPS cinemática.

aledañas, las cuales no tienen ningún obstáculo considerable.

- Una vez efectuada la medición cinemática, se elaboraron los datos con el programa suministrado por el fabricante, en este caso el TGO versión 1.6 de Trimble®. La generación de los vectores desde el punto conocido permite calcular las coordenadas de los puntos de interés, además de poder realizar un ajuste por mínimos cuadrados para obtener tanto la posición tridimensional ajustada como su desviación estándar. Los vectores GPS se marcan en la figura con líneas de color azul a los puntos nuevos y con líneas de color amarillo los vectores de control entre puntos conocidos.

RESULTADOS

Se expondrán a continuación los resultados en las coordenadas ajustadas de los puntos que definen solamente los ejes de la pista principal de ambos aeropuertos, los de encadenamiento completo, por considerarlos de un mayor interés y, además, porque sobre ellos se realizarán tanto el despegue como el aterrizaje de las aeronaves. En el cuadro 2 se muestran las coordenadas elipsoidicas ajustadas de los puntos y su exactitud referida al sistema WGS84, marco de referencia ITRF2000. Del cuadro se desprende que la exactitud al 95% de probabilidad en las coordenadas de

latitud y longitud cumple totalmente con los requerimientos solicitados. La componente vertical, por su naturaleza, es siempre menos exacta que la parte horizontal.

En el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría, la exactitud va desde los 3,8 mm hasta los 17,7 mm en las coordenadas de latitud y longitud, mientras que la exactitud en la altura elipsoidal está entre los 12,0 y 52,0 mm. En el Aeropuerto Daniel Oduber Quirós, el comportamiento es de 1,0 a 11,0 mm en latitud y longitud. En altura es de 20,0 a 34,0 mm.

Adicionalmente a la elaboración de las mediciones GPS cinemáticas y los resultados tan favorables, se decidió realizar una prueba de cálculo extra, para verificar en principio las coordenadas obtenidas con este método. Se calcularon las coordenadas elipsoidicas de los puntos de interés haciendo uso de las fórmulas de la geodesia matemática, que permiten determinar coordenadas de un punto, a partir de tres elementos conocidos sobre la superficie del elipsoide: las coordenadas de un punto, la distancia y el azimut desde un punto al que se quiere dar posición, el denominado problema directo. En los cuadros 3 y 4 se muestran las diferencias en segundos de arco y en forma lineal, entre las coordenadas obtenidas por las mediciones GPS y las calculadas con base en las fórmulas de la geodesia matemática.

Cuadro 2. Coordenadas elipsoidicas ajustadas y su exactitud al 95% de probabilidad dentro del Sistema WGS84, pertenecientes a los ejes de las pistas principales de los aeropuertos internacionales Juan Santamaría y Daniel Oduber Quirós.

AEROPUERTO INTERNACIONAL JUAN SANTAMARÍA

Punto	LATITUD NORTE [° ‘ ‘‘]	S _{LAT} [mm]	LONGITUD OESTE [° ‘ ‘‘]	S _{LON} [mm]	ALTURA [m]	S _{ATL} [mm]
0+300	9 59 51,83584	3,42	84 11 55,02171	3,78	938,661	13,18
0+390	9 59 50,80239	12,14	84 11 57,78619	13,72	937,460	43,30
0+500	9 59 49,53878	3,80	84 12 01,16403	4,11	936,024	12,03
0+600	9 59 48,39107	10,31	84 12 04,23494	11,61	934,676	34,11
0+900	9 59 44,94457	4,58	84 12 13,44975	5,20	930,733	14,98
1+000	9 59 43,79618	13,62	84 12 16,52110	16,11	929,397	46,76
1+200	9 59 41,49814	13,63	84 12 22,66405	15,93	926,797	47,19
1+500	9 59 38,05232	7,14	84 12 31,87769	8,70	923,096	21,90
1+750	9 59 35,17951	14,97	84 12 39,55686	17,23	920,457	52,00
1+800	9 59 34,60513	14,28	84 12 41,09264	16,46	919,867	49,33
1+850	9 59 34,03123	10,63	84 12 42,62780	12,23	919,329	35,18
2+100	9 59 31,15827	12,59	84 12 50,30650	14,18	917,032	42,16
2+400	9 59 27,71357	15,37	84 12 59,52074	17,69	914,485	51,62
2+700	9 59 24,26799	13,15	84 13 08,73583	14,86	911,857	41,60
2+940	9 59 21,50927	11,64	84 13 16,10665	13,18	909,814	33,33
3+000	9 59 20,82036	11,54	84 13 17,95038	13,01	909,313	32,50

AEROPUERTO INTERNACIONAL DANIEL ODUBER QUIRÓS

Punto	LATITUD NORTE [° ‘ ‘‘]	S _{LAT} [mm]	LONGITUD OESTE [° ‘ ‘‘]	S _{LON} [mm]	ALTURA [m]	S _{ATL} [mm]
0+000	10 35 51,47001	6,72	85 31 57,56403	7,28	91,199	24,72
0+300	10 35 48,14642	5,20	85 32 06,84318	5,70	90,014	19,52
0+600	10 35 44,82327	8,11	85 32 16,12221	9,16	88,815	25,28
0+900	10 35 41,49979	6,76	85 32 25,40196	8,34	87,742	23,83
1+200	10 35 38,17610	3,34	85 32 34,68076	4,21	87,203	14,60
1+500	10 35 34,85252	4,41	85 32 43,96032	5,70	87,105	19,09
1+800	10 35 31,52859	1,95	85 32 53,23972	2,41	87,431	15,15
2+100	10 35 28,20515	8,79	85 33 02,51851	11,24	87,476	33,57
2+400	10 35 24,88158	0,80	85 33 11,79814	5,87	86,697	26,84
2+700	10 35 21,55678	5,87	85 33 21,07661	6,97	85,378	33,01

Cuadro 3. Cuantificación de las diferencias entre las coordenadas ajustadas GPS y las calculadas con base en el problema directo para puntos del Aeropuerto Internacional Juan Santamaría.

Punto	Latitud GPS	Longitud GPS	Diferencia [“]	Diferencia [“]	Diferencia [mm]	Diferencia [mm]
	Latitud calculada	Longitud calculada				
0+300	9 59 51,83584	84 11 55,02171	0,00005	0,00054	1,6	16,2
	9 59 51,83589	84 11 55,02225				
0+390	9 59 50,80239	84 11 57,78619	-0,00032	0,00057	-9,9	17,1
	9 59 50,80207	84 11 57,78676				
0+500	9 59 49,53878	84 12 01,16403	-0,00027	0,00156	-8,4	46,8
	9 59 49,53851	84 12 01,16559				
0+600	9 59 48,39107	84 12 04,23494	-0,00126	0,00232	-39,1	69,6
	9 59 48,38981	84 12 04,23726				
0+900	9 59 44,94457	84 12 13,44975	-0,00090	0,00244	-27,9	73,2
	9 59 44,94367	84 12 13,45219				
1+000	9 59 43,79618	84 12 16,52110	-0,00125	0,00275	-38,8	82,5
	9 59 43,79493	84 12 16,52385				
1+200	9 59 41,49814	84 12 22,66405	-0,00069	0,00305	-21,4	91,5
	9 59 41,49745	84 12 22,66710				
1+500	9 59 38,05232	84 12 31,87769	-0,00115	0,00423	-35,6	126,9
	9 59 38,05117	84 12 31,88192				
1+800	9 59 34,60513	84 12 41,09264	-0,00033	0,00408	-10,2	122,4
	9 59 34,60480	84 12 41,09672				
2+100	9 59 31,15827	84 12 50,30650	0,00011	0,00493	3,4	147,9
	9 59 31,15838	84 12 50,31143				
2+400	9 59 27,71357	84 12 59,52074	-0,00169	0,00535	-52,4	160,5
	9 59 27,71188	84 12 59,52609				
2+700	9 59 24,26799	84 13 08,73583	-0,00268	0,00489	-83,1	146,7
	9 59 24,26531	84 13 08,74072				
3+000	9 59 20,82036	84 13 17,95038	-0,00169	0,00490	-52,4	147,0
	9 59 20,81867	84 13 17,95528				

CONCLUSIONES

En forma general, el proceso de medición GPS empleado en esta determinación, además del análisis de los resultados obtenidos, permite concluir básicamente:

- La metodología de medición GPS en la modalidad cinemática brinda resultados sa-

tisfactorios, considerando que se puede realizar el levantamiento de una gran cantidad de puntos en forma relativamente rápida. El tiempo que se debe medir sobre los puntos debe ser tal que permita resolver la ambigüedad en las observaciones GPS.

- Las desviaciones estándar en las coordenadas ajustadas reflejan, en primer lugar, que

Cuadro 4. Cuantificación de las diferencias entre las coordenadas ajustadas GPS y las calculadas con base en el problema directo para puntos del Aeropuerto Internacional Daniel Oduber Quirós.

Punto	Latitud GPS	Longitud GPS	Diferencia [“]	Diferencia [“]	Diferencia [mm]	Diferencia [mm]
	Latitud calculada	Longitud calculada				
0+000	10 35 51,47001	85 31 57,56403	0,00017	-0,00008	5,27	-2,40
	10 35 51,46984	85 31 57,56411				
0+300	10 35 48,14642	85 32 06,84318	-0,00005	-0,00053	-1,60	-15,90
	10 35 48,14647	85 32 06,84371				
0+600	10 35 44,82327	85 32 16,12221	0,00024	-0,00106	7,68	-31,80
	10 35 44,82303	85 32 16,12327				
0+900	10 35 41,49979	85 32 25,40196	0,00027	-0,00081	8,64	-24,30
	10 35 41,49952	85 32 25,40277				
1+200	10 35 38,17610	85 32 34,68076	0,00018	-0,00146	5,76	-43,80
	10 35 38,17592	85 32 34,68222				
1+500	10 35 34,85252	85 32 43,96032	0,00027	-0,00129	8,64	-38,70
	10 35 34,85225	85 32 43,96161				
1+800	10 35 31,52859	85 32 53,23972	0,00008	-0,00122	2,56	-36,60
	10 35 31,52851	85 32 53,24094				
2+100	10 35 28,20515	85 33 02,51851	0,00047	-0,00170	15,04	-51,00
	10 35 28,20468	85 33 02,52021				
2+400	10 35 24,88158	85 33 11,79814	0,00080	-0,00130	25,60	-39,00
	10 35 24,88078	85 33 11,79944				
2+700	10 35 21,55678	85 33 21,07661	-0,00003	-0,00200	-0,96	-60,00
	10 35 21,55681	85 33 21,07861				

en el proyecto de los aeropuertos, la metodología cinemática cumplió a satisfacción con las especificaciones de la OACI. Sin embargo, en un contexto más generalizado, actualmente en Costa Rica es una posibilidad real, para muchos de los colegas, ya que los equipos modernos de GPS contemplan esta variante en las mediciones y la misma puede aplicarse en la determinación de puntos con fines catastrales donde la exactitud requerida sea de $\pm 0,050$ m.

- La modalidad GPS cinemática es de aplicación relativamente nueva en el país, se pueden seguir haciendo investigaciones y reco-

mendaciones al respecto de la manera de definir criterios técnicos y metodológicos que permitan una optimización de la misma. En ese sentido, la georreferenciación de los objetos para su integración posterior a sistemas de información geográfica o a la actualización catastral se verá altamente beneficiada por la rápida captura de la información, con una exactitud acorde a casi cualquier levantamiento topográfico convencional, quedando de momento el GPS un poco atrás, por sus limitaciones en ciertas áreas donde la topografía convencional no se ha podido sustituir aún.

BIBLIOGRAFÍA

- Hoffman-Wellenhof, B., H. Lichtenegger and J. Collins. 1992. *Global Positioning System: Theory and Practice*. Adolf Holzhausens Nachfolger, Springer, Viena, Austria. 326 p.
- Núñez-García, A., J.L. Valbuena y J. Velasco. 1992. *GPS: La nueva era de la topografía*. Ediciones de las Ciencias Sociales. Madrid, España. 236 p.
- OACI. 1997. *Manual del sistema geodésico mundial 1984 (WGS84)*. Organización de Aviación Civil Internacional. Catálogo de publicaciones y ayudas audiovisuales de la OACI.
- Roldán, J. y J. Moya. 2004. *Medición GPS, replanteo convencional y medición GPS cinemática, para la determinación de posiciones dentro del sistema mundial WGS84 en el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría*. Informe final. Escuela de Topografía, Catastro y Geodesia, Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. 37 p.
- Roldán, J. y J. Moya. 2004. *Medición GPS, replanteo convencional y medición GPS cinemática, para la determinación de posiciones dentro del sistema mundial WGS84 en el Aeropuerto Internacional Daniel Oduber Quirós*. Informe final. Escuela de Topografía, Catastro y Geodesia, Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. 38 p.