

Procesamiento de las mediciones satelitarias GPS del proyecto Densificación REGVEN.

*Melvin Hoyer, Eugen Wildermann, Levy Jiménez, Hermogenes Suarez, Humberto García, Laboratorio de Geodesia Física y Satelital, La Universidad Del Zulia.
Francisco Fuenmayor, PDVSA*

Resumen

La industria petrolera venezolana realiza el proyecto de densificación de la red geocéntrica venezolana REGVEN con el objeto de establecer nuevos puntos de orden C en las áreas de interés para las labores propias de exploración y producción. Al efecto se diseñó un proyecto que contempla la medición de aproximadamente 700 nuevos puntos, bajo especificaciones propias para el trabajo de campo: equipos de doble frecuencia, sesiones de tres horas de duración, ángulo de elevación de 10 grados y rata de captura de 15 seg., entre otras.

El procesamiento de toda la data GPS generada en el marco de este proyecto lo realiza el Laboratorio de Geodesia Física y Satelital LGFS-LUZ.

Este trabajo presenta las especificaciones, estrategias, análisis y conclusiones del procesamiento de las mediciones GPS realizadas en el marco de este proyecto, bajo la utilización del software científico Bernese versión 4.2, el cual permite la utilización de diferentes opciones de cálculo tales como, efemérides precisas, utilización de parámetros de rotación terrestre del IGS, empleo de modelos de corrección troposférica e ionosférica y otros, para obtener las exactitudes planteadas en el mismo.

La calidad de las coordenadas obtenidas está en el nivel centimétrico para la posición y las alturas elipsoidales, resultados que garantizan la confiabilidad de las redes, cumpliendo con las expectativas trazadas al planificar las mismas.

Summary

A densification project of the national, geocentrically defined reference network REGVEN currently is being performed by the Venezuelan petroleum industry to establish new C order stations in areas of interest for their exploration and production purposes. A network of nearly 700 points has been designed using some special project restrictions: use of two frequency GPS receivers only, static observation sessions for 3 hour, cut off elevation 10 degrees, data capture rate 15 seconds, etc.

The processing of all the GPS data is under work at Laboratory of Physical and Satellite Geodesy of Zulia University (LGFS-LUZ), Maracaibo.

The paper describes specifications, strategies, analysis and conclusions of GPS processing realized using scientific

software Bernese 4.2 which accounts for special options like use of precise ephemerides and IGS terrestrial rotation parameters, modeling of troposphere and ionosphere, etc., to achieve the established accuracy level.

Coordinate quality is in centimeter order for position and ellipsoidal height in fulfillment of projects requirements.

Introducción

Desde el 01 de Abril del 2.001 la empresa venezolana PDVSA dió inicio a la ejecución de varias campañas de mediciones satelitarias GPS, las cuales abarcaron las más importantes áreas de exploración y producción para la empresa. Dichas campañas fueron apoyadas en puntos de orden A ó B que pertenecen al nuevo marco de referencia venezolano REGVEN (Drewes H., et al., 1998), con el objeto de establecer redes geodesicas GPS con exactitudes de orden C (5 - 10 cm), generándose así una densificación de la misma (Fuenmayor F., et al., 2002).

Estas mediciones se realizaron de forma separada en ocho (08) campañas con 18 á 21 días de actividades en el campo cada una. La data GPS registrada durante el proyecto genera más de 900 líneas las cuales comprenden las vinculaciones que deben formarse entre las bases utilizadas para cada campaña con estaciones IGS, así como las que se generan entre las bases y sus respectivos puntos nuevos.

Toda esta data se debe procesar en el mismo datum y época de referencia para lo cual se ha enfrentado el problema de la falta de componentes de velocidad en los puntos REGVEN, por ello la vinculación con las estaciones IGS que dispongan de tal información.

El resultado estimado de este procesamiento da como total un aproximado de **550** estaciones nuevas ubicadas en todo el país con sus respectivas coordenadas geocentricas y geográficas.

Estando conscientes de que el método de mediciones satelitales GPS se caracteriza por acumular una gran cantidad de observaciones que de algún modo pueden estar afectadas por varias fuentes de error, tales como la propagación de la señal en las capas ionosféricas y troposféricas, errores inherentes a la unidad georeceptora, etc., la utilización de algún software comercial no garantizaría la exactitud que se espera alcanzar con este proyecto.

PROCESAMIENTO DENSIFICACIÓN PDVSA - REGVEN

Por lo anteriormente expuesto y debido a la importancia que reviste este proyecto, la empresa PDVSA consideró conveniente la utilización de un software científico especializado, que permita la aplicación de modelos correctivos y algoritmos que tiendan a minimizar tales errores y así de esta forma obtener las exactitudes planteadas.

Por lo tanto, el procesamiento de las mediciones satelitarias del proyecto densificación REGVEN, se efectúa utilizando el software Bernese ver. 4.2.

Este software de carácter científico, es conocido a nivel internacional por su alto grado de confiabilidad en el procesamiento y ajuste de la data GPS, debido a la utilización de modelos de corrección para la mayoría de los errores inherentes a las mediciones GPS, arrojando resultados de alta exactitud y precisiones milimétricas.

El trabajo comienza describiendo las características principales del software utilizado, seguidamente se presenta la metodología empleada para alcanzar los objetivos del trabajo mediante la utilización de diferentes opciones de cálculo tales como, efemérides precisas, empleo de modelos de corrección ionosférico y troposférico, parámetros de rotación terrestre y otros.

Por ultimo se plantean los problemas que surgieron en el cálculo, se hace un análisis de calidad y se comparan algunos resultados bajo diferentes condiciones los cuales acreditaran la calidad de las coordenadas obtenidas.

Descripción del software.

El Bernese es un paquete de programas usado para el procesamiento de mediciones GPS desarrollado por el Instituto Astronómico de la Universidad de Berna – Suiza. Durante varios años el Bernese ha estado modernizándose, contando actualmente con la versión 4.2 la cual fue la utilizada para este procesamiento (Beutler, E., et al., 2000).

La utilización de efemérides precisas, empleo de modelos de corrección troposférica e ionosférica, parámetros de rotación terrestre, el uso de la frecuencia combinada (L_3), la posibilidad de diferentes estrategias para la eliminación de ambigüedades, el posible procesamiento y ajuste simultáneo de las mediciones provenientes de receptores de una y dos frecuencias, la estimación simultánea de un gran número de parámetros, etc., entre muchos otros aspectos, garantizan que este software sea el más idóneo.

Preparación de los datos y vinculación.

Para iniciar el procesamiento propio de la campaña, se deben efectuar varias actividades las cuales se encuentran divididas en dos fases.

La primera fase denominada “Preparación de los datos GPS”, comprende las siguientes actividades:

- Descomprimir y organizar los archivos de datos de las estaciones medidas con receptores GPS de doble frecuencia (L_1, L_2).
- Revisión de las planillas de campo buscando: nombre de las estaciones, altura de antenas, receptor GPS utilizado, etc.
- Corrección de la altura de antenas utilizando el software Corraute ver 2.0 perteneciente al LGFS, y modificación del encabezado para los archivos RINEX en todas las estaciones.
- Adquisición de efemérides precisas vía Internet para los días que comprenda la campaña. Estas son accesibles transcurridos 14 días después de las mediciones.

Culminadas estas actividades se procede a realizar la segunda fase es decir la “vinculación”, la cual tiene como objetivo determinar coordenadas actualizadas de alta precisión para las estaciones GPS que funcionan como bases en cada campaña.

Para esto se calculan las líneas entre las estaciones bases y las estaciones IGS (Servicio GPS Internacional), las cuales poseen data GPS las 24 horas del día, componentes de velocidad y coordenadas actualizables de alta precisión.

Este proceso se ejecuta tanto para las bases nuevas como para las estaciones REGVEN, lo cual permite obtener coordenadas en el marco de referencia vigente para la fecha media de la campaña, el ITRF97.

Esto se debe a que las efemérides precisas utilizadas se encuentran en dicho marco de referencia. Así de esta forma todas las estaciones bases obtenidas de la vinculación se encontraran referidas al mismo marco de referencia ITRF97 en época 2001.6, siendo esta la época intermedia entre todas las campañas.

Las estaciones bases en su mayoría fueron vinculadas solamente con la estación IGS Maracaibo (MARA), debido a que la data GPS de otras estaciones IGS cercanas como Saint Croix (CRO1) y Bogota (BOGT), no se encuentra disponible por los servicios de Internet, para la época del trabajo.

El proceso de vincular las bases comienza al momento de generar una campaña en la cual solamente estarán involucradas las estaciones IGS, con las estaciones utilizadas como puntos de apoyo ó bases. Las líneas GPS generadas en la vinculación van desde los 120Km. hasta los 900Km., implicando este factor la utilización de estrategias distintas para cada campaña.

PROCESAMIENTO DENSIFICACIÓN PDVSA - REGVEN

Los criterios utilizados para este tipo de procesamiento tienen diferentes variantes tales como el peso asignado para las coordenadas de las estaciones, porcentaje de rechazo para las observaciones, creación de modelos troposféricos, tiempo simultáneo de observación, eliminación de satélites, la repetibilidad de los resultados en sesiones y/o días diferentes, etc., fueron considerados como factores de interés en función de la longitud de la línea base, para la aceptación de la solución.

El procesamiento de estas, se realiza día por día generándose tantas líneas GPS como días haya medido la estación con respecto a la estación IGS disponible.

En algunos casos la vinculación desde el punto de vista de procesamiento se consideró un tanto débil, debido a la utilización de una sola estación IGS, además de los casos en los cuales la base fue ocupada por pocos días, resultando varias estaciones base para una misma campaña, lo cual de por sí es un problema adicional. Aun así los resultados obtenidos demuestran una gran exactitud.

Procesadas todas las líneas de vinculación generadas para cada día de medición, se procede a realizar el ajuste de la red de vinculación. El software Bernese a diferencia de otros programas comerciales permite la creación de ecuaciones normales las cuales son utilizadas para realizar el ajuste final.

Los criterios estocásticos principales para la aceptación de los resultados en el cálculo de coordenadas fueron: la desviación estándar (RMS), la cantidad de datos no aceptados durante el cálculo, ambigüedades no resueltas, interrupciones, desplazamientos entre las componentes de las líneas bases y las matrices de correlación.

Como índice más fuerte siempre se consideró el RMS, para las estaciones, para el cálculo por día o para el ajuste combinado. Los demás criterios como cantidad de ambigüedades resueltas, porcentaje de aceptación ó rechazo, etc., pueden considerarse como factores de interés en función de la longitud de la línea base.

Los resultados obtenidos de las vinculaciones son plenamente satisfactorios en virtud de los requerimientos del proyecto. Los mismos se situaron en el orden de ± 3 mm y ± 7 mm para la posición y la altura respectivamente, en las campañas donde se encontraban una o dos bases a vincular y entre ± 6 mm y ± 12 mm para las que presentaron más de 3 bases.

Algunas campañas tomaron como bases estaciones REGVEN, cuyas coordenadas en ITRF97 época 2001.6, presentan las diferencias con las conocidas en su solución ITRF94 época 1995.4 que se observan en la tabla 1.

Estación	Vértice	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)
SURIPA	RG10	-0,0121	0,0026	-0,0703
GUASDUALITO	RG28	-0,0223	0,0458	-0,0391
CANOA	RG59	0,0070	-0,0188	-0,0321
AGUASAY	RG60	-0,0605	0,0028	-0,0467
MATA NEGRA	RG64	-0,0415	0,0369	-0,0242
LAGUNILLA	RG07	-0,1048	-0,1606	-0,0082
CEIBA	RG12	-0,0183	-0,0160	-0,0495
RECREO	RG02	-0,1257	0,0214	-0,0630
CHIGUARA	RG11	-0,0354	0,0521	-0,0713
ARIGUASAI	RG01	-0,0953	0,0090	-0,0608
CAPATARIDA	RG06	-0,1138	0,0038	-0,0284
AMUAY	RG05	-0,0825	-0,0585	-0,0143
	$\Sigma\Delta$	0.0597	0.0355	0.0423

Tabla 1. Diferencias de coordenadas geocéntricas para los vértices REGVEN (ITRF97 época 2001.6 – ITRF94 época 1995.4)

Estas diferencias son producto del desplazamiento propio de las estaciones con respecto al tiempo y como puede observarse el promedio de las mismas está en el orden de $\pm 3 - 5$ cm.

El análisis de esos valores especialmente algunos casos particulares (como El Recreo y Lagunillas) escapa del objetivo de este trabajo.

Procesamiento.

El procesamiento de cada campaña incluye las mediciones efectuadas durante los días del trabajo de campo del respectivo mes. La formación de las líneas bases se realizó siempre con respecto a la estación que fungiera de base según las especificaciones planteadas.

La metodología empleada para la estimación de parámetros fue la siguiente:

- Transformación de los datos en formato RINEX al formato Bernese. Para cada uno de los archivos de observación se generan cuatro archivos en formato Bernese, dos pertenecientes a mediciones con códigos y los restantes a la fase de las portadoras.
- Transformación de las efemérides precisas al formato de órbita tabulada Bernese.
- Creación de la órbita estándar para la campaña.
- Procesamiento de códigos. Aquí se realizan las correspondientes correcciones a los relojes de los receptores.
- Formación de las líneas bases independientes (Simple diferencias) a partir de los archivos de fase para cada una de las estaciones.

PROCESAMIENTO DENSIFICACIÓN PDVSA - REGVEN

- Creación de los modelos ionosféricos para efectuar las correcciones por efecto de la ionosfera.
- Se estimaron valores aproximados para los relojes del receptor provenientes de una solución de pseudo-rango (sub-programa codssp).
- Para la detección de saltos de ciclos se emplearon las triples diferencias (sub-rutina mauprp).
- Los pesos a priori de las coordenadas se ubicaron en ± 0.005 m en sus tres componentes para la estación base y ± 0.050 m para las estaciones remotas.
- El modelo troposférico de Saastamoinen fue el empleado para todas las campañas, estimando para ello un parámetro troposférico por cada 3 horas de medición, para cada estación.
- Las ambigüedades de las doble diferencias son resueltas para las combinaciones L_1 & L_2 fijando la estación base y usando la estrategia de resolución de ambigüedades QIF (Cuasi Ionosfera Libre).
- Para la eliminación de las ambigüedades resueltas y salvadas se empleó la estrategia ELIMIN.

Después de ejecutada la corrida para cada línea base se genera al final un archivo de salida (*.out) y otro de ecuaciones normales (*.neq) para cada línea.

Se genera una solución diaria para cada uno de los días de cada campaña, donde de igual manera se obtiene un archivo con coordenadas incluyendo su matriz de ecuaciones normales (NEQ). Las ecuaciones normales de las salidas individuales se combinan para obtener los resultados y la matriz de ecuaciones normales del día respectivo. Estas últimas se combinaron junto con los otros días de la campaña para obtener el resultado final del procesamiento en forma ajustada, esta etapa se llama combinación.

Las consideraciones hechas para tal fin fueron las siguientes:

- Para la combinación final se les concede un peso a la(s) estación(es) base(s) de ± 0.005 m, y a las estaciones remotas de ± 0.050 m.
- Se realizó una combinación inicial incluyendo todas las ecuaciones normales para determinar el comportamiento del valor de las coordenadas y su respectiva calidad.
- Posteriormente se fueron depurando las ecuaciones normales que desmejoraban la calidad de la solución final, para finalmente obtener la solución definitiva.

- En el caso de campañas que presentan más de 1 base se realizan dobles procesamientos a las estaciones nuevas para obtener coordenadas desde las dos bases, esto con el fin de obtener más redundancia e introducir ecuaciones normales que provienen del enlace entre las dos bases, para garantizar un ajuste completo de la campaña.

El RMS de cinco (05) combinaciones finales de campañas que presentaron una y dos bases estuvieron en el orden de ± 0.006 m. en la posición, y ± 0.008 m. en la coordenada altura.

Las otras tres (03) combinaciones finales las cuales presentaron más de dos bases en su campaña presentan sus estaciones con RMS de ± 0.005 m. hasta ± 0.010 m. en posición y ± 0.005 hasta ± 0.025 m. en altura. Cubriendo de esta manera las expectativas planteadas para el procesamiento.

Análisis de resultados.

La tabla 2 muestra el número de estaciones que de acuerdo a cada campaña se procesa. Adicionalmente se incluye el número de líneas procesadas para la vinculación de las bases, entre otras características.

CAMPAÑA	ESTAC. NUEVAS	ESTAC. REDUNDANTES	BASES	TOTAL CAMP.	VINC.	TOTAL CAMP + VINC
ABRIL	111	24	2	135	25	160
MAYO	112	25	1	137	19	156
JUNIO	81	20	4	101	24	125
JULIO	55	18	1	73	17	90
AGOSTO	54	28	2	82	24	106
SEPTIEMBRE	40	18	2	58	20	78
OCTUBRE	63	31	5	94	19	113
NOVIEMBRE	21	13	4	34	16	50
TOTAL	537	177	21	714	164	878

ESTACIONES NUEVAS	ESTACIONES GPS PRINCIPALES Ó DE REFERENCIA MEDIDAS CON EQUIPOS GPS DE DOBLE FRECUENCIA.
ESTAC. REDUNDANTES	ESTACIONES MEDIDAS EN SESIONES DIFERENTES (MAÑANA Y TARDE), Ó EN DÍAS DIFERENTES.
BASES	ESTACIONES GPS PRINCIPALES UTILIZADAS POR CAMPAÑA
TOTAL (CAMP.)	TOTAL DE LÍNEAS GPS GENERADAS POR CAMPAÑA.
VINCULACIÓN (VINC.)	LÍNEAS GPS DE VINCULACIÓN CON ESTACIONES IGS
TOTAL CAMP. + VINC.	TOTAL LÍNEAS GPS CAMPAÑA + LÍNEAS GPS DE VINCULACIÓN

Tabla 2, Estaciones procesadas.

PROCESAMIENTO DENSIFICACIÓN PDVSA - REGVEN

Para efectuar el análisis de los resultados obtenidos se trató, además de analizar los RMS (de líneas, estaciones y combinaciones finales) de realizar la mayor cantidad posible de comparaciones.

Con el objetivo de comparar y comprobar los resultados obtenidos utilizando diferentes receptores y operadores, es decir mediciones totalmente independientes, el LGFS efectuó observaciones sobre cuatro (04) estaciones correspondientes a la campaña del mes de Octubre.

ESTACIÓN	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)
G501	0.0542	0.0524	0.016
ZUL8	0.0140	0.0202	0.002
GPAZ	0.0052	0.0362	0.003
ZUL7	0.0584	0.0256	0.007
$\Sigma\Delta$	0.0329	0.0336	0.007

Tabla 3. Diferencias de coordenadas entre estaciones medidas en forma independientes por PDVSA y el LGFS.

El resultado de la comparación se presenta en la tabla 3, donde puede observarse que el valor máximo de las diferencias es de 5.8 cm, siendo ± 3 cm el promedio de las mismas. Estos resultados avalan la exactitud del trabajo ya que están por debajo de las tolerancias establecidas.

La tabla 4 presenta el promedio por campaña de las diferencias de coordenadas que existen en las estaciones redundantes las cuales son las que garantizaran la calidad final del procesamiento, como puede observarse los valores máximos alcanzan solo 3 cm y el promedio esta entre 1 y 2 cm.

CAMPAÑA	REDUNDANCIAS		
	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)
ABRIL	0.0204	0.0292	0.0104
MAYO	0.0251	0.0279	0.0206
JUNIO	0.0319	0.0296	0.0098
JULIO	0.0093	0.0145	0.0074
AGOSTO	0.0203	0.0221	0.0091
SEPTIEMBRE	0.0189	0.0263	0.0115
OCTUBRE	0.0216	0.0266	0.0140
NOVIEMBRE	0.0206	0.0326	0.0099
TOTAL	0.0210	0.0261	0.0116

Tabla 4. Promedio en diferencias de coordenadas por campaña entre estaciones medidas más de 1 vez.

La tabla 5 contiene el resumen de los cálculos y ajustes finales combinados. Aquí se indica el número total de archivos empleados, el RMS en conjunto por campaña e información sobre el número total de estaciones ajustadas.

CAMPAÑA	ECUACIONES NORMALES UTILIZADAS	RMS			TOTAL EST. AJUSTADAS
		N (mm)	E (mm)	U (mm)	
ABRIL	15	3.4	4.6	7.0	109
MAYO	19	4.6	5.0	7.1	113
JUNIO	22	19.0	18.9	14.8	85
JULIO	17	7.8	9.4	5.2	57
AGTO.	22	7.7	8.7	13.9	55
SEPT.	17	4.0	10.0	11.3	42
OCTB.	20	9.5	12.6	21.4	69
NOV.	18	2.3	6.4	7.1	25
TOTAL	150	7.28	9.45	10.97	555

Tabla 5. Información sobre el ajuste final para cada mes.

Se puede apreciar que los RMS de las coordenadas para 5 campañas están entre los valores ± 2.3 hasta ± 9.4 mm en sus tres componentes, las otras 3 campañas restantes poseen RMS de ± 4 mm hasta los ± 19 mm, siendo particularmente débil en calidad las campañas de los meses de Junio y Octubre lo cual se justifica por el número de estaciones bases (4 y 6 respectivamente) utilizadas en esos meses.

Los valores en conjunto se consideran aceptables bajo los criterios establecidos para el trabajo realizado y las expectativas planteadas para el procesamiento.

Conclusiones

Se efectuó el procesamiento de las mediciones GPS satelitarias pertenecientes al proyecto densificación REGVEN, obteniéndose unos estándares de calidad mejores a los acordados con las especificaciones que rigen este tipo de proyecto ya que el RMS de las coordenadas definitivas está en el orden de ± 5 mm para la posición y de ± 7 mm para la altura elipsoidal en el 85 % de las estaciones medidas.

El resultado definitivo incluyó solo data de doble frecuencia, efemérides precisas y procesamiento en la frecuencia L3, obteniéndose una calidad promedio de ± 8 mm en posición y ± 11 mm en altura, en los ajustes de las campañas.

Las diferencias de coordenadas para las estaciones redundantes, arroja un promedio no mayor a los 3.5 cm, este resultado en conjunto con la comparación de mediciones independientes (el cual está en el mismo orden) puede considerarse como el de mayor peso al garantizar la exactitud alcanzada de la red.

Se demuestra que el empleo del software científico es necesario para efectuar el cálculo de mediciones GPS en proyectos que requieran alta exactitud.

Referencias

Drewes H., Tremel H., Hernandez J. N.: "Adjustment of the new Venezuelan national GPS network within the SIRGAS

PROCESAMIENTO DENSIFICACIÓN PDVSA - REGVEN

reference frame” en Advances in Positioning and Reference Frames, Volume 118 of International Association of Geodesy Symposia, Springer Verlag, 1998.

Fuenmayor F., Gil C., Vargas C.: “Densificación de vértices SIRGAS-REGVEN tipo “C” en áreas operacionales de PDVSA”. Congreso Internacional de Geodesia y Cartografía, Caracas, 2002.

G. Beutler, E. Brockmann, R. Dach, P. Fridez, W. Gurtner, U. Hugentobler, J. Johnson, L. Mervart, M. Rothacher, S. Schaer, T. Springer, R. Weber, August 2000 “Documentation of the Bernese GPS software Versión 4.2 DRAFT”. Astronomical Institute University of Berne.