Procesamiento y análisis de la Campaña Sirgas

Danilo Blanco ***Jorge Faure***

Docente: **Ing. Agrim. Roberto Pérez Rodino**

Instituto de Agrimensura

Facultad de Ingeniería

Universidad de la República

2000

Indice

	Página
1 Introducción	3
2 Descripción de las campañas	4
3 Procesamiento con Ski	6
3.1 Metodología de trabajo	6
3.1.1 Primer paso: creación del proyecto	6
3.1.2 Segundo paso: importación de datos	6
3.1.3 Tercer paso: procesamiento	6
3.1.4 Cuarto paso: ajuste	7
3.2 Consideraciones del procesamiento de la campaña de 1995	7
3.3 Consideraciones del procesamiento de la campaña de 1997	7
4 Procesamiento con Bernese 4.0	8
4.1 Metodología de trabajo	8
4.1.1 Primera etapa	8
4.1.2 Segunda etapa	9
4.1.3 Tercera etapa	10
4.1.4 Cuarta etapa	11
4.1.5 Quinta etapa	14
4.2 Esquema gráfico del procesamiento con Bernese	24
4.3 Procedimiento seguido para el procesamiento	25
4.4 Comentarios sobre los inconvenientes surgidos durante el procesamiento	25
5. Procesamiento del punto FI	26
5.1 Procesamiento con Bernese 4.0	26
5.2 Procesamiento con Ski	27
6. Resumen de los resultados	27
6.1 Coordenadas obtenidas procesando con el Software Ski	28
6.2 Coordenadas obtenidas procesando con el Software Bernese 4.0	28
6.3 Diferencias entre las coordenadas calculadas por ambos programas	28
6.4 Coordenadas Sirgas publicadas por el IBGE	30
6.5 Diferencias entre las coordenadas Sirgas publicadas por el IBGE y las calculadas con el Bernese	30
6.6 Diferencias entre las coordenadas Sirgas publicadas por el IBGE y las calculadas con el Ski	31
7. Discusión de las diferencias entre los softwares	32
8. Cálculo de líneas geodésicas	35
8.1 Descripción del procedimiento de cálculo	35
8.2 Ejecutable de Matlab diseñado para la aplicación	38
8.3 Resultados del cálculo	39
9. Cálculo de la altura elipsoidal (h) en el sistema ROU-USAMS	40
9.1 Primer método	40
9.1.1 Procedimiento	40
9.1.2 Ejecutable de Matlab diseñado para la aplicación	41
9.1.3 Resultados	42
9.2 Cálculo de distancias	42
9.2.1 Transformación de coordenadas geodésicas a coordenadas cartesianas	42
9.2.2 Cálculo de distancias	42
9.2.3 Ejecutable de Matlab diseñado para la aplicación	43
9.2.4 Resultados	43

9.3 Otro método para determinar la altura h 43
9.3.1 Ejecutable de Matlab diseñado para la aplicación 44
9.3.2 Datos para el cálculo 44
9.3.3 Resultados 44
10. Conclusiones 46
11. Bibliografía 47

1. Introducción

En el presente trabajo se utilizarán dos software de procesamiento de datos GPS: el Bernese Version 4.0 del Instituto Astronómico de la Universidad de Berna (Suiza) y el Ski 2.30 de Leica.

Se pretenderá exponer la forma de trabajo con el Bernese, aplicándolo al caso concreto del Proyecto Sirgas. De igual manera se trabajará con el software Ski.

No es nuestra intención que este informe sea un exhaustivo manual del funcionamiento de los softwares, sino que se busca describir los aspectos más relevantes del procesamiento con ambos aplicado al caso concreto.

Se discutirán los resultados obtenidos y las diferencias más importantes de funcionamiento de los mismos.

Se llevará a cabo una aplicación geodésica a través del cómputo de líneas geodésicas.

Por último se intentará comparar las coordenadas calculadas con las existentes en el sistema ROU-USAMS. Para esto se calcularán las distancias en uno y otro sistema.

2. Descripción de las campañas

En el año 1995 se llevó a cabo una campaña a escala sudamericana denominada SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para América del Sur). Los objetivos de la misma fueron:

- Definir un sistema de referencia para América del Sur.
- Establecer y mantener un marco de referencia.
- Establecer y definir un datum geocéntrico.

Como parte de esta campaña se tomaron en nuestro país 4 puntos, a saber: Montevideo, Fortaleza, Cerro Vigía y Yacaré. En forma simultánea se tomaron 6 estaciones más: Agraciada, Bella Vista, Cádiz, Etchegaray, FI y Taroco; con lo cual se completaron las 10 estaciones mencionadas.

En el año 1997 se efectuó una densificación de esta red, motivo por el cual se efectuaron observaciones en 5 puntos: Montevideo, Bella Vista, Puntas del Yí, Cerro Caracoles y Serra.

De esta forma se completaron 13 puntos observados entre ambas campañas.

A continuación se presenta la distribución de las observaciones efectuadas en cada punto día por día.

Año 1995

Punto	***146***	***147***	***148***	***149***	***150***	***151***	***152***	***153***	***154***	***155***
Agraciada		*	*	*						
Bella Vista		*								
Cádiz		*	*	*						
Etchegaray		*	*	*						
F I									*	
Fortaleza						*	*	*	*	*
Montevideo	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Taroco		*	*	*						
Cerro Vigía	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Yacaré		*	*	*	*	*	*	*	*	*

Año 1997

Punto	***116***	***117***
Bella Vista	*	*
Cerro Caracoles	*	*
Montevideo	*	*
Puntas del Yí	*	*
Serra	*	*

Exceptuando el punto FI, el resto son puntos de primer orden de la Red Geodésica Nacional, motivo por el cual se conocen sus coordenadas en el sistema ROU-USAMS.

Coordenadas en Sistema ROU (USAMS) 1965

Punto	***Latitud***	***Longitud***	***X***	***Y***	***Altitud (NMM)***
Agraciada	-37g55843584	-64g72477318			
Bella Vista	-36g28910288	-62g52760342			
Cádiz	-35g45737213	-64g08899654	322.151,678	6:468.638,527	119,30
C. Caracoles	-38g46660320	-61g05967670	577.616,282	6:169.472,061	303,00
C. Vigía	-37g45621940	-59g53388010	705.770,430	6:268.457,040	152,10
Etchegaray	-34g44537710	-61g94684880	504.568,710	6:571.169,210	381,14
Fortaleza	-38g76472400	-62g51039100	458.007,670	6:139.935,580	134,82
Puntas del Yí	-36g81967330	-61g34126920	555.321,050	6:334.055,280	251,09
Serra	-36g86964090	-63g61803680	364.179,640	6:328.279,240	97,47
Taroco	-35g75994373	-60g24573429	648.905,521	6:438.891,389	189,08
Yacaré	-33g99804938	-63g79669753	344.906,640	6:614.691,080	129,30

3. Procesamiento con Ski

Datos: Rinex de observación
Rinex de navegación
Efemérides precisas

3.1 Metodología de trabajo

3.1.1 Primer paso: creación del proyecto

Debemos indicar el nombre del proyecto así como la ubicación en el disco de sus archivos. Se creará un proyecto por día de observación.

3.1.2 Segundo paso: importación de datos

En la opción I*mport* especificamos la opción Rinex y durante la importación debemos optar por el tipo de observación de preferencia, código C/A en L1 o código P en L1, en donde elegimos la primer opción.

En la opción *Satellite data* importamos las efemérides precisas correspondientes a los días de observación.

3.1.3 Tercer paso: procesamiento

Como paso previo al procesamiento debemos indicar la estación que dejaremos como referencia, para lo cual a través de la opción *View/Edit* editamos las coordenadas del punto elegido, en nuestro caso Montevideo. Debemos ingresar las coordenadas del punto e indicar que pertenecen a la clase *User entered*

En la opción *Data Processing* seleccionamos la sesión a procesar y especificamos que el modo de procesamiento será el de línea base (*baseline*). También configuramos los parámetros que se usarán en las etapas subsiguientes, lo hacemos a través de la opción *Parameters* del menú *Configuration.* Los mismos son:

- *Cut-off angle: 15°.* Es la altura angular por debajo de la cual no tendrá en cuenta los datos de los satélites allí ubicados.
- *Tropospheric model: Hopfield.* Es el modelo troposférico que servirá para corregir el efecto de la tropósfera sobre la señal.
- *Ionospheric model: Standard.* Es el modelo ionosférico que servirá para atenuar el efecto de la ionósfera sobre la señal.
- *Solution type: Standard.* Para lados menores a 20 km se puede utilizar la opción *Iono Free Fixed*, en la cual usando la frecuencia L3 se fijan las ambigüedades previamente al procesamiento.
- *Ephemeris: Precise.* Se especifica el tipo de efemérides a procesar.
- *Data used: Use code and phase.* Se ingresa del tipo de datos con el cual se trabajará.
- *Phase Frecuency: Automatic.* Esto permite que el software opte por la frecuencia que brinda mejor solución.
- *Code Frecuency: Automatic.* Idem item anterior.
- *Limitation: 20 km.* Esta es la distancia máxima de las líneas base para la cual tratará de resolver las ambigüedades en forma entera.
- *A priori rms: 10 mm*. Es el valor límite tolerable del ruido de la fase.

Una vez hecho esto especificamos el modo manual de procesamiento, con lo cual nos conduce a poder seleccionar la estación que actuará como base o referencia y aquellas que serán móviles para el cálculo de los vectores según el modo de procesamiento diferencial.

En la primer corrida elegimos una estación de referencia (de la cual se conocen sus coordenadas) y el resto como móviles, con lo que se calculan coordenadas para todos los móviles.

Luego variamos la estación de referencia y calculamos aquellas líneas bases nuevas, con lo que obtenemos todos los vectores posibles.

3.1.4 Cuarto paso: ajuste

Este se efectúa mediante la opción *Adjustment*

En primer término creamos un nuevo ajuste a través de la opción *Networks, New*. A continuación importamos los proyectos correspondientes a cada sesión de trabajo, esto lo hacemos mediante la opción *SKI-Proyect* del menú *Import*.

Previo al ajuste se indica la estación que queremos permanezca fija durante el mismo. Esto se hace a través del menú *Edit*, opción *Coordinates and Class*, se editan las coordenadas del punto y se especifica la clase de las mismas: Fixed Point – Position & Heigth.

El último paso es efectuar el ajuste, el cual se calcula a través del menú *Compute*. A través de la opción *Logfile* del menú *Result* se podrán ver los resultados.

3.2 Consideraciones del procesamiento de la campaña de 1995

Se tomó como estación de referencia Montevideo, ya que es la estación más próxima a la de La Plata, la cual pertenece a la red internacional de estaciones permanentes del IGS y se conocen con gran precisión sus coordenadas. En vista de los resultados Sirgas publicados por el IBGE de la presente campaña, se conocen las coordenadas de las siguientes estaciones: Montevideo, Fortaleza, Yacaré y Cerro Vigía. Las coordenadas de Montevideo están fuertemente influenciadas por las de La Plata, motivo por el cual se las considera fijas.

Se creó un proyecto por cada día de observaciones y luego un ajuste en el cual se fueron insertando todos los proyectos procesados.

3.3 Consideraciones del procesamiento de la campaña de 1997

En esta campaña se efectuaron observaciones en 5 puntos, de los cuales 2 se repitieron con la campaña anterior: Montevideo y Bella Vista. De acuerdo a las consideraciones hechas para elegir la estación de referencia de 1995, Montevideo, y dado que la misma se repite en la presente, sería lógico que se la considerara nuevamente como estación de referencia. Lamentablemente los datos correspondientes a la misma no se encuentran en condiciones de ser utilizados. Al no poder seleccionarla como estación de referencia se procedió a elegir Bella Vista, ya que era la otra estación de la cual se conocen sus coordenadas.

4. Procesamiento con Bernese 4.0

Datos: Rinex de observación
Rinex de navegación
Efemérides precisas

4.1 Metodología de trabajo

4.1.1 Primera etapa

En esta etapa se especifican datos que serán utilizados a lo largo del procesamiento.

Menú 0 (Defaults)

- ***Opción 0.3.1 (Dataset names, General).*** En este ítem se debe indicar diversa información correspondiente al año de las observaciones.

```
É͸͸͸͸͸͸͸͸͸Ñ͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸»
°  0.3-1  ³                DEFAULTS: GENERAL DATASET NAMES                        °
ÇÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÁÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄ
```

- ***Opción 0.3.3 (Orbit Dataset extensions).*** Se debe especificar la extensión de las órbitas precisas (sp3).

```
É͸͸͸͸͸͸͸͸͸Ñ͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸»
º  0.3-3  ³                  DEFAULTS: ORBIT DATASET EXTENSIONS                  º
ÇÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÁÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄ¶
º                                                                               º
º    Orbits:                                                                    º
º      BROADCAST EPHEMERIS    > BRD <       TABULAR   ORBITS       > TAB <     º
º      STANDARD  ORBITS       > STD <       RAD.PRESSURE COEFF.    > RPR <     º
º      ORBITAL   ELEMENTS     > ELE <       PRECISE   EPHEMERIS    > SP3 <     º
º                                                                               º
º    Orbit files in ASCII:                                                      º
º      STANDARD  ORBITS       > FSO <       RAD.PRESSURE COEFF.    > FRP <     º
º                                                                               º
º    Path from Campaign Subdirectory to Files                                   º
º      ALL ORBIT FILES        > ORB\                                  <     º
º                                                                               º
È͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸¼
```

4.1.2 Segunda etapa

En esta etapa se define todo lo relativo a la campaña específica a procesar.

Menú 1 (Campaigns).

- ***Opción 1.1 (Definition of names).*** En esta opción definimos la campaña, indicando el nombre, fecha de inicio y fin.

```
É͸͸͸͸͸͸͸͸͸Ñ͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸»
º   1-1   ³                CAMPAIGNS: DEFINITION OF NAMES                      º
ÇÄÄÄÄÄÄÄÄÄÁÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄ¶
º                                                                               º
º    Campaign       Start Date     End Date     Path          Comments          º
º                                                                               º
º  > EUROCLUS <   > 13-JUN-96 < > 14-JUN-96 < > X:\  < > BPE DEMO CAMPAIGN   < º
º                                                                               º
È͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸¼
```

- ***Opción 1.2 (Create subdir).*** En esta opción creamos la estructura de directorios y subdirectorios en la cual vamos a trabajar.

- ***Opción 1.3 (Define sessions).*** En esta opción definimos las sesiones , cada una de las cuales se corresponderán con un día de observaciones. Se debe especificar un número con el cual se identificará la sesión, fecha y hora de inicio, y fecha y hora de finalización.

```
É͸͸͸͸͸͸͸͸͸Ñ͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸»
º  1.3-2  ³                CAMPAIGNS: SESSION DEFINITION                       º
ÇÄÄÄÄÄÄÄÄÄÁÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄ¶
º                                                                               º
º  SESSION NUMBER          START DATE                    END DATE               º
º                                                                               º
º      nnnn            yy mm dd     hh mm ss       yy mm dd     hh mm ss       º
º                                                                               º
º    > ???0 <       >          < > 00 00 00 <   >          < > 23 59 59 <     º
º                                                                               º
È͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸¼
```

- ***Opción 1.4.1 (Station files, Coordinates).*** Con esta opción podemos crear o actualizar un archivo de coordenadas aproximadas, las cuales necesitaremos para el procesamiento.

4.1.3 Tercera etapa

En esta etapa se transformaran los datos de las observaciones los cuales se encuentran en el formato de intercambio Rinex al formato interno de Bernese.

Para ello previamente se debe verificar en los encabezados de los mismos:

1. *El nombre de la estación.* Todos los archivos correspondientes a un mismo punto deberán tener en el encabezado el mismo nombre de estación.
2. *Las antenas y los receptores.* La identificación de ambos debe coincidir con la establecida por el IGS.

Se deben renombrar los archivos cuyo último dígito del nombre sea un cero, por uno y así sucesivamente para los siguientes.

Menú 2 (Transfer)

- ***Opción 2.5.6 (Rawdata→Rinex,Concatenate).*** En esta opción juntamos los distintos archivos Rinex de una misma sesión en uno solo, el cual se lo identificará por tener el último digito del nombre con un cero. Se deberá concatenar los Rinex de forma de obtener un único Rinex por sesión y por estación.

- ***Opción 2.7.1 (Rinex→Berne, Observations).*** Esta opción nos permite transformar al formato interno de Bernese los archivos Rinex concatenados en el paso anterior.

```
ÉÍÍÍÍÍÍÍÍÍÑÍÍÍÍÍÍÍÍÍ
```

```
É͸͸͸͸͸͸͸͸͸ÑÍÍÍ
```

```
É͸͸͸͸͸͸͸͸͸Ñ͸͸͸͸͸͸͸͸͸
```

```
É͸͸͸͸͸͸͸͸ÑͶͶͶ
```

4.1.5 Quinta etapa

En esta etapa se efectuará el procesamiento de los datos obteniendo las coordenadas finales.

Menú 4 (Processing)

- ***Opción 4.1 (Code Check).*** En esta opción se procede a chequear las observaciones de código.

- ***Opción 4.2 (Code Processing).*** En esta opción se efectúa un posicionamiento puntual utilizando la observable código, en nuestro caso L3. También calcula las correcciones de los relojes de los receptores.

```
ÉÍÍÍÍÍÍÍÍÍÑÍÍÍÍÍÍÍÍÍ
```

- ***Opción 4.3 (Single Diference).*** En esta opción se procede a la creación de las simples diferencias (líneas bases entre receptores). Se las calcula con la observable fase. Luego se utiliza un criterio de optimización de las simples diferencias independientes entre sí, las seleccionadas serán utilizadas en el procesamiento posterior.

```
É͸͸͸͸͸͸͸͸͸Ñ͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸»
º   4.3   ³                  PROCESSING: FORM SINGLE DIFF.                          º
ÇÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÁÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄ
```

```
ÉÍÍÍÍÍÍÍÍÍÑÍÍÍÍÍÍÍÍÍ
```

```
ÉÍÍÍÍÍÍÍÍÍÑÍÍÍÍÍÍÍÍÍ
```

- ***Opción 4.5 (Par. Estimation).*** Esta opción se compone en tres procesos:

  1. El primero de ellos consiste en producir una solución libre de ambigüedades, para ello se utiliza la frecuencia L3, la cual es una combinación de las frecuencias L1 y L2 que elimina el efecto ionosférico. Tiene como fin chequear la calidad de los datos y crear un archivo con los residuales.

```
É͸͸͸͸͸͸͸͸͸Ñ͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸»
º   4.5   ³                  PROCESSING: PARAMETER ESTIMATION                                                  º
ÇÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÁÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄ
```

```
É͸͸͸͸͸͸͸͸ÑͶͶͶ
```

```
ÉÍÍÍÍÍÍÍÍÍÑÍÍÍÍÍÍÍÍÍ
```

```
É͸͸͸͸͸͸͸͸͸ÑÍ͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸»
º  4.5-1  ³                  PARAMETER ESTIMATION: INPUT 1                                  º
ÇÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÁÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄ¶
º    TITLE    > RESOLUCION DE AMBIGUEDADES                                 <          º
º                                                                                      º
º    Frequency:                                                                        º
º      FREQUENCY           > L1&L2 <    (L1,L2,L3,L4,L5,L1&L2,L3&L4,MIXED,           º
º                                        or WUEBBena/Melbourne)                        º
º    Fixed Station(s):                                                                 º
º      STATION      > NONE             <    (blank for sel.list, ALL or NONE,        º
º    Kin.  Station(s):                         SPECIAL_FILE.. $FIRST, $LAST)          º
º      STATION      > NONE             <    (blank for sel.list, ALL or NONE,        º
º                                             SPECIAL_FILE.. $FIRST, $LAST)          º
º    Ambiguities:                                                                      º
º      RESOL. STRATEGY     > QIF    <   (ROUND,SIGMA..SEARCH..ELIMIN,QIF..NO)        º
º      INTRODUCE WIDELANE  > NO  <      (YES or NO)                                   º
º      INTRODUCE L1 AND L2 > NO  <      (YES or NO)                                   º
º      SAVE AMBIGUITIES    > YES <      (YES or NO)                                   º
º    Observation selection:                                                            º
º      MIN. ELEVATION      > 15    <    degrees                                       º
º      SAMPLING RATE       > 60    <    sec (0: all observations)                     º
º      OBSERV. WINDOW      > NO    <    (YES.. NO or ASIS)                            º
È͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸¼


É͸͸͸͸͸͸͸͸͸ÑÍ͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸»
º 4.5-2.4 ³              PARAMETER ESTIMATION: SPECIAL REQUESTS                        º
ÇÄÄÄÄÄÄÄÄÄÁÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄ¶
                                        º
º   Special Requests:                                                                 º
º                                                                                      º
º     A PRIORI SIGMAS FOR SITE COORDINATES        > YES  <   (YES.. NO)              º
º                                                                                      º
º     SITE-SPECIFIC TROPOSPHERE PARAMETERS        > YES  <   (YES.. NO)              º
º     STOCHASTIC IONOSPHERE PARAMETERS            > YES  <   (YES.. NO)              º
º     GLOBAL IONOSPHERE MODEL PARAMETERS          > NO   <   (COE.. HGT.. NO)        º
º     EARTH ROTATION PARAMETERS                   > NO   <   (YES.. NO)              º
º     COORDINATES OF CENTER OF MASS               > NO   <   (YES.. NO, ASIS)        º
º     SATELLITE ANTENNA OFFSETS                   > NO   <   (YES.. NO)              º
º     RECEIVER CLOCK ERRORS                       > NO   <   (YES.. NO)              º
º                                                                                      º
º     PARAMETER PRE-ELIMINATION                   > YES  <   (YES.. NO, ASIS)        º
º                                                                                      º
º     SATELLITE-SPECIFIC A PRIORI SIGMAS          > NO   <   (YES.. NO)              º
º                                                                                      º
È͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸¼
```

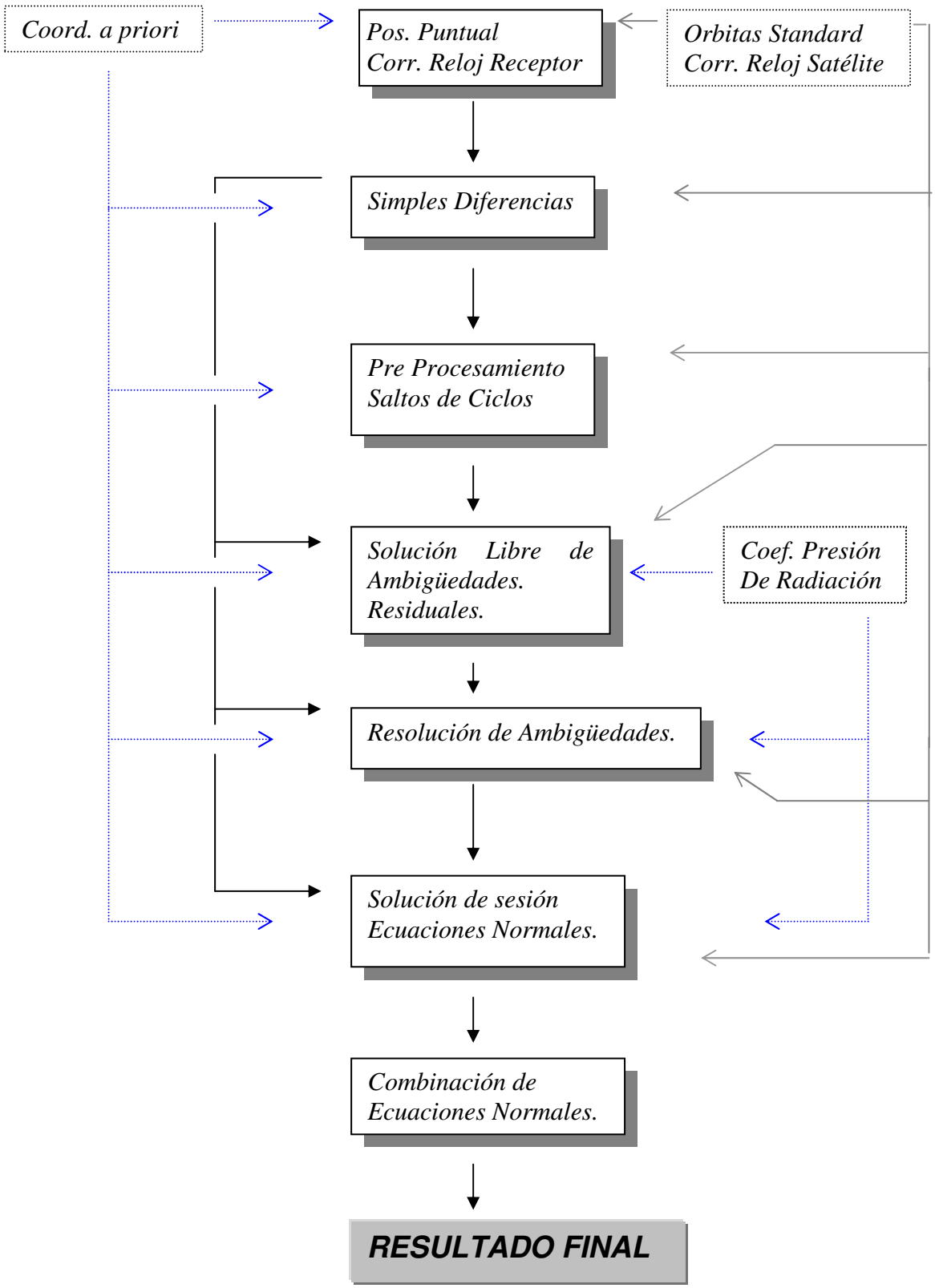
3. El último proceso tiene como fin el cálculo de las coordenadas de la sesión y de las ecuaciones normales a partir de las ambigüedades resueltas en la etapa anterior, y las que no lo han sido se eliminaran.

```
É͸͸͸͸͸͸͸͸͸Ñ͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸»
º  4.5-0  ³                  PAR. ESTIMATION: OUTPUT FILES                                 º
ÇÄÄÄÄÄÄÄÄÄÁÄÄÄÄÄÄÄÄÄ
```

- ***Opción 4.8.1 (Combination, Normal Equations).*** Esta opción nos permite combinar las ecuaciones normales, producidas en el paso anterior, para obtener coordenadas finales de las estaciones.
  Dado que tenemos varias sesiones de observaciones, debemos primero combinar las ecuaciones normales de cada día, obteniendo un archivo de ecuaciones por día. Luego combinamos las ecuaciones diarias y obtenemos las coordenadas finales.

```
ÉÍÍÍÍÍÍÍÍÍÑÍÍÍÍÍÍÍÍÍ
```

4.2 Esquema gráfico del procesamiento con Bernese



4.3 Procedimiento seguido para el procesamiento

En primer término se creó una campaña para el año 1995. Luego se crearon las sesiones correspondientes a cada día de trabajo. Se procesaron cada sesión y luego se combinaron las soluciones a través de las ecuaciones normales, para llegar a las coordenadas finales de las estaciones.

Una vez calculadas estas coordenadas observamos que la solución de la estación FI, no era de la precisión esperada ni tampoco se correspondía con la de las restantes estaciones. Esto lo adjudicamos al hecho de que en dicha estación se realizaron observaciones en una sola sesión (3/6/1995) y por un período de poco más de una hora. A su vez al seleccionar el grupo de simples diferencias que optimizan el modelo, se seleccionan algunas que contienen al punto FI, lo cual también degrada la precisión del trabajo. Por lo tanto reprocesamos los datos de dicha sesión excluyendo el punto FI.

Para el procesamiento se consideró la estación Montevideo con mayor peso que el resto. Esto se debe a que tomamos como referencia los resultados del procesamiento de la campaña Sirgas publicados en 1997, en donde existían para el Uruguay 4 puntos. De estos 4 optamos por privilegiar Montevideo debido a su proximidad geográfica con la estación La Plata (Argentina), dicho punto es una estación permanente del IGS por lo cual se conocen sus coordenadas con gran exactitud A su vez en Montevideo se realizaron observaciones durante las 9 sesiones.

Para calcular las coordenadas de FI decidimos hacerlo considerando una polar del punto Montevideo. Para esto se debió crear una nueva campaña en la cual incluimos exclusivamente los datos de Montevideo y FI.

En segundo término se creó una campaña para el año 1997. Los datos correspondientes a la estación Montevideo se encuentran corruptos, por lo cual no se pudo disponer de ellos para el procesamiento. Al excluir este punto, el único punto que se repetía con respecto a la campaña de 1995 era Bella Vista, por lo tanto le dimos mayor peso. El resto del procesamiento es idéntico al del año 1995.

4.4 Comentarios sobre los inconvenientes surgidos durante el procesamiento

1. Durante el posicionamiento puntual (4.2) se debe ingresar el archivo que contiene los parámetros de corrección de los relojes de los satélites (*.clk), creados a partir de las efemérides precisas, en forma simultánea a las órbitas tabulares. En caso de no ingresar este archivo las coordenadas a obtener serán erróneas. Esto se debe a que el error de los relojes de los satélites influyen directamente en la distancia satélite – receptor.

2. Al realizar el posicionamiento puntual, se calcula los errores de los relojes de los receptores y se los guarda en los archivos de observaciones de fase. El no llevar a cabo este paso y seguir las etapas posteriores del procesamiento implica soluciones incorrectas. A esta conclusión se arriba tras analizar los resultados obtenidos y comprobar que los mismos no son de la precisión esperada.

5. Procesamiento del punto FI

5.1 Procesamiento con Bernese 4.0

Como se dijo anteriormente se debió crear una nueva campaña. En líneas generales el procedimiento no difiere sustancialmente del de las otras campañas. Esta campaña se procesará siguiendo las opciones del método estático rápido.

La primer diferencia se presenta al calcular las simples diferencias. Debido a que el intervalo de observación en el punto FI es de aproximadamente una hora, se debe disminuir el mínimo tiempo requerido de observación por el software. Para ello se debe modificar la siguiente pantalla.

```
É͸͸͸͸͸͸͸͸͸Ñ͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸͸»
º  4.3-1  ³                   FORM SINGLE DIFFERENCES: INPUT                          º
ÇÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄÁÄÄÄÄÄÄÄÄÄÄ
```

```
É͸͸͸͸͸͸͸͸͸ÑÍÍÍ
```

```
É͸͸͸͸͸͸͸͸͸ÑÍÍÍ
```

6. Resumen de los resultados

6.1 Coordenadas obtenidas procesando con el Software Ski

Punto	X(m)	σ_x (m)	Y(m)	σ_y (m)	Z(m)	σ_z (m)
Agraciada	2791629.874	0,006	-4511714.064	0.006	-3528316.236	0.003
Bella Vista	2984238.782	0.009	-4470492.726	0.008	-3422371.437	0.005
Cerro Caracoles	3017452.483	0.009	-4302024.482	0.008	-3603431.679	0.005
Cádiz	2897404.047	0.006	-4579798.755	0.006	-3352186.858	0.003
Etchegaray	3079627.310	0.006	-4523472.130	0.006	-3266172.045	0.003
Fortaleza	2909138.788	0.005	-4355442.075	0.005	-3627792.881	0.004
FI	2915116.310	0.001	-4349072.571	0.001	-3630480.024	0.001
Montevideo	2909132.981	0	-4355451.209	0	-3627801.306	0
Puntas del Yí	3050667.344	0.006	-4390563.505	0.006	-3466902.129	0.003
Serra	2890178.713	0.007	-4494438.042	0.006	-3470993.482	0.004
Taroco	3159112.990	0.009	-4383682.333	0.008	-3377817.368	0.005
Vigía	3153246.766	0.005	-4273958.031	0.005	-3519881.482	0.003
Yacaré	2959094.192	0.006	-4630116.935	0.006	-3227701.564	0.003

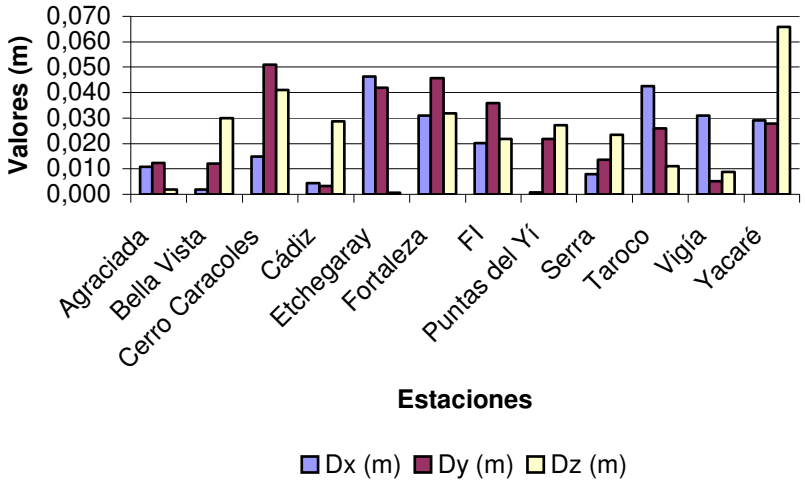
6.2 Coordenadas obtenidas procesando con el Software Bernese 4.0

Punto	X(m)	σ_x (m)	Y(m)	σ_y (m)	Z(m)	σ_z (m)
Agraciada	2791629.885	0,003	-4511714.051	0.005	-3528316.234	0.004
Bella Vista	2984238.783	0.003	-4470492.738	0.005	-3422371.467	0.004
Cerro Caracoles	3017452.498	0.003	-4302024.533	0.004	-3603431.720	0.003
Cádiz	2897404.051	0.003	-4579798.751	0.004	-3352186.886	0.003
Etchegaray	3079627.264	0.003	-4523472.088	0.004	-3266172.046	0.003
Fortaleza	2909138.757	0.002	-4355442.030	0.003	-3627792.849	0.002
FI	2915116.290	0.001	-4349072.535	0.001	-3630480.002	0.001
Montevideo	2909132.981	0.001	-4355451.209	0.001	-3627801.306	0.001
Puntas del Yí	3050667.345	0.003	-4390563.527	0.005	-3466902.156	0.004
Serra	2890178.722	0.003	-4494438.056	0.004	-3470993.506	0.003
Taroco	3159112.947	0.003	-4383682.307	0.003	-3377817.379	0.002
Vigía	3153246.735	0.002	-4273958.026	0.002	-3519881.473	0.002
Yacaré	2959094.221	0.001	-4630116.963	0.002	-3227701.630	0.002

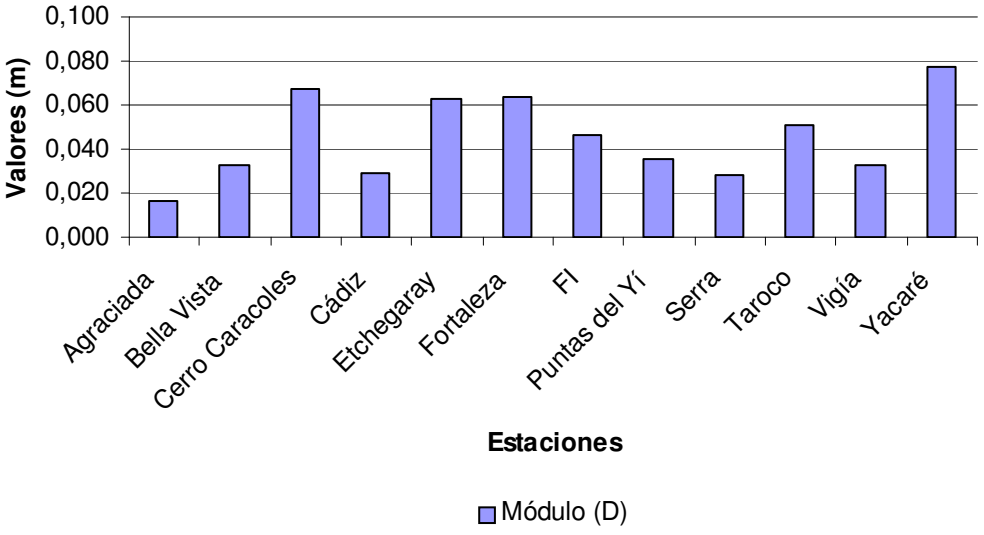
6.3 Diferencias entre las coordenadas calculadas por ambos programas

Punto	Dx (m)	Dy (m)	Dz (m)	Vector (m)
Agraciada	0,011	0,012	0,002	0,017
Bella Vista	0,002	0,012	0,030	0,032
Cerro Caracoles	0,015	0,051	0,041	0,067
Cádiz	0,004	0,003	0,029	0,029
Etchegaray	0,046	0,042	0,001	0,062
Fortaleza	0,031	0,046	0,032	0,064
FI	0,020	0,036	0,022	0,047
Puntas del Yí	0,001	0,022	0,027	0,035
Serra	0,008	0,014	0,023	0,028
Taroco	0,043	0,026	0,011	0,051
Vigía	0,031	0,005	0,009	0,033
Yacaré	0,029	0,028	0,066	0,077

Diferencias Bernese-Ski



Módulo de las diferencias



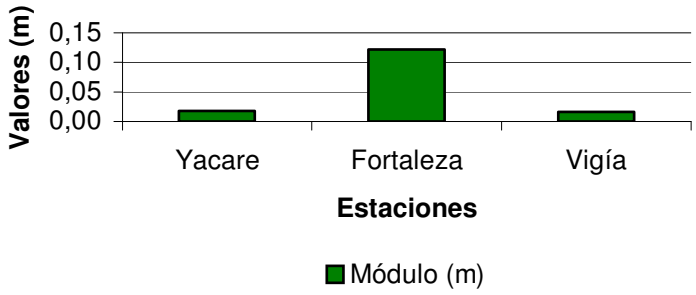
6.4 Coordenadas Sirgas publicadas por el IBGE

Punto	X (m)	σ_x (m)	Y (m)	σ_y (m)	Z (m)	σ_z (m)
Yacaré	2959094.220	0.003	-4630116.948	0.004	-3227701.620	0.003
Montevideo	2909132.981	0.004	-4355451.209	0.004	-3627801.306	0.004
Fortaleza	2909138.813	0.004	-4355442.113	0.004	-3627792.918	0.004
Vigía	3153246.746	0.004	-4273958.035	0.004	-3519881.481	0.004

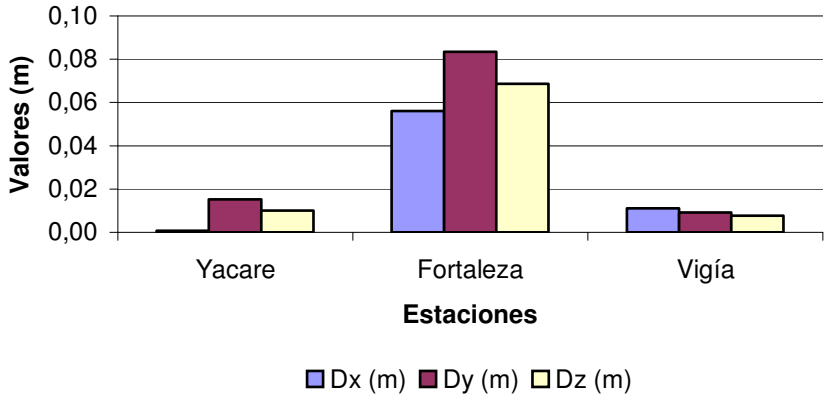
6.5 Diferencias entre las coordenadas Sirgas publicadas por el IBGE y las calculadas con el Bernese

Punto	Dx (m)	Dy (m)	Dz (m)	D (m)
Yacaré	0,001	0,015	0,010	0,018
Fortaleza	0,056	0,084	0,069	0,122
Vigía	0,011	0,009	0,008	0,016

Módulos de las diferencias

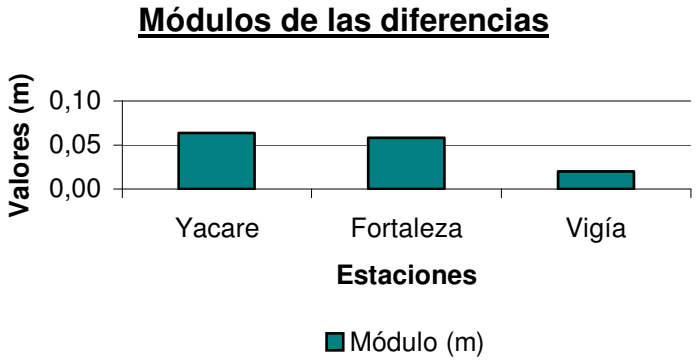


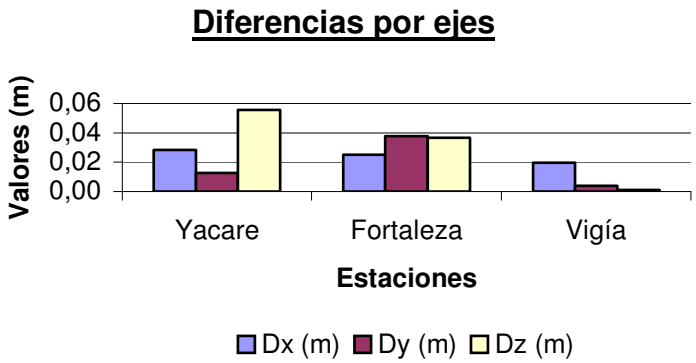
Diferencias por ejes



6.6 Diferencias entre las coordenadas Sirgas publicadas por el IBGE y las calculadas con el Ski

.Punto	Dx (m)	Dy (m)	Dz (m)	D (m)
Yacaré	0,029	0,013	0,056	0,064
Fortaleza	0,025	0,038	0,037	0,059
Vigía	0,020	0,004	0,001	0,020





7. Discusión de las diferencias entre los software

A continuación expondremos aquellas diferencias que encontramos y que a nuestro entender son más relevantes durante el trabajo con los software Ski y Bernese 4.0.

En primer término distinguiremos durante el procesamiento de los datos tres etapas básicas:

1. Cálculo de las órbitas de los satélites.
2. Procesamiento.
3. Ajuste y combinación de soluciones.

1. Esta etapa tiene como finalidad el lograr calcular las efemérides de los satélites con la mayor exactitud posible, es decir la posición de los mismos durante la transmisión de la señal. Para ello los dos software dan la opción de utilizar las *efemérides transmitidas* en el mensaje de navegación (broadcast) o las denominadas *precisas* (precise) obtenidas del IGS (en nuestro caso utilizamos las últimas).

En esta etapa encontramos diferencias importantes entre los software. Mientras el Ski no realiza cambios sobre las efemérides precisas que fueron ingresadas, el Bernese dedica una etapa importante en el procesamiento de las efemérides.

En primer lugar considera varios archivos que contienen una serie de parámetros que son utilizados para atenuar las perturbaciones que sufren los satélites durante su movimiento.

En segundo término crea las llamadas *órbitas tabulares,* es decir, transforma las órbitas precisas que se encuentran referidas a la tierra hacia un sistema de referencia celeste. Al mismo tiempo da la posibilidad de crear el archivo de corrección de los relojes de los satélites, el cual contiene los coeficientes de corrección de los relojes y la época de referencia (toc). Este archivo lo genera extrayendo de las efemérides precisas estos datos.

Por último a partir de las órbitas tabulares crea las llamadas *órbitas standard,* que están compuestas por los denominados arcos standard. Cada uno de estos arcos es la solución a la ecuación del movimiento entre dos tiempos determinados. Al mismo tiempo nos da la opción de generar un archivo que contiene un modelo de presión de radiación.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, pensamos que mediante el software Bernese se logran mayores precisiones en el cálculo de las órbitas de los satélites. Si consideramos nuestro trabajo en particular y debido a que se usaron efemérides precisas, pensamos que este aspecto no tuvo mayor influencia en los resultados. En el caso de haber trabajado con las efemérides transmitidas, el resultado hubiese diferido mas entre los dos software.

2. Esta etapa tiene como finalidad, partiendo de las efemérides standard (caso Bernese) o precisas (Ski) y de los datos de observación, llegar a calcular las coordenadas de los puntos, obteniendo una solución por cada sesión de trabajo.

En el caso del Bernese como ya vimos es necesario realizar como primer paso un simple posicionamiento de las estaciones a partir de las observaciones de código. En este paso resuelve las correcciones de los relojes de los receptores y los introduce en los archivos de observación de fase.

En el caso del Ski no se hace necesario un simple posicionamiento previo, aunque si se puede llevar a cabo, dejando que el usuario decida. Si se opta por realizar un posicionamiento puntual, esto dejará como único resultado el cálculo de las coordenadas aproximadas de las estaciones. Es decir que es un paso independiente del resto del procesamiento de los datos.

A continuación los dos software realizan un procesamiento de los datos muy diferente. El Ski realiza el procesamiento en una etapa, calculando las líneas bases (simples diferencias entre receptores) entre las estaciones. Mientras el Bernese divide el procesamiento en varias etapas,

donde cada una de ellas nos brinda opciones de forma que el usuario puede realizar un seguimiento cercano y controlar decidiendo la forma del procesamiento (diversas estrategias, opciones de combinación de observaciones, precisiones y tiempos mínimos, etc..).

Estas etapas básicamente son:

- Cálculo de simples diferencias.
- Pre procesamiento.
- Procesamiento

Como importantes diferencias en estas etapas de procesamiento entre el Ski y el Bernese, encontramos:

♦ Simples diferencias

En el Ski el cálculo de los vectores entre las estaciones se realiza a partir de una de estas tomada como referencia (de coordenadas conocidas). Luego vamos variando la estación de referencia hasta calcular todos los vectores entre los puntos.

En el Bernese la observable básica es la doble diferencia de observaciones. Para el cálculo de las simples diferencias es utilizada una determinada estrategia, la cual optimiza la formación de las simples diferencias. Si consideramos N receptores, solo N-1 simples diferencias independientes serán creadas.

♦ Cycle Slip (saltos de ciclo)

El Bernese realiza un pre procesamiento de la observable fase con el objetivo de detectar los saltos de ciclo que pudiesen haber ocurrido. Para ello haciendo uso de las simples diferencias antes obtenidas, calcula las dobles y triples diferencias. En el caso de poder ser reparados estos saltos de ciclos, el Bernese lo realiza y si no los puede corregir, los introduce como una nueva ambigüedad (*N*).

Mientras el Ski solamente detecta la ocurrencia de saltos de ciclos, informando al usuario de ello y aconsejando el no tener en cuenta el satélite o el período de tiempo de la observación en la cual ocurre.

♦ Ambigüedades

Con respecto al tratamiento de la resolución de las ambigüedades, el software Ski tiene en cuenta dos casos:

A) Líneas bases menores a 20 km.
B) Líneas bases mayores.

En el primer caso intentará resolver las ambigüedades, determinando sus valores enteros. En el segundo caso determinará las mismas en forma flotante, o sea como números reales.

En el caso del Bernese, utiliza una estrategia para resolver las ambigüedades “fijas” (o enteras) sin tener en cuenta la limitación de la longitud de la línea base. Utilizará como observable básica en la estrategia las dobles diferencias. Aquellas ambigüedades que no puedan ser fijadas serán pre-eliminadas en la etapa siguiente del procesamiento.

3. En esta etapa final es en la cual se combinan las soluciones obtenidas para cada sesión de trabajo realizando un ajuste con el fin de optimizar la solución final.

Tanto en el software Ski como en el Bernese la estrategia utilizada para realizar el ajuste es la de mínimos cuadrados. En el Ski podemos dejar fija una de las estaciones durante el ajuste. También en el Bernese podemos hacerlo y además nos brinda la opción de que aunque no la dejemos fija podamos darle mayor “peso” a esta.

8. Cálculo de líneas geodésicas

Entendemos por línea geodésica de una superficie, aquella curva comprendida totalmente en la superficie y que une dos puntos de la misma recorriendo la menor distancia.

A continuación se calcularán las geodésicas que unen los siguientes puntos: Yacaré, Taroco y Serra. Al disponer de coordenadas de dichos puntos en el elipsoide WGS-84 y en el sistema ROU-USAMS, se calcularán las geodésicas en ambos elipsoides.

Coordenadas en el elipsoide WGS-84.

Punto	φ	λ	h (m)
Yacaré	-30° 35’ 53”.4227	-57° 25’ 2”.9025	145.713
Taroco	-32° 11’ 2”.1171	-54° 13’ 17”.3541	201.991
Serra	-33° 10’ 57”.5655	-57° 15’ 24”.0558	114.877

Coordenadas en el sistema ROU-USAMS

Punto	φ	λ	H (m)
Yacaré	-30° 35’ 53”.6800	-57° 25’ 1”.3000	129.30
Taroco	-32° 11’ 2”.1769	-54° 13’ 16”.1791	189.08
Serra	-33° 10’ 57”.6365	-57° 15’ 22”.4392	97.47

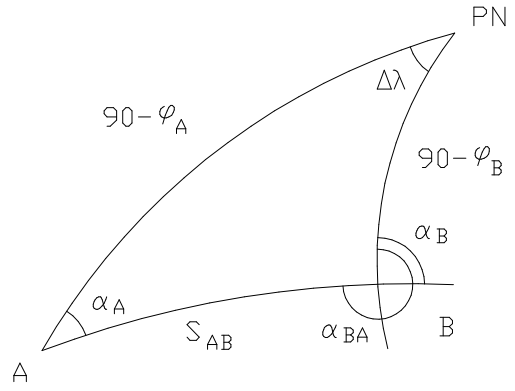
8.1 Descripción del procedimiento de cálculo

Datos: $\left.\begin{matrix} A(\varphi_A, \lambda_A) \\ B(\varphi_B, \lambda_B) \end{matrix}\right\} \Rightarrow S_{AB}$

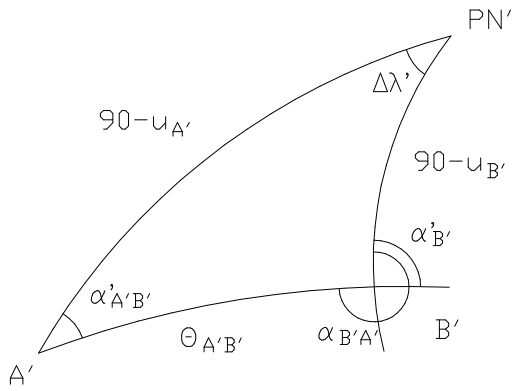
Elipsoide de Hayford: $\begin{cases} a = 6378388 \\ f = 1/297 \end{cases}$

Elipsoide WGS-84: $\begin{cases} a = 6378137 \\ f = 1/298.25722356 \end{cases}$

Elipsoide



Esfera homóloga



Procedimiento:

$\alpha_{AB} = \alpha'_{A'B'}$

$\alpha_B = \alpha'_{B'}$

Latitudes reducidas

$$u = a\,\mathrm{tg}\left(\sqrt{1-e^2}\,\mathrm{tg}(\varphi)\right) \quad \Rightarrow \quad \boxed{u_{A'}, u_{B'}}$$

Acimut de la geodésica en el Ecuador

$$\begin{aligned} &\Delta\lambda = \Delta\lambda' \\ &\cos(a) = \cos(b)\cos(c) + \mathrm{sen}(b)\mathrm{sen}(c)\cos(A) \\ &\cos(\Delta\theta) = \mathrm{sen}(u_{A'})\mathrm{sen}(u_{B'}) + \cos(u_{A'})\cos(u_{B'})\cos(\Delta\lambda') \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\Delta\theta^{(1)}}$$

$$\begin{aligned} &\frac{\mathrm{sen}(a)}{\mathrm{sen}(A)} = \frac{\mathrm{sen}(c)}{\mathrm{sen}(C)} \\ &\mathrm{sen}(\alpha_{AB}) = \frac{\mathrm{sen}(\Delta\lambda)\cos(u_B)}{\mathrm{sen}(\Delta\theta^{(1)})} \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\alpha_{AB}^{(1)}}$$

Ecuación fundamental

$$\begin{aligned} &\cos(u)\mathrm{sen}(\alpha) = \mathrm{sen}(\alpha_E) \\ &\mathrm{sen}(\alpha_E) = \cos(u_{A'})\mathrm{sen}(\alpha_{AB}^{(1)}) \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\alpha_E^{(1)}}$$

Cálculo de ε

$$\begin{aligned} &\varepsilon = \Delta\lambda' - \Delta\lambda \\ &\varepsilon_{AB}^{(1)} = -c_0\,\mathrm{sen}(\alpha_E^{(1)})(\theta_B - \theta_A) \\ &\theta_B - \theta_A = \Delta\theta^{(1)} \\ &c_0 = \sqrt{1-e^2} - 1 \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\varepsilon_{AB}^{(1)}}$$

$$\begin{aligned} &\varepsilon_{AB}^{(1)} = \Delta\lambda' - \Delta\lambda \\ &\Delta\lambda'^{(1)} = \varepsilon_{AB}^{(1)} + \Delta\lambda \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\Delta\lambda'^{(1)}}$$

Recalculo de $\Delta\theta$, α_{AB}, α_E

$$\cos(\Delta\theta^{(2)}) = \mathrm{sen}(u_{A'})\mathrm{sen}(u_{B'}) + \cos(u_{A'})\cos(u_{B'})\cos(\Delta\lambda'^{(1)}) \quad \Rightarrow \quad \boxed{\Delta\theta^{(2)}}$$

$$\mathrm{sen}(\alpha_{AB}^{(2)}) = \frac{\mathrm{sen}(\Delta\lambda'^{(1)})\cos(u_B)}{\mathrm{sen}(\Delta\theta^{(2)})} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\alpha_{AB}^{(2)}}$$

$$\mathrm{sen}(\alpha_E^{(2)}) = \cos(u_{A'})\mathrm{sen}(\alpha_{AB}^{(2)}) \quad \Rightarrow \quad \boxed{\alpha_E^{(2)}}$$

Elongación esférica

$$\cos\left(\alpha_E^{(2)}\right)\operatorname{sen}\left(\theta_{A'}\right)=\operatorname{sen}\left(u_{A'}\right)$$
$$\cos\left(\alpha_E^{(2)}\right)\operatorname{sen}\left(\theta_{B'}\right)=\operatorname{sen}\left(u_{B'}\right) \quad \Rightarrow \quad \theta_{A'}^{(1)},\ \theta_{B'}^{(1)}$$

Proceso iterativo

$$\varepsilon_{A'B'}^{(2)}=-\operatorname{sen}\left(\alpha_E^{(2)}\right)\left[c_0\,w_0+\frac{c_2\,w_2}{2}e'^2_g+\frac{c_4\,w_4}{8}e'^4_g+\ldots\right]\Bigg|_{\theta_{A'}^{(2)}}^{\theta_{B'}^{(2)}} \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_{A'B'}^{(2)}$$

$$c_0=\sqrt{1-e^2}-1 \qquad w_0=\theta$$
$$c_2=\frac{2\sqrt{1-e^2}}{e'^2}\left[1+\frac{e'^2}{2}-\frac{e'^4}{8}-\sqrt{1-e'^2}\right] \qquad w_2=\frac{1}{2}\left[\theta-\operatorname{sen}(\theta)\cos(\theta)\right]$$
$$w_4=\frac{3}{4}w_2-\frac{1}{4}\operatorname{sen}^2(\theta)\cos(\theta)$$

$$e'^2_g=e'^2\cos^2\left(\alpha_E\right)$$

$$\Delta\lambda'^{(2)}=\Delta\lambda+\varepsilon_{A'B'}^{(2)} \quad \Rightarrow \quad \Delta\lambda'^{(2)}$$

$$\cos\left(\Delta\theta^{(3)}\right)=\operatorname{sen}\left(u_{A'}\right)\operatorname{sen}\left(u_{B'}\right)+\cos\left(u_{A'}\right)\cos\left(u_{B'}\right)\cos\left(\Delta\lambda'^{(2)}\right) \quad \Rightarrow \quad \Delta\theta^{(3)}$$

$$\operatorname{sen}\left(\alpha_{AB}^{(3)}\right)=\frac{\operatorname{sen}\left(\Delta\lambda'^{(2)}\right)\cos\left(u_B\right)}{\operatorname{sen}\left(\Delta\theta^{(3)}\right)} \quad \Rightarrow \quad \alpha_{AB}^{(3)}$$

$$\operatorname{sen}\left(\alpha_E^{(3)}\right)=\cos\left(u_{A'}\right)\operatorname{sen}\left(\alpha_{AB}^{(3)}\right) \quad \Rightarrow \quad \alpha_E^{(3)}$$

$$\alpha_E^{(4)}\ldots\alpha_E^{(5)}\ldots\alpha_E^{(i)}\ldots\alpha_E^{(i+1)} \quad \Rightarrow \quad \alpha_E$$

Cálculo de α_B

$$\operatorname{sen}\left(\alpha_E\right)=\cos\left(u_{B'}\right)\operatorname{sen}\left(\alpha_B\right) \quad \Rightarrow \quad \alpha_B$$

Cálculo de α_{BA}

$$\alpha_{BA}=\alpha_B+180 \quad \Rightarrow \quad \alpha_{BA}$$

Elongaciones

$$\operatorname{sen}\left(\theta_A\right)=\frac{\cos\left(u_{A'}\right)}{\cos\left(\alpha_E\right)}$$
$$\operatorname{sen}\left(\theta_B\right)=\frac{\cos\left(u_{B'}\right)}{\cos\left(\alpha_E\right)} \quad \Rightarrow \quad \theta_A,\ \theta_B$$

Geodésica

$$S_{AB} = b\left[w_0 + \frac{w_2}{2} e'_g - \frac{w_4}{8} e'^4_g + \frac{w_6}{16} e'^6_g \right]\Bigg|_{\theta_A}^{\theta_B} \qquad \Rightarrow \qquad \boxed{S_{AB}}$$

$$w_6 = \frac{5}{6} w_4 - \frac{1}{6} \text{sen}^5(\theta)\cos(\theta)$$

8.2 Ejecutable de Matlab diseñado para la aplicación

El siguiente ejecutable permite resolver el cálculo de las líneas geodésicas de acuerdo al procedimiento descrito anteriormente.

Para ello deberemos ingresar: las coordenadas elipsoídicas, φ y λ, de los puntos a unir por la geodésica y los parámetros a y f del elipsoide..

El resultado será la longitud de la geodésica, pudiéndose desplegar las demás incógnitas que participan en el cálculo.

```
function y=geod(fa,fb,la,lb,a,f)
e2=2*f-f^2;
ua=atan(sqrt(1-e2)*tan(fa));
ub=atan(sqrt(1-e2)*tan(fb));
dlanda=lb-la;
dtita=acos(sin(ua)*sin(ub)+cos(ua)*cos(ub)*cos(dlanda));
alfaab=asin(sin(dlanda)*cos(ub)/sin(dtita));
alfae=asin(cos(ua)*sin(alfaab));
co=sqrt(1-e2)-1;
eab=-co*sin(alfae)*dtita;
dlandap=eab+dlanda;
dtita=acos(sin(ua)*sin(ub)+cos(ua)*cos(ub)*cos(dlandap));
alfaab=asin(sin(dlandap)*cos(ub)/sin(dtita));
alfae=asin(cos(ua)*sin(alfaab));
ep2=e2/(1-e2);
i=1;
while i<500,
      titaa=asin(sin(ua)/cos(alfae));
      titab=asin(sin(ub)/cos(alfae));
      epg2=ep2*cos(alfae)^2;
      c2=2*sqrt(1-e2)*(1+ep2*sqrt(1+ep2)/2)/ep2;
      c4=8*sqrt(1-e2)*(1+ep2/2-ep2^2/8-sqrt(1-ep2))/ep2;
      woa=titaa;
      wob=titab;
      w2a=(titaa-sin(titaa)*cos(titaa))/2;
      w2b=(titab-sin(titab)*cos(titab))/2;
      w4a=3*w2a/4-sin(titaa)^3*cos(titaa)/4;
      w4b=3*w2b/4-sin(titab)^3*cos(titab)/4;
      eab=-sin(alfae)*(co*wob+c2*epg2*w2b/2+c4*epg2^2*w4b/8-
      (co*woa+c2*epg2*w2a/2+c4*epg2^2*w4a/8));
      dlandap=dlanda+eab;
      dtita=acos(sin(ua)*sin(ub)+cos(ua)*cos(ub)*cos(dlandap));
      alfaab=asin(sin(dlandap)*cos(ub)/sin(dtita));
      alfae=asin(cos(ua)*sin(alfaab));
      i=i+1;
end,
alfab=asin(sin(alfae)/cos(ub))
alfaab=asin(sin(dlandap)*cos(ub)/sin(dtita))
alfaba=alfab+pi;
titaa=asin(sin(ua)/cos(alfae));
titab=asin(sin(ub)/cos(alfae));
woa=titaa;
wob=titab;
```

```
w2a=(titaa-sin(titaa)*cos(titaa))/2;
w2b=(titab-sin(titab)*cos(titab))/2;
w4a=3*w2a/4-sin(titaa)^3*cos(titaa)/4;
w4b=3*w2b/4-sin(titab)^3*cos(titab)/4;
w6a=5*w4a/6-sin(titaa)^5*cos(titaa)/6;
w6b=5*w4b/6-sin(titab)^5*cos(titab)/6;
epg2=ep2*cos(alfae)^2;
b=a*(1-f);
sab=-b*(wob+sqrt(epg2)*w2b/2-epg2^2*w4b/8+epg2^3*w6b/16-
(woa+sqrt(epg2)*w2a/2-epg2^2*w4a/8+epg2^3*w6a/16));
geod=sab
```

8.3 Resultados del cálculo

Geodésica	WGS-84	ROU-USAMS
Yacaré-Serra	290213.160 m	290219.755 m
Yacaré-Taroco	422434.248 m	422440.471 m
Serra-Taroco	380509.431 m	380516.217 m

Estas líneas geodésicas calculadas no son comparables entre sí debido a que están referidas a diferentes superficies.

A los efectos de comparar nuestros resultados con las coordenadas existentes referidas al sistema ROU-USAMS, procederemos al cálculo de los vectores entre los puntos, ya que la magnitud de los mismos son independientes de los sistemas de referencias.

9. Cálculo de la altura elipsoidal (h) en el sistema ROU-USAMS

9.1 Primer método

Con el fin de conocer la magnitud de los vectores en primer lugar se deberán de conocer las coordenadas cartesianas de los puntos en los dos sistemas de referencia.

Para el WGS-84, las coordenadas cartesianas de los puntos ya están calculadas.

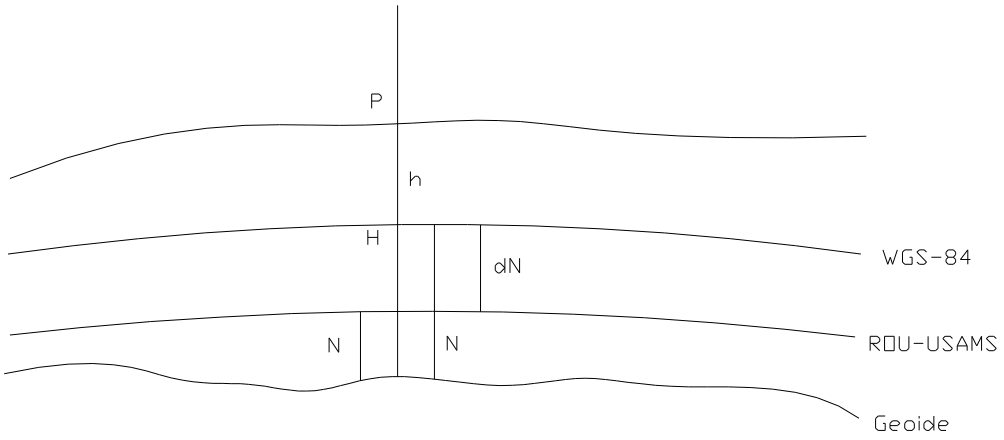
Para el sistema ROU-USAMS se conocen la longitud y latitud de los puntos, además se conocen las alturas niveladas (H), las cuales se pueden considerar como alturas ortométricas.

Para calcular la altura elipsoidica deberemos obtener el valor de la ondulación del geoide (N) en el punto deseado.

Partiendo de las ecuaciones de los parámetros involucrados en la transformación de un sistema de referencia en otro, se obtiene una ecuación para el cálculo de la variación de la ondulación del geoide (dN) entre ambos sistemas. En dicha ecuación se requiere del conocimiento de N en un punto para los dos sistemas de referencia. En nuestro caso utilizamos el punto Yacaré ya que al ser el Datum del sistema ROU-USAMS, la ondulación en dicho punto es cero.

Conocemos el N en cada punto en el WGS-84, por lo que previo cálculo de la variación de la ondulación del geoide, obtenemos el N en el sistema ROU-USAMS.

Este método implica considerar el geoide como una esfera.



Datos: Coordenadas elipsoidales en el WGS-84
Alturas niveladas de los puntos
Coordenadas φ, λ en el sistema ROU-USAMS
Coordenadas astronómicas

9.1.1 Procedimiento

$$dN = N_2 - N_1$$

Consideramos:

	φ' λ'	coordenadas astronómicas
	φ λ	coordenadas geodésicas
	N	ondulación del geoide
	a	semieje mayor del elipsoide
	f	aplastamiento

$$\xi_0 = \varphi'_0 - \varphi_0$$
$$\eta_0 = (\lambda'_0 - \lambda_0)\cos(\varphi_0)$$

$$d\,\eta_0 = \eta_0(WGS-84) - \eta_0(ROU-USAMS)$$
$$d\,\xi_0 = \xi_0(WGS-84) - \xi_0(ROU-USAMS)$$
$$d\,N_0 = N_0(WGS-84) - N_0(ROU-USAMS)$$
$$da = a(WGS-84) - a(ROU-USAMS)$$
$$df = f(WGS-84) - f(ROU-USAMS)$$

$$G_1 = -(M+h)_0(\cos(\varphi_0)\mathrm{sen}(\varphi) - \mathrm{sen}(\varphi_0)\cos(\varphi)\cos(\Delta\lambda))$$
$$G_2 = -(N+h)_0\cos(\varphi)\mathrm{sen}(\Delta\lambda)$$
$$G_3 = \mathrm{sen}(\varphi_0)\mathrm{sen}(\varphi) + \cos(\varphi_0)\cos(\varphi)\cos(\Delta\lambda)$$
$$G_4 = \frac{1}{w_0}(\mathrm{sen}(\varphi_0)\mathrm{sen}(\varphi)(1-e^2) + \cos(\varphi_0)\cos(\varphi)\cos(\Delta\lambda) - w\,w_0)$$
$$G_5 = \cos(\varphi)\cos(\Delta\lambda)\,k_0 + \mathrm{sen}(\varphi)(1-f)\left[(M\,\mathrm{sen}^3(\varphi) - 2N\,\mathrm{sen}(\varphi))_0 + \frac{a}{w}\mathrm{sen}(\varphi)\right]$$

Teniendo presente:

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$$
$$k_0 = \frac{a(1-f)\mathrm{sen}^2(\varphi_0)\cos(\varphi_0)}{w_0^3}$$
$$w^2 = 1 - e^2\,\mathrm{sen}^2(\varphi)$$
$$M = \frac{a(1-e^2)}{w^3}$$
$$N = \frac{a}{w}$$

$$\boxed{dN = G_1\,d\,\xi_0 + G_2\,d\,\eta_0 + G_3\,d\,N_0 + G_4\,da + G_5\,df}$$

$$N_{ROU} = N_{WGS84} - dN$$
$$h = H + N$$

9.1.2 Ejecutable de Matlab diseñado para la aplicación

```
function a=aplic(fi0,landa0,h0,H0,fi,landa,H,h,fi0p,landa0p)
f=3.35281066474e-3;
a=6378137;
dlanda=landa-landa0;
e=sqrt(2*f-f^2);
w0=sqrt(1-e^2*(sin(fi0))^2);
w=sqrt(1-e^2*(sin(fi))^2);
k0=a*(1-f)*(sin(fi0))^2*cos(fi0)/w0^3;
M=a*(1-e^2)/w^3;
M0=a*(1-e^2)/w0^3;
N=a/w;
N0=a/w0;
G1=-(M0+h0)*(cos(fi0)*sin(fi)-sin(fi0)*cos(fi)*cos(dlanda));
```

```
G2=-(N0+h0)*cos(fi)*sin(dlanda);
G3=sin(fi0)*sin(fi)+cos(fi0)*cos(fi)*cos(dlanda);
G4=(sin(fi0)*sin(fi)*(1-e^2)+cos(fi0)*cos(fi)*cos(dlanda)-w*w0)/w0;
G5=cos(fi)*cos(dlanda)*k0+sin(fi)*(1-f)*(M0*(sin(fi0))^3-
2*N0*sin(fi0)+a*sin(fi)/w);
sea0w=fi0p-fi0;
nu0w=(landa0p-landa0)*cos(fi0);
dsea=sea0w;
dnu=nu0w;
N0w=h0-H0;
dN0=N0w;
da=-251;
df=3.35281066474e-3-1/297;
dN=G1*dsea+G2*dnu+G3*dN0+G4*da+G5*df
Nw=h-H;
Nrou=Nw-dN;
hrou=Nrou+H;
a=[Nrou hrou];
```

Coordenadas astronómicas

Punto	φ'	λ'
Yacaré	-30° 35' 53".68	-57° 25' 01".30

9.1.3 Resultados

Punto	N (WGS-84)	N (ROU-USAMS)	h (ROU-USAMS)
Yacaré	16.41	0	129.30
Serra	17.41	1.32	98.79
Taroco	12.91	-1.60	187.48

Es de destacar que estos resultados verifican el hecho de que en el sistema ROU-USAMS, al ser un sistema local, las ondulaciones del geoide son menores que en el sistema WGS-84 (Sistema de referencia mundial).

9.2 Cálculo de distancias

9.2.1 Transformación de coordenadas geodésicas en coordenadas cartesianas

A los efectos de calcular las distancias entre puntos, se debe transformar las coordenadas elipsoidales en coordenadas cartesianas.

Se utilizan las siguientes fórmulas:

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \operatorname{sen}^2(\varphi)}}$$

$$x = (N + h)\cos(\varphi)\cos(\lambda)$$

$$y = (N + h)\cos(\varphi)\operatorname{sen}(\lambda)$$

$$z = \left[N(1-f)^2 + h\right]\operatorname{sen}(\varphi)$$

9.2.2 Cálculo de distancias

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

9.2.3 Ejecutable de Matlab diseñado para la aplicación

```
function f=dist(fi1,landa1,h1,fi2,landa2,h2)
a=6378388;
f=1/297;
e=sqrt(2*f-f^2);
N1=a/sqrt(1-e^2*(sin(fi1))^2);
x1=(N1+h1)*cos(fi1)*cos(landa1);
y1=(N1+h1)*cos(fi1)*sin(landa1);
z1=(N1*(1-f)^2+h1)*sin(fi1);
N2=a/sqrt(1-e^2*(sin(fi2))^2);
x2=(N2+h2)*cos(fi2)*cos(landa2);
y2=(N2+h2)*cos(fi2)*sin(landa2);
z2=(N2*(1-f)^2+h2)*sin(fi2);
f=sqrt((x2-x1)^2+(y2-y1)^2+(z2-z1)^2);
```

9.2.4 Resultados

Vector	Dist. (ROU-USAMS)	Dist (WGS-84)	Diferencia
Yacaré-Taroco	351101.67 m	351101.51 m	0.16 m
Yacaré-Serra	286965.34 m	286965.24 m	0.10 m
Taroco-Serra	305408.94 m	305408.32 m	0.62 m

9.3 Otro método para determinar la altura h

Otra forma de calcular la altura elipsoidal (h) en el sistema ROU-USAMS es considerar el siguiente método del cálculo de la variación de la ondulación del geoide entre dos puntos (referidos al mismo sistema).

En este método no se considera el geoide esférico sino que se supone una variación lineal de la deflexión de la vertical (θ) entre los puntos.

Considerando las componentes de la deflexión de la vertical:

$\xi = \varphi' - \varphi$ Componente Norte-Sur a lo largo del meridiano astronómico

$\eta = (\lambda' - \lambda)\cos(\varphi)$ Componente Este-Oeste en el primer vertical

La componente de θ en una dirección determinada es:

$\varepsilon = \xi\cos(\alpha) + \eta\,\mathrm{sen}(\alpha)$ Siendo α el acimut de la dirección

Integrando la deflexión de la vertical a lo largo de una trayectoria determinada, se cumple que:

$$\Delta_{12} = N_2 - N_1 = -\int_1^2 \varepsilon ds - E_{12}$$

donde E_{12} es la corrección ortométrica de las alturas niveladas.

En el caso más sencillo suponemos una variación lineal de θ entre los puntos extremos y despreciamos las correcciones ortométricas, es decir, sin considerar la curvatura de la línea de plomada.

Entonces obtenemos: $\Delta N_{12} = -\dfrac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} s$ donde s es la línea que une los puntos 1 y 2.

9.3.1 Ejecutable de Matlab diseñado para la aplicación

```
function y=n(fa1,la1,f1,l1,s,alfa,fa2,la2,f2,l2,n1,H2)
sea1=fa1-f1;
nu1=(la1-l1)*cos(f1);
eps1=nu1*sin(alfa)+sea1*cos(alfa);
sea2=fa2-f2;
nu2=(la2-l2)*cos(f2);
eps2=nu2*sin(alfa)+sea2*cos(alfa);
dn12=-(eps1+eps2)*s/2;
n2=n1+dn12;
h2=n2+H2;
y=[n2 h2];
[nu1 sea1;nu2 sea2]
```

9.3.2 Datos para el cálculo

Punto	φ'	λ'	φ	λ	H
Yacaré	-30° 35' 53".68	-57° 25' 01".30	-30° 35' 53".68	-57° 25' 01".30	129.30
Taroco	-32° 11' 02".38	-54° 13' 14".47	-32° 11' 02".22	-54° 13' 16".18	189.08
Etchegaray	-31° 00' 02".89	-55° 45' 06".30	-31° 00' 03".02	-55° 45' 07".79	381.14

N (Yacaré) = 0

Línea	Geodésica	Acimut
Yacaré-Etchegaray	205102.22 m	103° 19' 59".51
Yacaré-Taroco	422440.47 m	116° 03' 03".86
Etchegaray-Taroco	226228.40 m	126° 31' 56".61

9.3.3 Resultados

El cálculo de la altura elipsoidal h para el punto Taroco se puede efectuar siguiendo dos caminos:

1. Directamente desde Yacaré
2. Partiendo de Yacaré, hallamos el N en Etchegaray y luego desde este llegamos a Taroco

Punto	N (ROU-USAMS)	h (ROU-USAMS)	ξ	η
Etchegaray	-0.60	380.54	1".28	0".14
Taroco	-1.44	187.64	0".60	-0".16
Taroco (desde Yacaré)	-0.63	188.46	0".60	-0".16

Para comparar con el método anterior y el WGS-84 calculamos la distancia geométrica entre Yacaré y Taroco.

Vector	Dist. (ROU-USAMS)	Dist (WGS-84)	Diferencia
Yacaré-Taroco Con h = 187.64	351101.67 m	351101.51 m	0.16 m
Yacaré-Taroco Con h = 188.46	351101.70 m	351101.51 m	0.19 m

Vemos que la diferencia en las alturas elipsoidales calculadas en el último método no afectan sustancialmente la distancia Yacaré-Taroco.

La distancia Yacaré-Taroco calculada por los dos métodos de cálculo de h permanece prácticamente invariable.

10. Conclusiones

Consideraremos dos tipos de conclusiones: una referente a los software utilizados y la otra sobre el resultado de los procesamientos realizados.

Basándonos en nuestra experiencia de trabajo con ambos software y de las diferencias encontradas entre estos (antes mencionadas), podemos concluir que el Bernese es un software más poderoso que el Ski. El Bernese utiliza diversos programas con modelos matemáticos más complejos que el Ski, asimismo permite tener un mayor control sobre las diversas etapas que conforman el procesamiento. Esto último lleva a que mientras el manejo standard del Ski no requiera conocimientos avanzados sobre posicionamiento satelital, el uso del Bernese demanda un mayor nivel de conocimientos. Para desarrollar plenamente el potencial del Bernese el usuario deberá dominar completamente la temática, tanto en la parte teórica como la práctica. Los resultados que se obtienen con el Bernese no se limitan al posicionamiento, sino que brinda información que puede ser utilizada en otras aplicaciones científicas.

En lo referente a los resultados de los datos procesados concluimos lo siguiente: los valores obtenidos por ambos software no difieren entre sí más de lo esperado. La diferencia entre las coordenadas es menor a los 10 cm en todos los casos. Las precisiones alcanzadas están en ambos casos por debajo del cm, destacándose que en el Bernese son mayores. Tomando como referencia las coordenadas Sirgas publicadas por el IBGE, tenemos tres estaciones para comparar. En dos de estas los resultados obtenidos por el Bernese se aproximan más al valor correcto. En el punto Fortaleza, se aproximan más al valor correcto los resultados del Ski. Concluimos que debido a la proximidad entre los puntos Fortaleza y Montevideo (menor a 10 km), en lo referente al Bernese, se debió haber procesado en forma separada esta línea base, similar a lo hecho con el punto FI.

Dados los resultados obtenidos al comparar los módulos de los vectores entre los tres puntos considerados podemos concluir que la exactitud relativa entre los puntos considerados de la Red Geodésica Fundamental es buena. Más aún teniendo en cuenta los instrumentos usados, la antigüedad y los diversos métodos para su establecimiento.

11. Bibliografía

1. Bernese GPS Software
   Version 4.0
   Astronomical Institute
   University of Berne
   Suiza, 1996

2. SKI Documentation
   Leica Geosystems Inc.
   Suiza

3. Cursillo Preparatorio de Geodesia Satelitaria
   Ayudas Didácticas
   Area Geodesia
   Departamento de Agrimensura
   Facultad de Ingeniería, UNLP
   Argentina, 1996

4. Seminario GPS'99
   Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas.
   Universidad Nacional de la Plata
   Argentina, 1999

5. Global Positioning System
   Theory and Practice
   H. Lichtenegger and J. Collins
   Austria, 1994

6. SIRGAS
   Final Report
   Working Groups I and II
   IBGE
   Brasil, 1997

7. Geodesia y Cartografía Matemática
   Martín Asín
   España

8. Apuntes de Geodesia II
   Adhemar Pigni
   Instituto de Agrimensura
   Facultad de Ingeniería, UDELAR

9. Geodesia Geométrica
   Richard H. Rapp
   Departamento de Ciencias Geodésicas
   Universidad Estatal de Ohio

10. Geodesia
    Wolfgang Torgue