

EXPLORACION ASTRONOMICA Y SITUACION GEOGRAFICA DE LOS PUNTOS DE CRUCE DEL TROPICO DE CANCER SOBRE LAS DIEZ CARRETERAS FEDERALES DEL PAIS QUE PASAN DE LA ZONA TEMPLADA A LA TROPICAL

MANUEL MEDINA PERALTA*

RESUMEN

Se describen los métodos astronómicos para la situación de los puntos cercanos al Trópico de Cáncer y el procedimiento para situar geodésicamente los puntos de cruce en función de las coordenadas calculadas por la observación astronómica.

La Secretaría de Obras Públicas, específicamente el Departamento de Vías Terrestres de dicha Secretaría, solicitó al Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México la determinación geográfica o sea la fijación, por medidas geodésicas o astronómicas, de los lugares en que la Secretaría deba construir monumentos sobre el cruce del Trópico de Cáncer por las siguientes carreteras federales.

1. La Paz-San José del Cabo.
2. Mazatlán-Culiacán.
3. Mazatlán-Durango.
4. Fresnillo-Durango.
5. Fresnillo-Torreón.
6. Zacatecas-Salttillo.
7. San Luis Potosí-Salttillo.
8. San Luis Potosí-Ciudad Victoria
9. Ciudad Mante-Ciudad Victoria.
10. Aldama-Soto la Marina.

El Instituto de Geofísica, previa consulta con la Sección de Geodesia por lo que respecta a instrumentos y equipo, aceptó ejecutar los trabajos respectivos y giró instrucciones para realizarlos. Descartada la idea de

* Sección de Geodesia, Instituto de Geofísica, UNAM.

realizar esta operación por procedimientos geodésicos, lo que implicaría llevar triangulaciones geodésicas a los cruces respectivos, el Instituto de Geofísica y la Secretaría de Obras Públicas estuvieron de acuerdo en que la operación se llevara a cabo exclusivamente por métodos astronómicos.

En este caso, el proceso de la operación consiste en localizar estaciones astronómicas o sean puntos en que se determinen las coordenadas geográficas "latitud" y "longitud" en cada una de las diez carreteras nacionales que cruza el Trópico de Cáncer y que a partir de dichas estaciones astronómicas, se llegue a los puntos de cruce por una corta operación geodésica o topográfica. El Trópico de Cáncer es un círculo menor de la esfera celeste que dista del Ecuador una cantidad en grados y minutos igual a la oblicuidad de la eclíptica; actualmente su valor, según lo indican los Anuarios Astronómicos, entre ellos el Anuario del Instituto de Astronomía de la U.N.A.M., es de $23^{\circ} 27' 08''$, ángulo que no es constante, pues debido a los complicados y variados movimientos de la Tierra, viene disminuyendo anualmente a razón de 4 décimos de segundo, por lo que puede aceptarse que un valor cerrado de $23^{\circ} 27' 00''$ corresponderá a la oblicuidad media de la eclíptica en el resto del siglo actual.

Además de esta primera consideración, se estudió la precisión con la que deberían hacerse estas determinaciones. Entre una fijación geodésica y una fijación astronómica existe una gran diferencia; la situación geodésica, hecha con el refinamiento de la observación moderna, proporciona la localización de un punto con algunos centímetros de error, en tanto que la segunda logra precisiones angulares de centésimos de segundo, que en unidades lineales representan algunos decímetros.

Esta precisión es ilusoria cuando no es de carácter geodésico-astronómico, esto es, cuando la situación no está íntimamente relacionada con una medida geodésica, como se efectúa en las estaciones Laplace. Además, la Astronomía Geodésica se ve obligada a operar dentro del marco de las perturbaciones topohidrográficas, que en términos generales obran sobre la plomada para desviarla a uno y otro lado del centro de la Tierra; este efecto perturbador se llama "desviación de la vertical" y varía de un lugar a otro de acuerdo con el relieve del terreno, desde pocos segundos de arco, hasta varios minutos para estaciones ubicadas en lugares cercanos a los grandes macizos montañosos.

De acuerdo con lo anterior, se comprenderá que por mayor precisión que pueda obtenerse en la determinación geográfica de una latitud, bien sea empleando los mejores instrumentos, como repitiendo la operación gran número de veces, se encontrará un valor que no será el verdadero

debido al efecto antes dicho de la desviación de la vertical y como la desviación en México es alrededor de 12 a 15 segundos de arco, se programaron las operaciones en forma que sus errores no excedieron en ningún caso de 10 segundos.

El equipo e instrumental de que se dispuso estaba compuesto por un teodolito Wild T-2 de 1" de aproximación en ambos círculos, dos cronómetros de tiempo medio y sideral respectivamente y los aparatos meteorológicos indispensables para conocer la temperatura y presión en el momento de las observaciones. Complementaban este equipo dos receptores de radio de transistores marca "Hitachi" y un cronógrafo o reloj de parada "Stopwatch". El programa de operaciones consistió fundamentalmente en las siguientes:

- a) elegido el lugar de estacionamiento, la primera operación consistía en instalar el teodolito en un lugar cercano a la carretera, a 5 o 10 metros de uno de sus bordes y en un sitio abrigado para estar protegido, en lo posible, de la luz proveniente de los faros de los vehículos que transitaban por ella.
- b) inmediatamente después se ponía en marcha el reloj de tiempo medio usando para ello las señales de tiempo universal radiadas por el Observatorio de Boulder, Colorado, EE. UU. de América, que controla el Observatorio Naval de Washington, y
- c) después se hacía una observación de sol para obtener el azimut de una dirección, calculándose esta observación en el campo mismo para tener así una línea de azimut conocida que se utilizaba en la noche para orientar debidamente el instrumento y estar en la posibilidad de observar estrellas de pequeña magnitud para la determinación de la hora.

Es pertinente indicar que la recepción de las señales de radio a través de uno de los receptores disponibles, tenía por objeto poner a funcionar el reloj de tiempo medio y posteriormente el de tiempo sideral con que se trabajaba tanto en la determinación de la hora como en el cálculo de la longitud. La recepción de las señales horarias se hizo por el método de vista y oído; con un poco de práctica es posible obtener una precisión de un décimo de segundo en cada comparación, haciéndose comparaciones cada hora durante la permanencia en una estación de trabajo y dentro de este grupo de comparaciones, algunas se llevan a cabo por el método de las coincidencias.

Este método consiste en comparar las señales de radio con las señales que produce el cronómetro en el instante en que la fracción de segundo

de ambas es cero; en este momento se escucha un sólo sonido, tal como un acorde y la comparación puede obtenerse con mayor precisión que a vista y oído. Estas comparaciones especiales por coincidencias se destinan a los cálculos de longitud mientras que las ordinarias se aplican al cálculo de la marcha del cronómetro, aclarándose que para que haya lugar a las coincidencias se requiere que las señales emitidas por la estación de radio sean de una unidad de tiempo diferente a las que se tienen en el cronómetro, lo que fácilmente se realiza usando un cronómetro de tiempo sideral, dado que las señales se transmiten en tiempo medio.

La Astronomía de Posición es por excelencia la ciencia de las aproximaciones "sucesivas" y se procedía en dicha forma partiendo, por ejemplo, de las coordenadas del lugar tomadas de una carta geográfica o deducidas de una primera observación solar. Para poner en funcionamiento el cronómetro de tiempo sideral, se empleaba la longitud tomada de una buena carta geográfica y con este dato se calculaba la hora sideral de una señal de tiempo medio, recibida por radio, con cuya operación se ponía a funcionar el cronómetro de tiempo sideral con errores muy pequeños que más tarde se eliminaban en la observación astronómica.

El elemento básico en la Astronomía de Posición es el "tiempo", o más claramente la "hora"; todos los problemas de la Astronomía de Posición se resuelven mediante el triángulo astronómico. Para conocer la hora en un momento dado debe resolverse el triángulo astronómico con relación al ángulo horario, pues se tiene la siguiente fórmula general

$$T + \Delta T = \alpha + H$$

donde T es la indicación del cronómetro en el momento dado y ΔT su error o corrección; α es la ascensión recta del astro considerado.

El ángulo horario H puede determinarse, según se observen el Sol o una estrella, por uno de los procedimientos siguientes:

- a) por distancias zenitales del astro,
- b) por alturas iguales de un astro o por alturas iguales de dos estrellas (método mexicano del Ingeniero Geógrafo Don Francisco Díaz Covarrubias) y
- c) por pasos meridianos de estrellas.

Se emplearon para esta operación los dos primeros métodos, de acuerdo con las condiciones de visibilidad; para la aplicación del primero es suficiente observar de dos a cuatro estrellas y aplicar la fórmula conocida:

$$\operatorname{sen}^2 \frac{1}{2} H = \frac{\operatorname{sen} \frac{1}{2} [z + (\varphi - \delta)] \times \operatorname{sen} \frac{1}{2} [z - (\varphi - \delta)]}{\cos \varphi \cos \delta}$$

Siempre que las condiciones del cielo lo permitieron, se aplicó el método de alturas iguales de dos estrellas para la determinación de la "hora".

En este método sólo se toma la hora cronométrica en que las dos estrellas, una al oriente y otra al occidente, alcanzan la misma altura. Designando por T_E y T_W dichas horas, la corrección cronométrica en el momento de la observación se calcula por la fórmula:

$$\Delta T = \frac{1}{2} (\alpha_W + \alpha_E) + \Delta H - \frac{1}{2} (T_W + T_E)$$

en la que,

$$\Delta H = \left[\frac{\operatorname{tang} \varphi}{\operatorname{sen} H} - \frac{\operatorname{tang} \delta}{\operatorname{tang} H} \right] \frac{\Delta \delta}{30}$$

Los errores probables que se obtuvieron en la determinación de la "hora" por estos dos métodos fue en promedio de $\pm 0^s.3$ en el método de zenitales y de $\pm 0^s.1$ en el de alturas iguales de dos estrellas.

La determinación de la "latitud" se hizo por el método de observación de alturas de la estrella polar en cualquier posición; así todas ellas se efectuaron cuando la Polar se encontraba muy cerca de su paso superior por el meridiano y para el cálculo se usó la serie de Litrow, cuyos tres primeros términos son los siguientes:

$$\varphi = a - p \cos H + \frac{1}{2} p^2 \operatorname{sen}^2 H \operatorname{tang} a \operatorname{sen} 1''$$

donde a es la altura de la Estrella Polar en el momento de la observación, corregida por nivel y refracción; p es igual a $90^\circ - \delta$, siendo δ la declinación de la Polar y H su ángulo horario. El error probable medio de las latitudes fue de $\pm 0^s.7$.

El cálculo de la longitud se hizo en cada estación por el método de la comparación de las señales horarias recibidas por radio de la estación WWV de Boulder, Colo., que controla el Observatorio Naval de Washington, con las indicaciones del cronómetro usado en la estación, debidamente corregidas por ΔT y marcha. Para esta operación se elegía, dentro del registro de comparaciones, una señal que estuviera próxima a la época media de las determinaciones de la hora, corrigiendo esta indica-

ción como antes se ha dicho; el resultado representa la "hora sideral local" en el momento de la señal elegida, de tiempo medio universal y convirtiendo esta última hora en sideral y restando una de la otra se llega a la "diferencia de longitudes".

Como se operó con tiempo del meridiano 90° W. G., bastaba agregar al resultado 6 horas para tener la longitud referida a Greenwich. El error probable de esta determinación fue de $\pm\sqrt{(0.3)^2 + (0.2)^2} = 0.36$ en que 0.3 y 0.2 son los errores probables de la determinación de la "hora" el primero y de comparación de las señales el segundo; este resultado, convertido en arco, representa el error en longitud y queda dentro del margen de la posición fijado para esta operación o sean $\pm 10''$.

Finalmente, la tercera coordenada o sea la "altitud" se obtuvo por medio de las nivelaciones de precisión que han efectuado algunos organismos oficiales entre ellos la Comisión de Estudios de Territorio Nacional (CETENAL). En algunos casos, por ejemplo, en la carretera de Durango a Mazatlán, en que no se han hecho nivelaciones de precisión, se obtuvo la altitud de la estación base con un altímetro de precisión.

En la forma anteriormente explicada se determinaron las tres coordenadas de las estaciones base. Afortunadamente, con una sola excepción, estas estaciones quedaron establecidas en líneas "tangentes" de las carreteras, lo que hizo posible la transferencia de coordenadas de dichas

TABLA I.—RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS ESTACIONES ASTRONÓMICAS DE BASE EN QUE SE APOYÓ LA DETERMINACIÓN DEL TRÓPICO DE CÁNCER

<i>Carretera</i>	<i>Est. Base</i>	<i>Latitud</i>	<i>Longitud</i>	<i>Punto de Cruce</i>
1	Kil. 135	23°27'20".94	109°40'24".75	23°27' 109°40'21".28
2	24 +300 m	23°28'20".53	106°29'00".45	106°28'12".30
3	Sta. Rita	23°26'34".90	105°50'46".80	105°50'37".90
4	19 +413 m	23°26'51".62	103°03'57".45	103°04'04".65
5	Kil. 18	23°26'55".40	102°56'57".15	102°56'57".49
6	Kil. 80	23°27'27".10	102°10'43".80	102°11'17".70
7	Kil. 173	23°29'54".96	100°38'00".90	100°37'36".50
8	Kil. 116	23°27'08".39	99°22'06".30	99°22'08".20
9	Kil. 190	23°27'05".54	98°58'23".85	98°58'20".94
10	Kil. 101	23°26'00".59	97°59'49".95	97°59'45".17

estaciones al Trópico de Cáncer, usando las siguientes fórmulas geodésicas:

$$\Delta\varphi = D \cos A_z(B) \text{ y } \Delta\lambda = \text{sen } A_z(A)$$

donde $\Delta\varphi$ es la diferencia entre las latitudes del Trópico de Cáncer ($23^{\circ}27'$) y la obtenida por la observación en la estación base; A_z es el azimut geodésico de la carretera, a partir de la estación base, en grados cerrados y (A) y (B) son dos coeficientes geodésicos, en función de la latitud, que se encuentran en cualquiera obra de Geodesia.

Despejando a D de la primera se tiene

$$D = \frac{\Delta\varphi}{\cos A_z(B)}$$

Con esta última fórmula se calcula la distancia D que debe medirse sobre la carretera, a partir de la estación base, para encontrar el punto de latitud $23^{\circ}27'$ que marca el Trópico de Cáncer en ese lugar. La longitud geográfica de dicho punto se calcula agregando a la longitud del punto base el incremento $\Delta\lambda$, calculable por la segunda fórmula de las establecidas arriba.

Con objeto de que los ingenieros que van a construir los monumentos que marcarán el Trópico de Cáncer tengan los datos necesarios para la localización de los lugares respectivos, se ha formado la Tabla I en que se consignan los resultados correspondientes a las estaciones astro-

TABLA II.—RESUMEN DE LOS RESULTADOS Y DATOS PARA LOCALIZAR
LOS PUNTOS DE CRUCE

Carre- tera	Kil. de Ref.	Dist. al Cruce	Coordenadas Finales		
			Latitud	Longitud	Altitud
1	136	-345 m	$23^{\circ}27'00''.00$	$109^{\circ}40'21''.28$	200 m
2	21	+410 m	$23^{\circ}27'00''.00$	$106^{\circ}28'12''.30$	55 m
3	218	+125 m	$23^{\circ}27'00''.00$	$105^{\circ}50'37''.90$	1700 m
4	20	-255 m	$23^{\circ}27'00''.00$	$103^{\circ}04'04''.65$	2172 m
5	18	+154 m	$23^{\circ}27'00''.00$	$102^{\circ}56'57''.49$	2014 m
6	79	-339 m	$23^{\circ}27'00''.00$	$102^{\circ}11'17''.70$	1958 m
7	167	+565 m	$23^{\circ}27'00''.00$	$100^{\circ}37'36''.50$	1520 m
8	117	-265 m	$23^{\circ}27'00''.00$	$99^{\circ}22'08''.20$	680 m
9	190	-194 m	$23^{\circ}27'00''.00$	$98^{\circ}58'20''.94$	270 m
10	103	+352 m	$23^{\circ}27'00''.00$	$97^{\circ}59'45''.17$	70 m

nómicas de base y las marcas kilométricas de donde deben partir así como las distancias que se medirán sobre la carretera y la Tabla II para localizar los puntos de cruce. El signo que precede a las distancias indica cuando ésta debe medirse en el sentido creciente del kilometraje (+) o en sentido decreciente (-). Dentro de la precisión con que se han fijado estos puntos, puede elegirse el lugar que más convenga al arquitecto o constructor, en un radio de 20 o 50 metros del punto calculado.