“NAVEGACIÓN LOXODROMICA”

Ref.: "Manual de Navegación", Pub. SHOA 3030, ed. 2012

I.- DEFINICIONES Y ASPECTOS PRELIMINARES

Según sea la derrota que siga un buque para trasladarse de un punto a otro, la navegación puede ser:

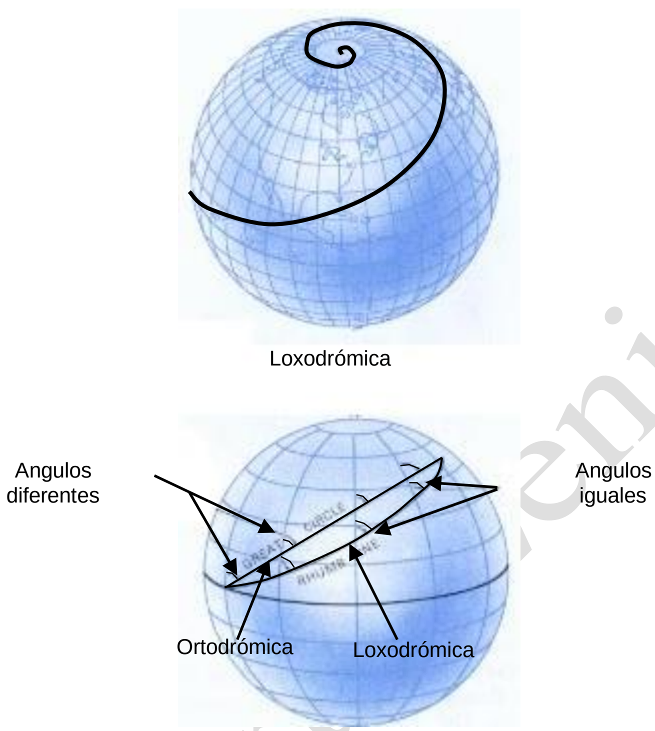


Fig. N° 1 “Comparación de ortodrómica con loxodrómica”.

A.- **LOXODRÓMICA** o línea de rumbo:

Es una curva helicoidal trazada en la esfera terrestre y que corta a los meridianos bajo un mismo ángulo. En la Carta Mercátor se representa como una línea recta y en la Gnomónica como una curva con la concavidad hacia el polo elevado. Al seguir una loxodrómica el buque gobierna a un mismo rumbo.

B.- **ORTODRÓMICA**.

Es el arco de círculo máximo que une dos puntos, siendo la distancia más cercana entre ellos. Excepto en el caso de que ambos puntos se hallen en el Ecuador, la ortodrómica corta los meridianos según ángulos diversos. En la carta Gnomónica se representa como una línea recta y en la Mercátor por una curva con su concavidad hacia el Ecuador.

Los meridianos en una carta de proyección Mercátor, están dibujados paralelamente entre sí. Luego si se unen por una recta dos puntos situados en una de esas cartas, la línea que los une formará ángulos iguales con los meridianos y como este ángulo resulta que también es el rumbo, se tendrá la ventaja al navegar siguiendo una línea que la dirección de la proa será la misma durante toda la travesía. La línea de rumbo así trazada se le llamará **loxodrómica**.

Pero la realidad es que, los meridianos convergen hacia los polos; luego al mantener el valor del ángulo de rumbo en la tierra, la loxodrómica irá avanzando en espiral alrededor ésta hacia el Polo sin seguir el círculo máximo excepto aquellas cuyos rumbos sean 000º - 090º - 180º - 270º, pero nunca llegarían a coincidir con el Polo y como la distancia más corta entre dos puntos de la esfera terrestre es el arco de círculo máximo que pasa por ellos, resulta que la loxodrómica no es la distancia mas corta.

Esto en distancias pequeñas, no es un inconveniente. Siendo el compás el único medio para llevar el rumbo, la loxodrómica es el mas cómodo método de navegación. Si navega el buque por el círculo máximo que une el punto de salida por el de llegada, se dirá que se navega por la **ortodrómica** y en ese caso el buque hace su recorrido por el camino más corto, pero la dirección de su proa formará ángulos desiguales con los meridianos; lo que obligará a realizar continuos cambios de rumbos.

I.- LOXODRÓMICA

En la figura Nº 2, "A" es el punto de salida y "B" el de llegada, la curva ACDEB es la loxodrómica entre los dos puntos, luego los ángulos en A-C-D-E-B son iguales y es el Rumbo Loxodrómico entre A y B.

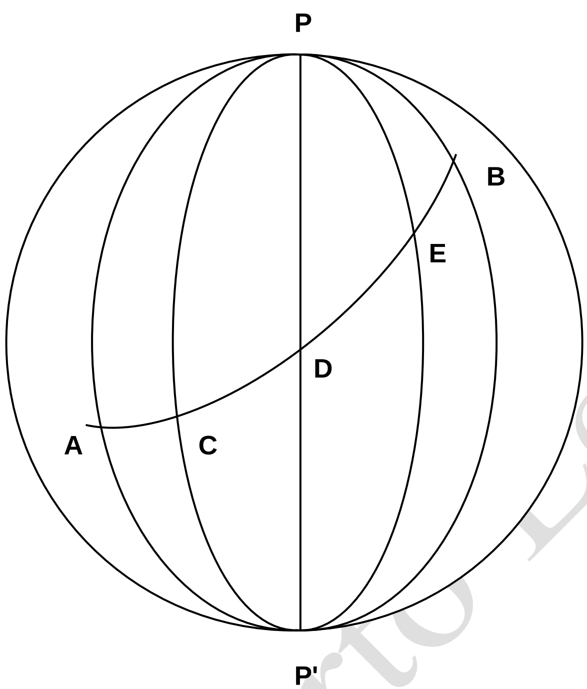


Fig. N° 2 (“Trazado de una ruta Loxodrómica”)

La magnitud de la curva entre A y B se llama "**Distancia Loxodrómica**" y se expresa en millas. La navegación por loxodrómica puede llevarse "**gráficamente**" en las cartas de proyección Mercátor; o bien por el cálculo mediante las "**Fórmulas de Estima**".

Recordar que para fines de navegación, la superficie de la tierra se considera plana hasta **600 millas**, siempre que no se sobrepase latitudes mayores de 60º.

B.- METODO ANALÍTICO DE ESTIMA

Para la estima analítico, usando las **fórmulas de estima.**

La posición de un buque en la mar la determina las coordenadas del punto y la situación estimadas se deducen, tomando otro punto como apoyo. Si a este punto de apoyo le aplicamos la "**diferencia en latitud y longitud**", determinadas por las fórmulas de estima, tendremos la situación estimada de la nave.

Fórmulas de Estima

Posición estimada Le - Ge + **Rumbo / demarcación y distancia** → **Situación estimada Lll - Gll**

Fig. N° 3 (“Fórmulas de estima Ps + Rv/Dem y dist. = Pll”)

Del mismo modo conociendo las coordenadas de salida y de llegada, se puede calcular el rumbo y distancia a navegar.

Fórmulas de Estima

Posición salida Ls - Gs → **Coordenadas de llegada. Lll - Gll** → **Rumbo y Distancia a navegar.**

Fig. N° 4 (“Fórmulas de estima Ps – Pll = Rv/Dem y dist.”)

1.- **Caso Uno “Cálculo del punto de llegada”**

Conociendo las coordenadas del punto de salida, y los diferentes rumbos y distancia navegadas, podremos conocer la situación estimada, mediante el siguiente método:

a.- **Determinación de diferencia de latitud. (g)**

Se considera el buque al centro de un círculo plano, llamado **horizonte**. Si este buque navega una **DISTANCIA (D)** en millas náuticas a un Rumbo cualquiera, cambia su latitud en una cantidad que es igual al **<u>Coseno del Rumbo</u>** multiplicada por **la distancia navegada** el resultado es la diferencia de latitud entre el pto. de salida y el de llegada.

l = D x Cos(Rumbo)	Si l > 0 signo "N" ; Si l < 0 signo "S"

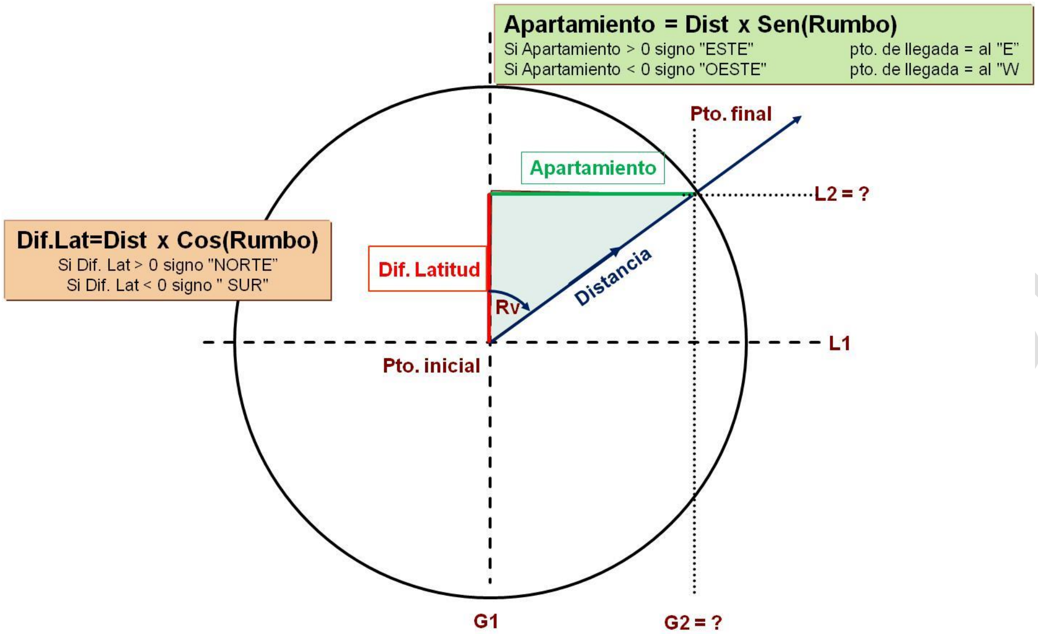


Fig. Nº 5 (“Gráfico conceptual de las fórmulas de estima.”)

b.- **Determinación del Apartamiento (Ap)**

Al navegar una determinada distancia a lo largo de un paralelo de latitud, esta es igual al **<u>Seno del Rumbo</u>**. Esa distancia es la que separa al Meridiano de salida del de llegada.

Ap = D x Sen(Rumbo)	Si Ap. > 0 signo "E" (Pto. de llegada = al "E"); Si Ap. < 0 signo "W" (Pto. de llegada = al "W)

<u>Recordar que Ap es diferente a g.</u>

c.- **Diferencia de Longitud (g).**

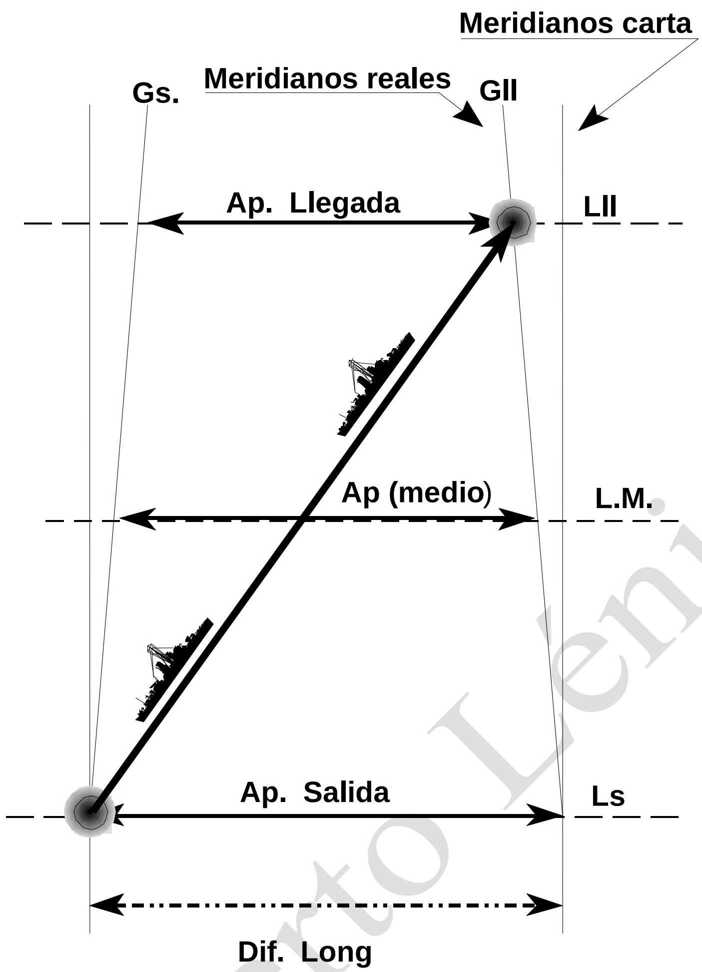
“g” se puede obtener:

1.- Conociendo las longitudes de salida y llegada, materia tratada en el capítulo “Coordenadas geográficas”. (g = Gll – Gs)

2.- **DIVIDIENDO EL APARTAMIENTO POR EL COSENO DE LA LATITUD SOBRE EL CUAL SE HACE EFECTIVO EL APARTAMIENTO.** Sin embargo, cabe preguntar ¿a lo largo de qué paralelo de latitud se mide la distancia entre el meridiano de salida y el de llegada? La respuesta la tendremos con la Latitud Media.

d.- **Latitud Media**

Cuando un buque navega a un rumbo distinto a 090º/270º, se obtienen dos apartamentos distintos. Primero entre el meridiano pto. salida y el de llegada medido en el paralelo de **salida**. Segundo entre el meridiano pto. salida y el de llegada medido en el paralelo de **llegada**.



RECORDAR QUE

Ap = g x Cos(Lat)

Sin embargo la diferencia de longitud se mantiene constante entre ambos meridianos.

La distancia efectiva entre dos lugares entre meridianos será empleando el valor de la **LATITUD MEDIA (LM)**. no se comete error apreciable en distancias menores de 600 millas náuticas, se considera como tal, al término medio de ambas latitudes

Fig. Nº 6 (“Gráfico de Latitud Media.”)

LM =	$\frac{Ls + Lll}{2}$
Ap =	**g x Cos (LM)**
g =	$\frac{Ap}{Cos\ (LM)}$

2.- **Caso Dos “Calcular la distancia y la dirección entre dos puntos conocidos”** a.- **Distancia (D).**

Para calcular la **distancia** se debe conocer las coordenadas geográficas de ambos puntos. Por lo tanto se podrá calcular “**g**” y con ella “**ap**”. Por otro lado se conocerá fácilmente “**l**”. Con estos datos se obtendrá la hipotenusa del triángulo de la Figura N° 5, cuyos catetos son la “**l**” y “**Ap**”.

Por lo tanto, la distancia se puede obtener mediante la fórmula de Pitágoras:

$$\boxed{D^2 = l^2 + Ap^2}$$

b.- **Dirección entre dos puntos geográficos.**

Conociendo:

- La distancia entre el meridiano de llegada y el de salida, medido a lo largo de un paralelo de latitud **(Ap)**.
- La distancia entre el paralelo de llegada y el de salida (**l = Ll – Ls) en minutos.**
- La distancia entre el lugar de salida y llegada **(D)**.

El rumbo se puede obtener en términos de 000º a 360º aplicando la siguiente fórmula:

$$\boxed{\text{Rumbo} = 2 \times \text{Arctag}\left(\frac{Ap}{l + D}\right)}$$

NOTA:

1) Para emplear esta fórmula se debe respetar los signos: "W" y "S" = (-).
2) En caso que se obtenga un resultado negativo sumar 360º.

Síntesis para loxodrómicas menores de 600 millas.

Caso Uno
"Determinar Pto de llegada conociendo Ls, Gs, Rv y Dv."
1.- l = D x Cos (Rv) ("l" en minutos o millas).
2.- Lll = Ls + l ("Ls" y "l" en grados y minutos).
3.- Ap = D x Sen (Rv) ("Ap" y "D" en millas).
4.- LM = (Ls + Lll) / 2 ("Ls" y "Lll" en grados y minutos).
5.- g = Ap / Cos (LM) ("g" en minutos y "Ap" en millas).
6.- Gll = Gs + g ("Gs" y "g" en grados y minutos).
Caso Dos
"Determinar Dirección y Distancia entre dos puntos conocidos".
1.- l = Lll – Ls ("l" en minutos o millas con su signo).
2.- LM = (Ls + Lll) / 2 ("LM" en grados y décimas de grado).
3.- g = Gll – Gs ("g" en minutos con su signo).
4.- Ap = g x Cos (LM) ("Ap" en millas con su signo).
5.- $D^2 = l^2 + Ap^2$ ("D" en millas).
6.- Rv = 2 x arctg (Ap/(l + D)) ("Rv" en grados).

II.- LOXODRÓMICAS MAYORES DE 600 MILLAS

En los párrafos anteriores se analizó la solución de todos los problemas con respecto a la loxodrómicas menor de 600 millas, donde se emplean las fórmulas de estima. De estas fórmulas, la fórmula **Ap = g x Cos (LM),** no es exacta cuando la distancia navegada es mayor de 600 millas.

Las fórmulas da un error probable de 1% cuando la diferencia en latitud es pequeña; se agranda con el aumento de ésta en especial en latitudes sobre 60°, y no debe emplearse cuando los lugares están en diferentes hemisferios muy separados en latitud.

Por otra parte, el principio en que se apoya la construcción de las cartas Mercátor permite calcular las loxodrómicas mayores de 600 millas sin que intervenga el "Ap".

En la siguiente figura representa una carta Mercátor, donde AB es la loxodrómica que une dos puntos de la carta. El Ángulo CAB es el rumbo.

Si en el triángulo ABC, los lados AC y CB están en las mismas unidades.

AC = Diferencia de latitudes aumentadas (la) entre A y C, se calculó con la siguiente fórmula:

Largo. meridiano = Latitud aumentada = 7915.704468 Log (TAN (45 + L / 2))
Fórmula considerando la tierra redonda

CB = Diferencia de longitud (g) entre C y B. "g" puede ser medida en la escala de longitud dando una cantidad que son minuto de ecuador;
Siendo:
Log = logaritmo es base 10

L = Latitud.

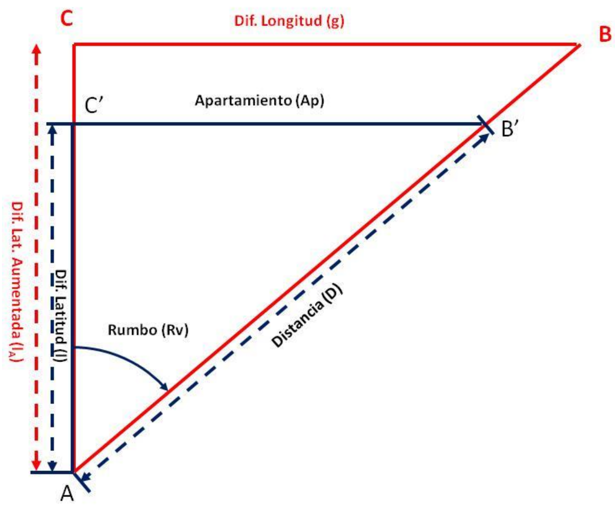


Fig. N° 7 ("Gráfico conceptual de las fórmulas de estima mayores de 600 millas.")

Del triángulo ABC se deduce:

$$\tan (Rv) = \frac{g}{la} \text{ es decir}$$

$$\boxed{\mathbf{g = la \times \tan (Rumbo)}}$$

Esta fórmula que se conoce con el nombre "**ecuación de la loxodrómica**", se usa para calcular el rumbo cuando la "distancia es mayor de 600 millas"

Una vez calculado el rumbo se aplica la fórmula de estima para obtener la Distancia.

$$\boxed{\mathbf{D = l \times Sec (Rumbo)}}$$

Ejemplo:
Calcular la loxodrómica (mayor de 600 millas) entre Valparaíso e Isla de Pascua.

Valparaíso L = 33º 02' S G = 71º 40' W
I. Pascua L = 27º 09' S G = 109º 26' W

Cálculo del Rv y D Loxodrómica.

la_1 (33º 02,0' S) = 2.101.9 S
la_2 (27º 09,0' S) = 1.693.6 S
la = 408,3' N

G_2	= 071º 40,0' W
G_1	= 109º 26,0' W
g	= 037° 46,0'
g	= 2.266.0 W

Rumbo	= **arctan (g / la)** = arctan (2.266,0 / 408.3')
Rumbo	= N 079,8° W
Rumbo	= 280,2°

L_1	=	33º 02,0' S
L_2	=	27º 09,0' S
l	=	5° 53,0' N
l	=	353' N

Distancia	=	**l / cos (Rumbo))** = 353' / cos (282,2°
Distancia	=	1.990,7 MN

Respuestas: Rumbo = 280.2º y Distancia 1.990.7 millas

2.- Calcular el punto estimado en distancias mayores de 600 millas

En las fórmulas:

$$\tan (Rv) = \frac{g}{la} \qquad D = l / \cos Rv$$

Se ve que, en la segunda se conocen dos elementos, el Rv y D, luego se puede calcular la "diferencia de latitud" (l), la que combinada con la latitud de salida nos dará la estimada.

Conocida la latitud estimada podemos determinar la "diferencia de latitudes aumentadas" entre ellas y aplicar la "ecuación de la loxodrómica" para calcular la "diferencia en longitud" (g) que aplicada a la longitud de salida nos dará la estimada.

Ejemplo:
Un buque zarpa del puerto de Coquimbo en L = 29° 55,0' S, G = 71° 21,0' W. y navegó al Rv = 340° y una distancia de 950 millas. Se pide el Pe.

Cálculo Le

l = D x Cos Rv = 950 x cos (340°)
l = 892,7' N

l	= 14° 52,7' N		
Ls	= 29° 55',7 S	la_1 (salida)	= 1.883,41 S
Le	= 15° 02',3 S	la_2 (estimada)	= 912,84 S
		la	= 970,57 N

Cálculo Ge

g = la x tan Rv = 970.57' x tan (340º) = 353,3' W = 05° 53,3' W.
g = 05º 53,3' W
Gs = 71° 21,0' W
Ge = 77° 14,3' W

Resultado: Le = 15º 02,3° S Ge = 77º 14.3' W

Cuando el rumbo es cercano a 090º o 270º no debe usarse la ecuación de la loxodrómica, debido a que la función de la tangente varía muy rápidamente y un pequeño error en el Rumbo produce un gran error en el cálculo de "g". En estos casos debe emplearse la Latitud Media.

Síntesis (distancias mayores de 600 millas)

Caso Uno

"Determinar Pto de llegada conociendo L_s, G_s, Rv y Dv."

1.- l = D x Cos (Rv) ("l" en minutos o millas).
2.- $L_{ll} = L_s + l$ ("Ls" y "l" en grados y minutos).
3.- la_{ll} = 7915.704468 Log (tan (45° + L_{ll} / 2)) ("L_{ll}" en grados)
4.- la_s = 7915.704468 Log (tan (45° + L_s / 2)) ("L_s" en grados)
5.- $la = la_{ll} - la_s$ ("la" en minutos con su signo).
6.- g = la x tan Rv ("g", si Rv mayor de 180° signo W (-)).
7.- $G_{ll} = G_s + g$ ("Gs" y "g" en grados y minutos).

Caso Dos

"Determinar dirección y distancia entre dos puntos conocidos".

1.- $l = L_{ll} – L_s$ ("l" en minutos o millas con su signo).
2.- LM = ($L_s + L_{ll}$) / 2 ("LM" en grados y décimas de grado).
3.- la_{ll} = 7915.704468 Log (tan (45° + L_{ll} / 2)) ("L_{ll}" en grados)
4.- la_s = 7915.704468 Log (tan (45° + L_s / 2)) ("L_s" en grados)
5.- $la = la_{ll} - la_s$ ("la" en minutos con su signo).
6.- $g = G_{ll} - G_s$
7.- tg (Rv) = g / la ("g" y "la" en minutos, ambos con signo). Resultado en cuadrantal signo de "g" y de "la"
8.- D = l/ cos Rv ("D" en millas y "l" en minutos).

Ejercicios de loxodrómicas mayores de 600 millas

1.- Calcular el punto de llegada si Ls = 14° 11.5' N y Gs = 48° 30' W, siendo Rv = 293° y D = 1.879 millas.

Respuesta: L = 26°25,7' N y G = 79° 18,5' W

2.- Calcular la dirección y distancia entre los siguientes puntos:
P1: L1 = 33° 16’ S y G1 = 71° 43’ W.
P2: L2 = 25° 10’ S y G2 = 84° 03’ W.

Respuesta: Dirección = 307° y distancia = 808,29 millas

3.- Su buque se encuentra el L = 00° 13’ N y G = 139°15’ E. Calcular el punto estimado si navega al Rv = 233° y una distancia de 1.500 millas.

Respuesta: L = 14°49.7' S y G = 119° 38.1' E