

USO DEL PLAN TOPOGRÁFICO LOCAL EN OBRAS LINEALES DE INGENIERÍA: CASO AUTOPISTA PRESIDENTE DUTRA.

Ivan Valeije Idoeta

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola Politécnica da USP
Departamento de Ingeniería de Transportes

BASE Aerofotogrametria e Projetos S.A.

Caixa Postal 61548 05424-970 São Paulo, SP Brasil

Tel.: 55 (11) 3818-5208 fax: + 55 (11) 3818-5716

Estudiante de doctorado

Vice Presidente de la Empresa Base Aerofotogrametria e Projetos S.A

e-mail: ivan@baseaerofoto.com.br

Rua Marques de Lajes, 1027, São Paulo, SP, Brasil

Tel.: 55 (11) 6946-9191 fax: 55 (11) 6946-4059

Palabras clave: Topografía, Geodesia, Locación.

Resumen

Este trabajo trata del tema del PTL – Plano Topográfico Local, con sus conceptos y características, tales como la posibilidad de mensuración o locación en el terreno con el mantenimiento continuo de la relación biunívoca de sus coordenadas con el sistema geodésico. Son tenidos en cuenta sus modelos matemáticos para su establecimiento, transformación de coordenadas, desde de coordenadas topográficas local hacia geodésicas, como al revés. Trata también de la orientación o determinación del norte geodésico desde las coordenadas topográficas local.

Es comentado aquí un caso de aplicación y establecimiento de un sistema de coordenadas alrededor de la Autopista Presidente Dutra, la cual conecta Rio de Janeiro hacia São Paulo, Brasil, en una longitud de 405 km.

Abstract

The present work deals with the presentation of the Topographical Local Grid Plan Coordinates, its definitions and characteristics, among them that one who enable the terrain location and surveying, with a biunivoc relationship of its coordinates with the geodetic system. It also includes the mathematical models for its establishing, coordinate transformation, from local grid to geodetic and vice versa. The orientation problem and the determination of the meridian convergence using topographical local grid plan coordinates are also discussed.

The case of the Presidente Dutra Road that links Rio de Janeiro and São Paulo for about 405 km like a concrete use of this coordinate system is also presented.

1. Introducción

Este trabajo tiene por objetivo primero presentar las principales características del plano topográfico local y su relación biunívoca con el sistema geodésico.

Eso se justifica por una parte por la importancia del tema en el posicionamiento geodésico asociado a la locación, donde es imprescindible un modelo matemático de proyección que suministre distancias, ángulos y áreas compatibles con las medidas directas en campo, desde cálculos analíticos hechos desde sus coordenadas, de modo que no haga falta cálculos de corrección de deformaciones lineales e angulares. Por otra parte suministrando un sesgo de bibliografía especializada.

Por lo tanto, este artículo está organizado en dos partes: la primera presenta las principales características del Plano Topográfico Local y la segunda presenta un caso práctico de ese sistema de coordenadas en la autopista Presidente Dutra, la cual conecta Rio de Janeiro hacia São Paulo en un tramo de 405 km. La parte primera es dividida en cuatro apartados, donde el apartado 1 es donde se presenta el trabajo junto con sus objetivos y justificativa.

El apartado 2: Plano topográfico local: conceptos y características; presenta lo que es el plano topográfico local, sus conceptos, sus propiedades, su sistema de coordenadas, su representación, su concepción de acurdeo con las distancias y ángulos en el terreno, sus constantes aditivas y orientación. Trata también de como se establece un plano topográfico local en una región específica del planeta, y al final comenta algunas consideraciones sobre este sistema .

El apartado 3: Transformación de coordenadas geodésicas en topográficas local; presenta el problema de esta transformación y el modelo matemático de Transformación cuando el plano está concebido y establecido. Trata también del problema de la orientación en un PTL – Plano Topográfico Local, por la presentación del modelo matemático del cálculo de convergencia meridiana de un punto cualquier.

O apartado 4, intitulado: Transformación de coordenadas topográficas local para geodésicas; trata del problema al revés del presentado en el apartado anterior, donde se presenta el modelo matemático calcula coordenadas geodésicas desde coordenadas topográficas local.

La segunda parte, contiene un solo apartado y donde se presenta las definiciones e las orientaciones de 12 planos establecidos alrededor de la autopista construyendo un sistema de coordenadas biunívocas con las coordenadas geodésicas. Esto permite la locación de obras sin la necesidad de correcciones angulares e lineales.

Así, desde esta organización, se espera con este trabajo una presentación al lector del Plano Topográfico Local, para que sea posible la habilidad, concepción y establecimiento de esto, además del cálculo de las coordenadas y la transformación para el sistema geodésico.

PARTE I

2. Plano topográfico local: conceptos y características

2.1 Presentación

Con el objetivo de aclarar los aspectos poco conocidos del PTL - Plano Topográfico Local, se va a presentar adelante sus conceptos y modelo matemático. El conocimiento de estos aspectos pueden ayudar en las siguientes dudas polémicas:

- a) Propiedades de los puntos geodésicos de acuerdo con coordenadas plano-retangulares UTM (N, E) en sustitución de sus coordenadas geodésicas (φ, λ) , aunque haga una correspondencia biunívoca entre las mismas. El IBGE suministra las coordenadas geodésicas de los puntos del Sistema Geodésico Brasileño - SGB junto con las coordenadas en UTM, pues el Sistema Cartográfico Brasileño adopta el Sistema UTM para la presentación cartográfica en las series de mapas en las escalas 250K, 100K, 50K y :25K. Este procedimiento tiene por objetivo no solo la localización de los puntos geodésicos en las hojas de las series cartográficas del Sistema Cartográfico Brasileño en estas escalas.
- b) Empleo generalizado del Sistema UTM, incluso para escalas más grandes que 10K, lo que sería recomendable para casos de pequeñas o medias escalas y nunca para casos de construcción de base cartográfica para proyectos y locación de obras de ingeniería, en especial, en áreas urbanas.
- c) Los sistemas RTM (Regional Transverso de Mercator) y LTM (Local Transverso de Mercator), aunque contengan modelos de deformación lineal (K_0) muy cercano de uno, presentan, cartográficamente, los puntos en el elipsoide de referencia, lo cual es una figura geométrica de la Tierra, donde se trata de la superficie matemática más próxima posible del geode (forma del planeta en un equipotencial dicho como cero, conocido como nivel del mar no perturbado y extendido hacia los continentes). El empleo de estos sistemas en proyectos y locación de obras de ingeniería hay que tener en cuenta el factor de elevación de transporte para los puntos representados, en los planos, para su correcto posicionamiento sobre el terreno, lo que cambia sus coordenadas plano-retangulares y consecuentemente, las distancias. Si no se hace este proceso pasa que se puede generar varios otros problemas, especialmente no que se refiere a los proyectos de locación de obras tales como de ferrocarriles e de metro, entre otras. Por ejemplo: distancias corregidas del factor de deformación lineal (K) obtenidas, desde un plano, con valores de 100 m, 500 m e 1000 m, en caso que no esté en la altitud de 500 m, cuando se alojan sobre el terreno, las correcciones, respectivamente, de + 0,008 m, + 0,039 e + 0,079. Para la altitud de 1000 m, las correcciones serían respectivamente, de + 0,016 m, + 0.079 y + 0,157. La equivocación es decir esos sistemas contienen módulos de deformación lineal (K_0) muy próximos de la unidad, siendo omitida la necesidad de corrección del factor de elevación, lo que es igual para el caso del uso de todas las variantes del Sistema Transverso de Mercator (UTM, RTM y LTM).
- d) Transformación de coordenadas UTM en Topográficas Local, solo aplicadas a las coordenadas UTM, de las correcciones relativas al factor de deformación lineal (K) y al factor de elevación con omisión de un origen. Teniendo en cuenta el tamaño y la conformidad del área de estudio o la extensión, la abstracción de la curvatura terrestre con este procedimiento puede generar errores arriba del límite de la precisión admisible para un levantamiento topográfico. Esto es, decir que los errores de esta abstracción son más grandes a los errores de las operaciones topográficas de campo.

2.2 Conceptuación del Plano Topográfico Local

El PTL es el sistema de presentación, en un plano, de las posiciones de los puntos de un levantamiento topográfico en cuanto a un origen de coordenadas geodésicas conocidas. En este sistema, todos los ángulos y distancias de las operaciones topográficas obtenidos desde los puntos del levantamiento topográfico, son tenidos como proyectados en real grandeza sobre un plan tangente a la superficie de referencia (elipsoide de referencia) del sistema geodésico adoptado, en el origen, donde las coordenadas geodésicas son conocidas.

Esto es decir que hay una coincidencia de la superficie de referencia con el plan tangente al mismo origen del sistema, donde no se lleva en cuenta la curvatura terrestre. Esta abstracción solo es válida para levantamientos topográficos realizados en áreas relativamente pequeñas de superficie terrestre, desde que los errores obtenidos desde esta hipótesis no superen los errores originados para los puntos obtenidos desde operaciones topográficas de posicionamiento.

2.3 Área de cobertura del sistema

El área de cobertura del sistema topográfico local es dada en función de la precisión requerida para el posicionamiento obtenidos con uso del levantamiento topográfico y del error generado con la no consideración de la curvatura terrestre, la cual es función de la distancia del punto más lejos de la región del proyecto en cuanto al origen del sistema.

Los valores adecuados a las dimensiones radiáis al origen de acuerdo con el área de cobertura del sistema son en general: 80 km para un error relativo máximo de 15K;

Para una cartografía con cobertura municipal: cerca de los 70 km corresponde a un error relativo máximo de 20K;

Ya para una cartografía en áreas urbanas y especiales: cerca de 35 km, lo que corresponde a un error relativo máximo de 100K;

Estos valores pueden ser reducidos en función del relieve del terreno. Las altitudes en la mayoría de los puntos del terreno, de acuerdo con su configuración y la finalidad del levantamiento topográfico, no pueden desplazar más que ± 150 m de la altitud media del terreno. Tanto para los caso de valores adecuados a la determinación del área de cobertura del sistema como de sus reducciones en función del relieve del terreno, nuevos planes tangentes han que ser establecidos, constituyendo sistemas topográficos local distintos orígenes. Cada uno de estos distintos, sistemas topográficos han que estar conectados uno con otro por medio de puntos comunes y que contengan coordenadas geodésicas conocidas.

2.4 Coordenadas plano-rectangulares

El posicionamiento de los puntos del levantamiento topográfico es dado por medio de un sistema cartesiano ortogonal bidimensional, donde:

Los ejes X e Y en el plano horizontal local (plano tangente al elipsoide de referencia) y que definen este plan, con origen en el origen del sistema topográfico local.

El eje Y coincide con la línea del meridiano (norte-sur geográfico) orientado, positivamente, para el norte geográfico.

El eje X es orientado, positivamente, para leste.

La concepción del sistema topográfico local, por se tratar de una pequeña área de cobertura terrestre, donde la forma geométrica de la tierra cambia de un elipsoide hacia una esfera (esfera adaptada de Gauss), donde el rayo es el rayo medio del elipsoide de referencia en el punto tangente al plan horizontal local (origen del sistema).

2.5 Distancias sobre el terreno

Teniendo en cuenta que las distancias medidas sobre el terreno sean proyectadas en verdadera grandeza sobre el plan horizontal local (plan tangente), este plan hay que ser elevado hacia la altitud media del terreno en el área del levantamiento topográfico convirtiéndose en el plan topográfico local.

Para que esto sea posible las coordenadas de los planes-rectangulares de los puntos de apoyo geodésico, empleados en el levantamiento topográfico han que llevar en cuenta el factor del relieve, lo que es presentado en la ecuación (1):

$$c = (R_m + H_t) / R_m \quad (1)$$

donde: c , o c_t es el factor de relieve, H_t es la altitud media del terreno y R_m es el Rayo medio en el origen.

2.6 Constantes aditivas

Para que no ocurra valores negativos para las coordenadas plan rectangulares en los puntos del levantamiento topográfico, el área de cobertura del sistema, han que ser añadidos a las coordenadas plan rectangulares del origen del sistema O ($X=0$ e $Y=0$), constantes adecuadas para su translación al exterior del da área de cobertura del sistema. Así, las coordenadas plano-rectangulares del origen O del sistema cambian para lo que se presenta el als ecuaciones (2) y (3):

$$X_0 = 0 + K_x = K_x \quad (2)$$

$$Y_0 = 0 + K_y = K_y \quad (3)$$

Dnde, K_x y K_y son las constantes arriba mencionadas.

2.7 Orientación

La orientación, en plan, de las distancias es dada por el acimut plan de sus sentidos, la cual es el ángulo formado por un sentido considerada de acuerdo con el norte de la cuadrícula (NQ), con vértice en el punto inicial de esa distancia. Las líneas del cuadrículado de los planes de los levantamientos topográficos corresponden a las proyecciones de líneas (en la esfera) paralelas al meridiano de origen (O) del sistema topográfico local. Esto es decir que los acimutes planes de los sentidos de las distancias presentadas en plano (plan topográfico local) están afectadas por la convergencia meridiana (γ), las cual es el ángulo, con vértice en el punto inicial de la distancia considerada, formado por la proyección de la línea paralela al meridiano de la origen (O) sobre el plan topográfico local, en eso vértice, con la tangente al meridiano de eso vértice, también proyectada en este plan. Conviene decir que la convergencia meridiana (γ) debe ser considerada en casos donde los elementos extraídos de los planos para transporte al terreno tienen la finalidad de reconstrucción de rumbos o para la elaboración de memoriales descriptivos de perímetros de propiedades en registros públicos o en acciones judiciales. En el caso del empleo de planos de proyectos de obras de ingeniería, la convergencia meridiana no es importante.

2.8 Establecimiento del sistema

El Establecimiento del sistema empieza con la selección del referencial geodésico para que sea hacer el cálculo de las coordenadas plan-rectangulares de los puntos geodésicos utilizados para el apoyo geodésico en el levantamiento topográfico. Estas coordenadas son obtenidas desde las coordenadas geodésicas de estos puntos (φ, λ) y desde las coordenadas geodésicas del origen (O) del sistema (φ_0, λ_0). Para eso, se emplea las ecuaciones de la solución inversa del problema geodésico de transporte de coordenadas, esto es, las ecuaciones aplicadas en el cálculo de acimutes y lados geodésicos. Donde, un de los puntos es el origen del sistema, el (φ_0, λ_0), y, el otro, el punto geodésico P(φ, λ) con coordenadas plan-rectangulares a determinar por medio de estas ecuaciones.

El origen del sistema (O) puede o no ser un punto de apoyo geodésico. Cuando un ponto es geodésico, es importante este esté ubicado en las cercanías del centro del área del proyecto.

En los casos donde no es un punto geodésico se puede elegir un punto cualquier, no obligatoriamente identificable y construido sobre el terreno, siendo sus coordenadas geodésicas impuestas, de modo conveniente, para que el punto más lejos del área del proyecto no proporcione un error afectado por no considerar la curvatura terrestre más grande que el error admisible en la operación topográfica de determinación de este punto.

Desde los puntos geodésicos con coordenadas plan-rectangulares en el sistema topográfico local, son obtenidas las coordenadas plan rectangulares de los otros puntos colectados por topografía.

2.9 Características del sistema

La diferencia entre el sistema topográfico local y los sistemas de proyección de Gauss y sus variantes TM (UTM, RTM e LTM) es la ventaja de que los valores de las distancias representadas son relativos a las mediciones directas sobre el terreno. El uso de planos de levantamientos topográficos hechos en el sistema topográfico local no envuelve la preocupación de la elevación de las distancias de la superficie del elipsoide de referencia (figura geométrica más cercana del geoide, la cual es la superficie equipotencial con altitud ortométrica definida como cero) para sus efectivas posiciones sobre el terreno. Además, no son tenida sen cuenta sus correcciones en cuanto al factor de deformación de escala (K). Lo mismo con las coordenadas plan-rectangulares de puntos notables para elaboración de proyectos de ingeniería y de su locación, cuando obtenidas desde levantamiento topográfico hechos en este sistema, donde no hacer falta un conocimiento técnico de las propiedades técnicas empleadas para este sistema de representación no que ser a los detalles colectados para el plano. Esto es, no hace falta conocer las correcciones de la deformación de la escala y del factor del relieve al nivel del terreno, características de los sistemas de proyección de Gauss y de sus variantes (TM, UTM, RTM y LTM).

Poco conocido en Brasil, el Sistema Topográfico Local, por otro lado, fue empleado en proyectos desarrollados en las ciudades de New York, Boston, Baltimore, Cincinnati, Rochester, Atlanta, Springfield, entre otras, en los Estados Unidos y en Tóquio, en Japón.

Otra característica interesante del PTL – Plano Topográfico Local, es la propiedad del simple cambio de parámetros de origen de los nuevos sistemas en los casos en que ocurre cambios de referencial geodésico. Esto es posible pues las coordenadas topográficas local mantiene la misma relación geométrica.

3. Transformación de coordenadas geodésicas en topográficas local

3.1 Problema

El problema de la Transformación de coordenadas geodésicas en plan-rectangulares en el Sistema Topográfico Local consiste en el cálculo de las coordenadas plano-rectangulares (X, Y) desde un punto P, cualquier, de coordenadas geodésicas (φ, λ), desde coordenadas geodésicas del origen del sistema topográfico local (φ_0, λ_0) cuyas coordenadas plan-rectangulares son arbitrarias y denominadas de X_0, Y_0 . Este problema es una adaptación desde el conocido problema inverso de geodesia y de popular uso en la literatura.

3.2 Fórmulas.

$$X_0 = x_0 + k_x \quad (4)$$

$$Y_0 = y_0 + k_y \quad (5)$$

$$k_x = k_y = 0 \quad (6)$$

x_0 e $y_0 =$ constantes arbitrarias

$$X = x + X_0 \quad (7)$$

$$Y = y + Y_0 \quad (8)$$

$$x = \Delta x = -\Delta\lambda_1 \cdot \cos \varphi_0 \cdot N_p \cdot \text{arc1}'' \cdot c \quad (9)$$

$$y = \Delta y = \frac{1}{B} [\Delta\varphi_1 + C \cdot x^2 + D \cdot (\Delta\varphi_1)^2 + E \cdot (\Delta\varphi_1) \cdot x^2 + E.C \cdot x^4] \cdot c \quad (10)$$

$$A = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta x}{\Delta y} \right) \quad (11)$$

Nota: Hay que tener en cuenta las señales de Δx e Δy para la correcta definición de los cuadrantes.

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 \quad (12)$$

$$\Delta\varphi = \varphi - \varphi_0$$

$$\Delta\lambda_1'' = \Delta\lambda'' \times \text{corrección arco-seno} \quad (13)$$

$$\Delta\lambda_1'' = \Delta\lambda'' \times \left[1 - \frac{(\text{sen1}'')^2}{6} \times (\Delta\lambda'')^2 \right] \quad (14)$$

$$\Delta\varphi_1'' = \Delta\varphi'' \times \text{correção arco-seno} \quad (15)$$

$$\Delta\varphi_1'' = \Delta\varphi'' \times \left[1 - \frac{(\text{sen1}'')^2}{6} \times (\Delta\varphi'')^2 \right] \quad (16)$$

$$\Delta A = \left[\Delta\lambda'' \cdot \text{sen} \varphi_m \cdot \sec \frac{\Delta\varphi}{2} + F \cdot (\Delta\lambda'')^3 \right] \quad (17)$$

$$A' = A + \Delta A \pm 180^\circ \quad (18)$$

Donde $\Delta A = \gamma_p$

Entonces, se hace un cálculo rápido, como prueba, para averiguación con el empleo de la ecuación a seguir:

$$N_0 \times \text{sen} A \times \cos \varphi_0 = -N_p \times \text{sen} A' \times \cos \varphi \quad (19)$$

$$B = \frac{1}{M_0 \times \text{arc1}''} \quad (20)$$

$$C = \frac{\tan \varphi_0}{2 \times M_0 \times N_0 \times \text{arc1}''} \quad (21)$$

$$D = \frac{3 \times e^2 \times \text{sen} \varphi_0 \times \cos \varphi_0 \times \text{arc1}''}{2 \times \sqrt{(1 - e^2 \cdot \text{sen}^2 \varphi_0)^3}} \quad (22)$$

$$E = \frac{1 + 3 \times \tan^2 \varphi_0}{6 \times N_0^2} \quad (23)$$

$$F = \frac{\text{sen } \varphi_m \times \text{cos } \varphi_m \times \text{sen}^2 1''}{12} \quad (24)$$

$$c = \frac{\sqrt{M_0 \times N_0} + H_t}{\sqrt{M_0 \times N_0}} \quad (25)$$

$$\varphi_m = \frac{\varphi + \varphi_0}{2} \quad (26)$$

$$M_0 = \frac{a \times (1 - e^2)}{\sqrt{(1 - e^2 \times \text{sen}^2 \varphi_0)^3}} \quad (27)$$

$$N_0 = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \times \text{sen}^2 \varphi_0}} \quad (28)$$

$$N_p = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \times \text{sen}^2 \varphi}} \quad (29)$$

$$e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}} = \sqrt{f \times (2 - f)} \quad (30)$$

$$f = \frac{a - b}{a} = 1 - \frac{b}{a} \quad (31)$$

Donde:

- N_0 - rayo de curvatura de la sección normal al plan meridiano del elipsoide en O (origen);
- N_p - rayo de curvatura de la sección normal al plan meridiano del elipsoide en P;
- M_0 - rayo de curvatura de la sección meridiana del elipsoide en O (origem);
- a - seme-eje grande del elipsoide de referencia;
- b - seme-eje pequeño del elipsoide de referencia;
- e - excentricidad primera del elipsoide de referencia;
- f - achatamiento del elipsoide de referencia;
- A - acimut topográfico y geodésico en el sentido OP;
- A' - acimut geodésico recíproco de A (solo de uso en la PRUEBA);
- γ_p - convergencia meridiana en P;
- $c_t = c$ - factor de relieve;
- H_t - altitud ortométrica del plano topográfico.

3.3 Orientación en el sistema topográfico local e a convergencia meridiana

3.3.1 Problema

El problema de la determinación del norte geográfico desde las coordenadas plano-rectangulares en el sistema topográfico local de puntos definen los acimutes planes (topográficos) consiste primordialmente en el cálculo de la convergencia meridiana en el vértice del acimut plan (topográfico) de un sentido, dado por sus coordenadas plan-rectangulares en el sistema topográfico local y desde el acimut a determinar del sentido del norte geográfico (verdadero) con la aplicación de la convergencia meridiana. El problema tiene como premisa: las coordenadas plan-rectangulares de los puntos definidores del sentido conocido, esto es, P (vértice del acimut) y Q (punto observado); las coordenadas plan-rectangulares y las coordenadas geodésicas del origen del sistema topográfico local e la altitud del plan topográfico.

La convergencia meridiana en el sistema de coordenadas plan-rectangulares topográficas, obviamente, son nulas solo alrededor del meridiano del punto origen del sistema. Para el caso de los otros puntos, en el hemisferio sur, es negativa para los puntos ubicados en los cuadrantes en el este del meridiano de O (origen), esto es, en los cuadrantes primero y segundo y positiva para los puntos ubicados en los cuadrantes al oeste de O (cuadrantes tercero y cuarto). En el hemisferio norte pasa al revés. Es de gran importancia no confundir los cuadrantes del sistema topográfico local con los cuadrantes del sistema UTM. La proyección UTM los ejes contienen origen en los cruces del Ecuador con el meridiano central del huso, mientras en el PTL los ejes contienen su origen coincidentes con el punto origen del sistema, lo cual es el punto de tangencia del plano topográfico en la superficie de referencia.

3.3.2 Ecuaciones para el cálculo de la convergencia meridiana

$$P(x_p, y_p) \quad Q(x_q, y_q) \quad O(x_0, y_0) \quad O(\phi_0, \lambda_0) \quad (32)$$

$$(PQ)_t = \tan^{-1} \frac{x_q - x_p}{y_q - y_p} \quad (33)$$

$$(PQ)_g = (PQ)_t + \gamma_p \quad (34)$$

$$k_x = k_y = 0 \quad (35)$$

$$X_0 = x_0 + k_x \quad (36)$$

$$Y_0 = y_0 + k_y \quad (37)$$

$$x_p = X_p - X_0 \quad (38)$$

$$y_p = Y_p - Y_0 \quad (39)$$

$$\gamma_p = (\Delta\lambda_p \times \text{sen}(\phi_m)) \times \left(\frac{1}{\cos\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right)} + (F \times \Delta\lambda_p \times \text{sen}^3) \right) \quad (40)$$

Donde:

$(PQ)_t$ - acimut topográfico da sentido PQ;

$(PQ)_g$ - acimut geodésico da sentido PQ;

γ_p - convergencia meridiana en el punto P con valor dado en segundos

3.4 Consideraciones

En el uso de las ecuaciones hay que tener en cuenta ϕ negativo en el hemisferio sur, λ creciendo positivamente para este.

Los coeficientes C, D e F son negativos para el hemisferio sur.

El eje de las ordenadas es el eje de Y y de las abscisas es el eje X.

El acimut, A, es topográfico y también geodésico, pues en **O** la convergencia meridiana es cero y **A'** es elipsoidal. Donde estos acimut son para el uso en la prueba (detección de errores gruesos en los cálculos).

El acimut recíproco en el sistema topográfico local es igual a **A ± 180°**, no teniendo en cuenta la convergencia meridiana.

4. Transformación de coordenadas topográficas local en coordenadas geodésicas

4.1 Problema

El problema de la Transformación de coordenadas plano-rectangulares para el sistema topográfico local en coordenadas geodésicas está basado en el cálculo de las coordenadas geodésicas ϕ y λ de un punto P dado por sus coordenadas plano-rectangulares X e Y, desde estas y de las coordenadas geodésicas ϕ_0 e λ_0 y plan-rectangulares X_0 e Y_0 del origen del sistema topográfico local. Este problema es una adaptación del conocido problema directo de la geodesia que se encuentra en la literatura.

4.2 Ecuaciones

$$X_0 = x_0 + k_x \quad (41)$$

$$Y_0 = y_0 + k_y \quad (42)$$

$$k_x = k_y = 0 \quad (43)$$

X_0 e $Y_0 = \text{constantes arbitrarias}$

$$X = x + X_0 \quad (44)$$

$$Y = y + Y_0 \quad (45)$$

$$x' = \frac{x}{c} \quad (44)$$

$$y' = \frac{y}{c} \quad (45)$$

$$c = \frac{\sqrt{M_0 \times N_0} + H_t}{\sqrt{M_0 \times N_0}} \quad (46)$$

$H_t = \text{altitud ortométrica del plan topográfico}$

$$M_0 = \frac{a \times (1 - e^2)}{\sqrt{(1 - e^2 \times \text{sen}^2 \varphi_0)^3}} \quad (47)$$

$$N_0 = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \times \text{sen}^2 \varphi_0}} \quad (48)$$

$$N_p = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \times \text{sen}^2 \varphi}} \quad (49)$$

$$s = \sqrt{x'^2 + y'^2} \quad (50)$$

(donde s = distancia topográfica OP)

$$A = \tan^{-1} \frac{x'}{y'} \quad (51)$$

(A = acimut topográfico del sentido OP)

$$\varphi = \varphi_0 + \Delta\varphi \quad (52)$$

Corrección de $\Delta\varphi'' \rightarrow \Delta\bar{\varphi}_1 \Rightarrow \Delta\bar{\varphi}_1 = \Delta\varphi_1'' \times$ corrección de arco-seno

$$-\Delta\varphi'' = \Delta\varphi_1'' \times \left(1 + \frac{(\text{arcl}''')^2}{6} \times (\Delta\varphi_1'')^2 \right) \quad (53)$$

$$\Delta\varphi_1'' = -\delta\varphi'' - D \times (\delta\varphi'')^2 \quad (\text{em segundos}) \quad (54)$$

$$\delta\varphi'' = B \cdot s \cdot \cos A + C \cdot s^2 \cdot \text{sen}^2 A - B \cdot E \cdot s^3 \cdot \text{sen}^2 A \cdot \cos A, \text{ ou} \quad (55)$$

$$\delta\varphi'' = B \cdot \Delta y + C \cdot \Delta x - B \cdot E \cdot \Delta x^2 \cdot \Delta y \quad (56)$$

$$\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda \quad (57)$$

$$\Delta\lambda'' = \Delta\lambda_1'' \times \text{corrección arco-seno} = \Delta\lambda_1'' \times \left(1 + \frac{(\text{arcl}''')^2}{6} \times (\Delta\lambda_1'')^2 \right) \quad (58)$$

$$\Delta\lambda_1'' = \frac{1}{N_p \times \text{arcl}''} \times s \times \text{sen} A \times \text{sec} \varphi \quad (59)$$

$$-\Delta A = \Delta\lambda'' \times \text{sen} \frac{\varphi + \varphi_0}{2} \times \text{sec} \frac{\Delta\varphi}{2} + F \times (\Delta\lambda'')^3 \quad (60)$$

$$A' = A + \Delta A \pm 180^\circ \quad (61)$$

(acimut geodésico el en sentido PO)

$$\text{Prueba: } N_0 \times \text{sen} A \times \cos \varphi_0 = -N_p \times \text{sen} A' \times \cos \varphi \quad (62)$$

Donde: N_0, N_p, M_0, a, e, c tienen las mismas definiciones presentadas en 3.2. y los coeficientes B, C, D, E e F tienen también las mismas expresiones.

4.3 Consideraciones

En el uso de las ecuaciones hace falta tener en cuenta las mismas consideraciones del apartado 3.4.

La prueba sirve solo para la detección de errores gruesos para el cálculo de los valores de A e A', los cuales aquí son el acimut geodésico directo del sentido OP y su acimut geodésico recíproco, respectivamente, cuya diferencia es la convergencia meridiana en el punto P.

PARTE II

5. Presentación del Caso

Hasta ahora se hizo el establecimiento de un Plan Topográfico Local único, pero en muchos casos tales como obras lineales, hace falta establecer varios planes continuados para que se llegue a resultados de acuerdo con las necesidades de locación. Lo que es incómodo aquí es la necesidad de que haga un punto referencial con dos o más coordenadas distintas. Por ejemplo un punto puede tener coordenada con referencia al plan 1 y un par distinto de coordenadas para el plan 2. No caso en que la región este ubicada en la región del plan primero se adoptan las primeras coordenadas, por otro la en caso que este ubicada en la región del plan segundo se adoptan las coordenadas correspondientes de esto dicho plan.

La solución de este problema es una combinación de establecimientos de distintos Planes Topográficos Local secuenciales, con rotaciones y translaciones adecuados de modo que un punto común para ambos planes (preferentemente alrededor de la obra linear), el mallado de coordenadas sea único de modo a permitir que un punto tenga la misma coordenada del primero y del plan segundo. Se recomienda que se haga eso procedimientos

sucesivamente alrededor del trayecto, pero de acuerdo con las limitaciones del PTL en cuanto a distancias y cambios de relieve, lo que permite obtener un sistema de coordenadas secuencial biunívoco con el sistema geodésico. Esto torna posible el levantamiento y la locación a medida que se corre grandes distancias, como es el caso de obras lineales de ingeniería.

Tal metodología fue empleada para el establecimiento del SCND – Sistema de Coordenadas Nova Dutra, que conectado con el sistema UTM es utilizado en el GIS de la concesionaria Nova Dutra alrededor del tramo de concesión de la Autopista Presidente Dutra con una longitud de aproximadamente 405 km y con cambios de altitud superiores a los 800 m, entre las ciudades de Rio de Janeiro y São Paulo, Brasil.

SISTEMA DE COORDENADAS NOVA DUTRA
Parametros de trnslación e rotación del grid de los PTL (Plans Topograficos Locales)
ELIPSOIDE: SAD 69

Plano	E	N	X ₀	Y ₀	Rot	φ ₀ (Sul)	λ ₀ (Oeste)	Ht (m)	MC
1	354250	7407600	354175.526	407564.772	-0° 33' 34.7532"	23°26'05.7976"	46° 25' 36.1680"	700	45 W
2	391610	7421580	391548.465	421544.772	-0°24'51.10810"	23°18'41.75317"	46°03'36.20633"	650	45 W
3	424120	7441900	424072.567	441870.497	-0°17'18.39989"	23°07'47.59459"	45°44'28.03228"	600	45 W
4	458550	7461700	458518.649	461678.336	-0°09'23.82802"	22°57'08.11066"	45°24'15.54212"	600	45 W
5	490500	7485000	490484.341	484989.312	-0°02'07.79998"	22°44'32.13150"	45°05'33.08832"	600	45 W
6	522930	7507550	522930.000	507550.000	+0°05'09.40295"	22°32'18.30593"	44°46'37.21646"	450	45 W
7	561450	7516550	561467.281	516553.552	+0°13'44.97955"	22°27'22.18231"	44°24'09.91954"	450	45 W
8	596290	7501600	596320.988	501597.477	+0°21'32.92704"	22°35'22.53453"	44°03'47.72569"	500	45 W
9	616000	7495200	616037.737	495195.724	+0°25'59.02181"	22°38'46.19657"	43°52'15.83662"	400	45 W
10	620450	7492650	620489.092	492645.137	+0°26'59.34763"	22°40'07.99052"	43°49'39.24730"	300	45 W
11	629150	7488700	629191.194	488694.583	+0°28'57.38607"	22°42'14.10792"	43°44'33.26895"	50	45 W
12	656000	7484700	656045.570	484695.445	+0°35'01.41367"	22°44'15.98373"	43°28'50.96838"	50	45 W

Tabla 1: Parametros de trnslación e rotación del grid de los PTL

En la figura abajo se ve la distribución de los PTL segun el traçado de la autopista, la distancia de validad e las diferencias de altitud.



Figura 1: Distribuição de los PTL

6. Conclusión

Es amplio el uso de los sistemas de proyección cartográficas en los servicios de ingeniería. Por otro lado, el desconocimiento de la realidad, además de la ignorancia en cuanto a las características de las proyecciones,

convierte en el uso inadecuado de esos sistemas, donde se omiten las propiedades de las deformaciones y los factores de cambio de altitud y así no se aplican las correcciones correctamente. Eso todo relacionado al uso del sistema de coordenadas planas, con correspondencia biunívoca al sistema geodésico, justifica la presentación del PTL-Plan Topográfico Local, su relación con respecto al sistema geodésico y su modelaje matemática. Otro factor importante es en cuanto al creciente popularización del uso del sistema de posicionamiento por satélite GPS (*global positioning system*) no solo para fines de posicionamiento sino también para locación.

Se espera con este trabajo que se llegue a los objetivos de presentar un estudio más analítico y que pueda ser útil de modo a ayudar profesionales con habilitación para ejecutar servicios de posicionamiento, locación, cartografía, georeferenciación y otros.

7. Referencias Bibliográficas

- [1] ANDERSON, J.M.; MIKHAIL, E.M. Introduction to Surveying. New York, McGraw-Hill, 1985.
- [2] ASÍN, F.M. Geodesia y cartografía matemática. Madrid, 1983.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-6022 - Apresentação de relatórios técnico-científicos - Rio de Janeiro, 1989.
- [3] _____. NBR-6023 - Referências bibliográficas -. Rio de Janeiro, 1989.
- [4] _____. NBR-13133 –Levantamentos topográficos -. Rio de Janeiro, 1994.
- [5] _____. NBR-14166 –Rede de referência cadastral -. Rio de Janeiro, 1998
- [6] BRASIL. Decreto n.89.817 de 20 de junho de 1984. Dispõe sobre as instruções reguladoras das normas técnicas da cartografia nacional. Diário Oficial da União. Brasília. 22 de junho de 1984. Seção 1, p.8884-6.
- [7] CINTRA, J.P. Rede GPS: parâmetros de classificação. In: CONGRESSO NACIONAL DE INGENIERÍA DE AGRIMENSURA, VII, Salvador, 1996. Anais. Salvador, FENEA, 1996. p.239-49.
- [8] _____. Topografia Básica (PTR-285), São Paulo, Departamento de Ingeniería de Transportes da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1999./Apostila/
- [9] COSTA, D. C.; IDOETA, I. V. Rede de referência cadastral municipal em Campinas, SP. In: CONGRESSO NACIONAL DE INGENIERÍA DE AGRIMENSURA, VII, Salvador, 1996. Anais. Salvador, FENEA, 1996. p.213-28.
- [10] HOSMER, G. L. Geodesy. 2.ed. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1953.
- [11] IDOETA, I. V. ; TOSTES, F. A. Sistemas TM e Topográfico Local (PTR-761), São Paulo, Departamento de Ingeniería de Transportes da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1997./Apostila/
- [12] IDOETA, I. V., Plano Topográfico local, Pirassununga, São Paulo, Faculdade de Ingeniería Agrimensura de Pirassununga, 2003.
- [13] LIMA, D.G. Sistema Topográfico Local. Piracicaba, ESALQ/USP, 1997