

# DE ORCHILLA A FINISTERRE:

Medida da circunferencia da Terra  
segundo o Experimento de Eratóstenes  
(século III a. C.)



MUSEO  
DE LA  
CIENCIA Y  
EL COSMOS

ORGANISMO  
AUTÓNOMO DE  
MUSEOS Y CENTROS



FECYT

$E=mc^2$   
Núcleo Científico Galés



**Edita:**

Museo de la Ciencia y el Cosmos (MCC). Organismo Autónomo de Museos y Centros. Cabildo de Tenerife. Fecyt 2008. Ministerio de Educación y Ciencia.

**Redacción:**

Oswaldo González Sánchez (MCC) Rubén Naveros Naveiras (MCC)  
Coordinación Museos Científicos Coruñeses:

Marcos Pérez Maldonado

Coordinación Museo de la Ciencia y el Cosmos de Tenerife:

Oswaldo González Sánchez (MCC) Rubén Naveros Naveiras (MCC)

**Ilustracións:**

Inés Bonet Márquez

Maquetación:

Gotzon Cañada

Fotografías:

Oswaldo González Sánchez. Rubén Naveros Naveiras

Imaxes aéreas:

Google Earth

Cartografía

**Agradecementos:**

Carmen del Puerto Varela

María José Alemán Bastarrica

Museo de Historia y Antropología

Javier Sánchez Portero

Arantxa Ansuategui

Cosmoeduca

**Impresión:**

**Depósito Legal:**

© Organismo Autónomo de Museos y Centros. Cabildo Insular de Tenerife

**[www.museosdetenerife.org](http://www.museosdetenerife.org)**



# DE ORCHILLA A FINISTERRE:

## Medida da circunferencia da Terra segundo o experimento de Eratóstenes (século III a. C.)

Hoxe en día ninguén dubida que a Terra sexa redonda. Máis achatada polos polos que polo ecuador. Cun diámetro de 12.756 km. Que vira sobre si mesma, dando lugar ao movemento aparente das estrelas no ceo. Que se move ao redor do Sol nunha órbita lixeiramente elíptica. Coñecemento herdado, baseado nas observacións e en cálculos de científicos e astrónomos desde a antigüidade, algúns deles son moi sinxelos e pódense chegar a repetir cun pouco de paciencia.



### POR QUE A TERRA NON É PLANA?

Imaxinemos por un momento que somos como eses primeiros científicos, nunha época na que a mitoloxía daba unha sinxela solución a calquera dúbida complicada. Como saberíamos que a Terra non é plana? Que forma ten o planeta onde vivimos? Cal é o seu tamaño?



Medida da circunferencia da Terra segundo o experimento de Eratóstenes (século III a. C.)

DE ORCHILLA A FINISTERRE:

3



As primeiras ideas sobre a forma do noso planeta relatan unha Terra plana nun disco que flotaba nas augas dun enorme océano, contido nunha esfera celeste. O que parece coincidir coa observación, pero que sostén á Terra? A Terra era soportada sobre grandes elefantes, os cales á súa vez, estaban situados sobre o coiraza dunha tartaruga xigante. O movemento diario das estrelas, o Sol e a Lúa estaban en mans dos deuses. Evidente, non?

Cun pouco de atención e mediante a observación, podemos aventurar a forma do noso planeta, como o fixo Anaximandro de Mileto na Grecia clásica. Anaximandro reflexionou sobre un fenómeno celeste que describían os navegantes. A medida que se dirixían cara ao Sur, decatáronse de que aparecían novas estrelas que antes non viran, á vez que ían desaparecendo as situadas máis ao norte. Isto non podía ocorrer nunha Terra plana, pero e se estivese curvada?



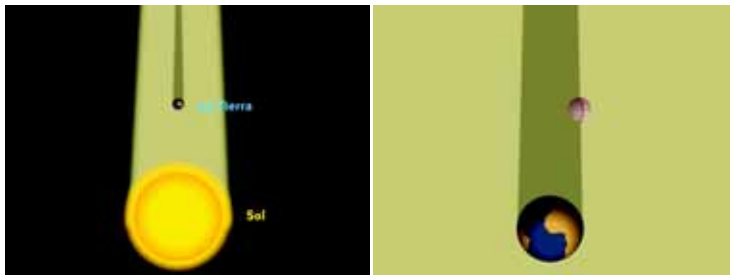
Posteriormente tomouse conciencia de que os barcos que saen de porto, van desaparecendo de forma gradual, primeiro o casco e para rematar as velas máis altas. E como ademais isto ocorre independentemente da dirección que leven, foi gañando crédito a idea dunha Terra esférica.



*Se tes uns prismáticos e estás nas proximidades dun porto, poderás observar cando un barco se afasta de nós, que primeiro desaparece o casco e finalmente a parte máis alta das súas velas, insinuándonos a curvatura do noso planeta.*

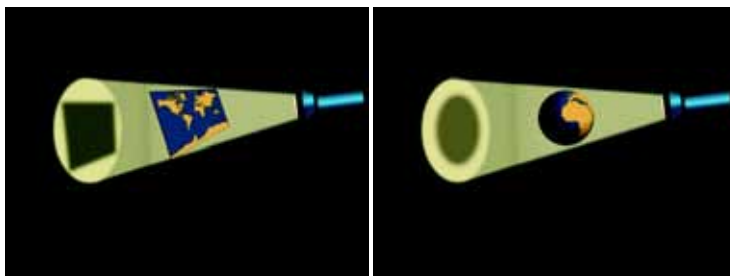


Outra proba que nos indica a forma da Terra, sucede durante unha eclipse de Lúa. Este ocorre cando o noso satélite, a Lúa, no seu movemento ao redor da Terra, mergúllase dentro da sombra que proxecta ao espazo o noso planeta.



Pero, como é a sombra do noso planeta?

Se iluminamos cunha lanterna unha Terra plana ou esférica, proxectará unha sombra no espazo de forma rectangular ou circular.



No transcurso dunha eclipse de Lúa, podemos observar, que a Lúa aos poucos, vaise introducindo na sombra da Terra e esta sombra ten forma circular, o cal é un indicio da esfericidade da Terra.



Medida da circunferencia da Terra  
segundo o experimento de Eratóstenes (século III a. C.)

**DE ORCHILLA A FINISTERRE:**

5





*Nesta secuencia de imaxes dunha eclipse total de Lúa, podemos apreciar o tamaño que ten a sombra da Terra á distancia á que está o noso satélite, ademais da forma da devandita sombra no espazo.*

Aristóteles deixou constancia desta observación. Constatou que nas eclipses de Lúa, a sombra da Terra se proxecta sobre a superficie lunar mostrándonos a súa forma, e esta sempre é un arco de circunferencia. Algo que non podería ocorrer se a Terra non fose esférica.



Quedaba claro que a Terra era esférica pero, que tamaño tería esta esfera?

Tratemos de comprender primeiro como funciona o movemento da Terra, porque a Terra se move!

## O MOVEMENTO DO CEO

Seguramente te deches conta, ao observar durante a noite o firmamento, que as estrelas móvense a medida que pasan as horas, igual que o fai a Lúa, ou ata o Sol durante o día. Este movemento é só aparente, realmente todos estes astros non viran ao redor da Terra como se pensaba antigamente, senón que é o noso planeta o que está virando lentamente sobre si mesmo, como unha buxaina. Ao vivir nós sobre a súa superficie, o que percibimos é que todos os astros saen polo horizonte Leste e se ocultan polo horizonte Oeste. A este movemento chamámolo “rotación” e non é sinxelo de apreciar. Moitos museos teñen un experimento chamado “péndulo de Foucault” que demostra a rotación da Terra. Podes ver máis sobre este tema ao final da unidade.



*Péndulo de Foucault na Casa das Ciencias da Coruña.*

Podemos facer outra observación interesante, coñecida desde a época neolítica e que ocorre ao longo dun ano.



*Cromlech no Museo da Ciencia e o Cosmos de Tenerife*



Medida da circunferencia da Terra segundo o experimento de Eratóstenes (século III a. C.)

**DE ORCHILLA A FINISTERRE:**

7





Medida da circunferencia da Terra  
segundo o experimento de Eratóstenes (século III a. C.)

## DE ORCHILLA A FINISTERRE:

∞



Se observas a posición do Sol no ocaso, notarás que non sempre o fai polo mesmo lugar, senón que este vai cambiando co transcurso dos días. Se observas o 21 de marzo (equinoccio de primavera), o día que comeza a estación da primavera, verás que o Sol sae polo punto cardinal Leste e se oculta exactamente polo punto cardinal Oeste, tendo a mesma duración o día que a noite.



*Nos equinoccios de primavera e de outono, o día ten a mesma duración que a noite. O Sol sae exactamente polo punto cardinal Leste e ocúltase polo punto cardinal Oeste.*

A partir dese día, o Sol irase ocultando cada vez máis cara ao Norte, ata que esta peregrinaxe do Sol á posta para uns tres meses despois, o 21 de xuño, o día do solsticio de verán (solsticio significa “Sol parado”). Ese día o Sol ocúltase entre o Norte e o Oeste, e permanece moito máis tempo sobre o horizonte que por baixo del, ademais pasa moi alto no ceo.

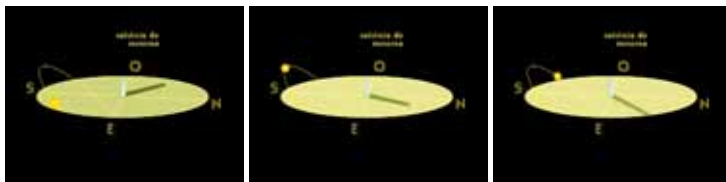


*No solsticio de verán, o día ten unha duración moito máis larga que a noite. O Sol non sae polos puntos cardinais, senón entre eles.*

A medida que pasan os días, o punto por onde se oculta o Sol irase desprazando máis e máis cara ao Sur, pasando de novo polo Oeste o 22 de setembro (equinoccio de outono), e

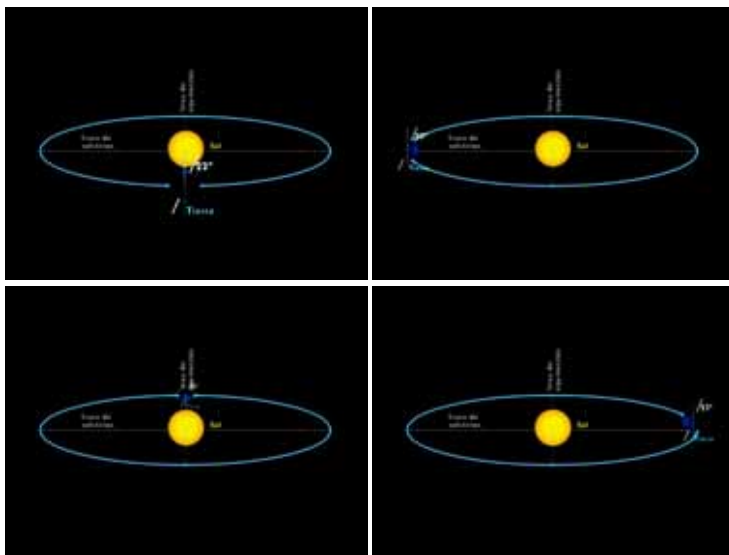


continuando esta viaxe ata o 21 de decembro, solsticio de inverno, día no que o Sol se oculta entre o Oeste e o Sur, non alcanza moita altura e permanece menos tempo sobre o horizonte que por baixo del, é dicir, o día é moito máis curto que a noite.



*No solsticio de inverno, o día ten unha duración moito máis curta que a noite, e o Sol non sae polos puntos cardinais, senón entre eles.*

Este movemento aparente do Sol polo horizonte é, en realidade, consecuencia do lento movemento da Terra ao redor da nosa estrela, o Sol, chamado movemento “anuo” ou de translación (que determina a duración do ano) e tamén do eixo de inclinación do noso planeta. Eixo de inclinación?



Medida da circunferencia da Terra segundo o experimento de Eratóstenes (século III a. C.)

## DE ORCHILLA A FINISTERRE:

9



Na imaxe notarás que o eixo “imaxinario” de rotación da Terra, está inclinado uns  $23^\circ$  sobre a perpendicular do plano no que se move o noso planeta, apuntando sempre a un mesmo punto do ceo, o polo norte celeste (ou o polo sur celeste se estamos no hemisferio sur). Na actualidade, o polo norte celeste atópase nas proximidades dunha estrela relativamente brillante chamada “Polaris” ou estrela Polar, que indica a posición sobre o horizonte do punto cardinal Norte.



Esta inclinación que, aparentemente non ten importancia, é de gran transcendencia. Dependendo da cantidade de horas que permaneza o Sol sobre o horizonte, quentará máis durante uns meses que noutros. Esta inclinación xa que logo, é a que orixina a existencia das estacións.

Curiosamente, a comezos de Xaneiro, a Terra atópase na parte da súa órbita máis próxima ao Sol e no canto de facer calor fai frío no hemisferio norte, o que indica que as estacións non dependen da maior ou menor distancia do noso planeta ao Sol senón, como aprendemos, da inclinación do eixo de rotación da Terra.



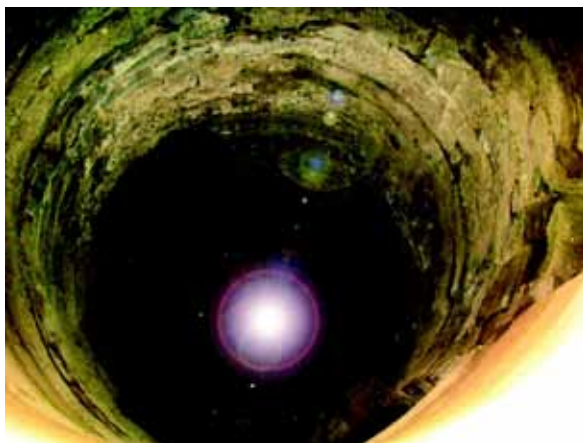
## EL EXPERIMENTO DE ERATÓSTENES

A primeira medida do tamaño do noso planeta foi realizada dunha forma moi sinxela por un dos directores máis importantes da Biblioteca de Alexandría, Eratóstenes de Cirene. Naceu no ano 273 a.C. na cidade Libia de Cirene. Educado por unha rica familia, tivo unha magnífica educación en Atenas, onde coñeceu ao seu gran amigo Arquímedes. Foi nomeado director do maior centro cultural e científico do mundo, a Biblioteca de Alexandría (Exipto), cargo que ocupou durante un período de máis de 40 anos.

Nun pergamiño que atopou na súa biblioteca, Eratóstenes leu acerca dun fenómeno curioso que ocorría nun lugar chamado Siena (na actualidade chamada Asuán, en Exipto). Na devandita cidade existían uns pozos moi profundos que conectaban co río Nilo, e que servían para medir a altura que alcanzaba as súas augas. Estes pozos, chamados “Nilómetros”, permitían calcular as crecidas periódicas que se producen neste río e que provocaban grandes inundacións do terreo. No

pergamiño relatábase que no solsticio de verán (é dicir, o día máis longo do ano e no que o Sol percorre un camiño moi alto no ceo), xusto á

hora do mediodía, os raios do Sol caían verticalmente no interior do nilómetro puidéndose ver o reflexo do Sol nas augas profundas do pozo. Isto só podía significar que o Sol pasaba xusto polo cénit, o punto máis alto do ceo, e os obeliscos non proxectaban ningún tipo de sombra.



Medida da circunferencia da Terra segundo o experimento de Eratóstenes (século III a. C.)





Medida da circunferencia da Terra segundo o experimento de Eratóstenes (século III a. C.)



*Nunha Terra plana, a lonxitude da sombra de dous obxectos coas mesmas dimensións, serán iguais.*

## DE ORCHILLA A FINISTERRE:

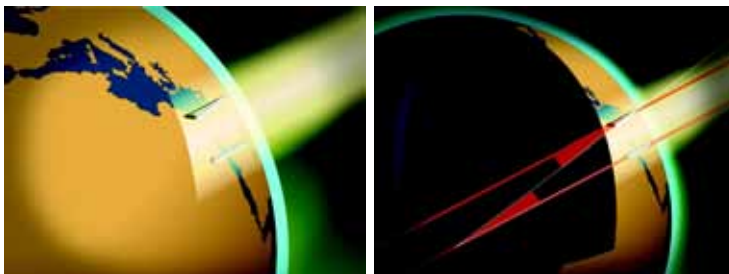
12

Como bo científico, Eratóstenes comprobou os datos cravando unha vara no chan de Alexandría o mesmo día que relataba o pergamiño, o día do solsticio, e observou que aínda que pequena, dita vara proxectaba unha sombra perfectamente medible, algo que ao parecer non ocorría en Asuán. Eratóstenes xa sabía que a Terra non era plana, se fose así, a sombra proxectada por ambas as varas aínda en puntos afastados da Terra terían o mesmo tamaño. Aproveitando a diferenza de tamaño existente nas sombras dun mesmo obxecto, en dous lugares diferentes, ocorréselle un sinxelo pero efectivo método para calcular o perímetro do planeta.

Eratóstenes pagou ao xefe dunha caravana para que na súa viaxe cara a Asuán, medise a distancia existente entre Alexandría (desde onde partía a caravana) e a cidade de Asuán, situada ao Sur da primeira. Mediu a sombra que proxectaba unha vara que estivese perfectamente vertical en Alexandría, e determinou que o ángulo que formaba o Sol con respecto ao cénit era dun  $7,2^\circ$ . Como sabía que en Asuán, a mesma vara non formaba sombra algunha, a luz de Sol debía chegar perfectamente perpendicular á superficie.



Eratóstenes determinou que a diferenza angular entre a posición do Sol en ambas as cidades era de  $7,2^\circ$ . Ansioso, esperou a que chegase a caravana de volta co resultado da medida encargada, é dicir a distancia entre as dúas cidades, que resultou ser duns 5000 estadios aproximadamente, unidade de medida utilizada na época. Automaticamente xa tiña na súa cabeza as dimensións do noso planeta.



*Os raios solares que caen perpendiculares sobre Assuán fano de forma oblicua en Alexandría, formando un ángulo de  $7,2^\circ$  sobre a vertical. O mesmo ángulo co que veriamos separado ambas as cidades desde o centro da Terra.*

Realizou unha sinxela regra de tres: se en  $7,2^\circ$  de diferenza que existe entre os dous observatorios correspóndelle 5000 estadios, entón nunha circunferencia con  $360^\circ$ , corresponderalle:

$$X = \frac{360^\circ * 5000}{7,2^\circ} = 250.000 \text{ estadios}$$

Como cada estadio equivale a 157,5 metros, calculou que a circunferencia da Terra era de 39.375 km. Por fin, se obtivo a primeira medida científica do tamaño do noso planeta, medindo a sombra dunha simple vara.

A medida obtida por Eratóstenes era a do perímetro terrestre que pasa por ambos os polos. Hai que especificar que o noso planeta non é perfectamente esférico, senón que está levemente achatado polos polos, facendo que o perímetro polar sexa un pouco inferior ao perímetro polo ecuador. A medida real do perímetro polar é de 39.939 km. Só se equivocou en 564 km, é dicir menos dun 2% de erro. ¡Que resultado tan fantástico tendo en conta os medios cos que traballou para medir ángulos e distancias!



Medida da circunferencia da Terra segundo o experimento de Eratóstenes (século III a. C.)

**DE ORCHILLA A FINISTERRE:**

13



## DO FARO DE ORCHILLA Ao FARO DE FISTERRA

O experimento de Eratóstenes pódese reproducir con facilidade desde dous puntos distantes en latitude da xeografía española. Para a nosa experiencia eliximos Orchilla e Fisterra, enclaves cun significado histórico que foron, nun momento da historia, a fin do mundo coñecido.





O faro de Orchilla está situado na punta de Orchilla, na illa do Ferro, punto máis occidental das Illas Canarias e de España. Ata 1492, data da viaxe de Colón, pensábase que Orchilla era o final do mundo máis aló do cal só estaba o océano habitado por ferozes monstros mariños...En moitos mapas dos séculos XVI e XVII aparece o meridiano de Orchilla como “Meridiano cero”, punto de referencia mundial para a navegación. O meridiano de El Hierro foi un dos máis usados ata o cambio definitivo do mesmo á cidade de Greenwich no ano 1885. Este é o motivo, polo que a illa de El Hierro tamén é coñecida como Illa do Meridiano. O faro foi construído sobre devandito punto e comezou a funcionar en 1933 onde emitiu a súa primeira luz como guía para os navegantes rumbo a América.



Medida da circunferencia da Terra segundo o experimento de Eratóstenes (século III a. C.)

## DE ORCHILLA A FINISTERRE:

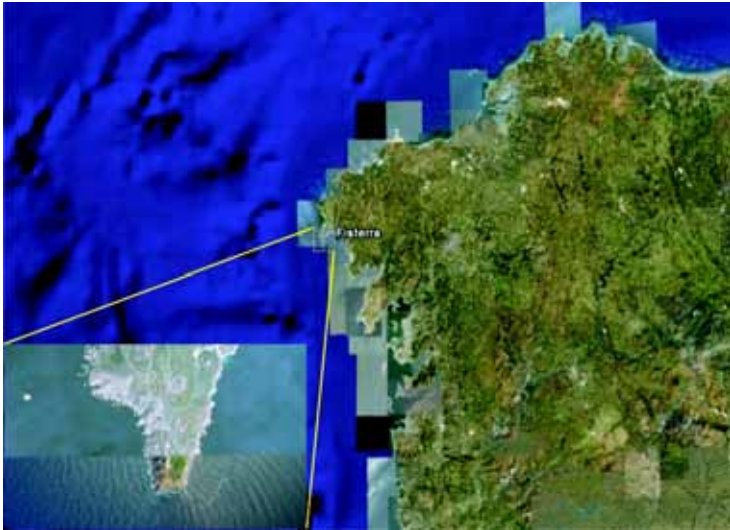
15



Medida da circunferencia da Terra  
segundo o experimento de Eratóstenes (século III a. C.)

## DE ORCHILLA A FINISTERRE:

16



O faro de Fisterra construíuse en 1868 na Costa da Morte, na comarca galega de Fisterra. As orixes desta rexión pérdense no tempo, pero pola súa singularidade xeográfica atraeu a atención dos xeógrafos e historiadores grecorromanos. Este punto foi considerado durante moito tempo “A Fin da Terra” coñecida, de aí provén o seu nome “Finis Terrae”, aquí localizaron os antigos esa última fronteira, o punto máis occidental do continente europeo (aínda que en realidade esta honra correspóndelle ao Cabo da Roca en Portugal).





## QUE FACER?

Nun lugar perfectamente horizontal colocaremos unha vara o suficientemente longa para producir unha sombra (entre 1 e 2 metros é suficiente, o pau dunha vasoira pódenos servir). A esta vara ímola a chamar “gnomon”, non importa que teñan diferentes tamaños, pois ao final o que queremos obter é un ángulo, o que si é importante é coñecer que dimensións ten o gnomon que utilizaremos.

Para colocar o gnomon perfectamente vertical sobre o chan, imos axudarnos dun trípode, ao que lle quitamos o seu cabezal, e introducimos nel a nosa vara. As patas do trípode servirán para manter o gnomon fixo no seu sitio. Axudarémonos dun nivel para situalo perfectamente vertical. Mediremos cun metro, a distancia que posúe a sombra do



noso gnomon, desde a base ata o extremo do mesmo. Isto farémolo no momento no que o Sol pasa o máis alto no ceo, que é ao mediodía, é dicir cando está no meridiano, (unha liña imaxinaria que pasa desde o punto cardinal Sur ata o Norte, pasando polo cénit, punto máis alto do ceo). Loxicamente sabendo a hora en que ocorre isto e mirando un reloxo, tardaríamos un instante en realizar a medida, pero isto é xogar con vantaxe. Eratóstenes non tiña un reloxo nin efemérides que lle predixesen o momento no que o Sol pasaba polo meridiano do lugar, así que marcou sobre o chan, o extremo da sombra cada certo tempo, observando como disminuía de tamaño, a medida que pasaba a mañá. Pola tarde observou que esta sombra aumentaba. O dato que necesitaba era a dimensión da sombra cando era máis pequena.



Medida da circunferencia da Terra segundo o experimento de Eratóstenes (século III a. C.)





*O momento do día no que o Sol está o máis alto sobre o horizonte, é ao mediodía, é dicir cando a sombra que proxecta un obxecto é a máis pequena.*

Unha vez calculado o tamaño da sombra, no momento en que esta é mínima (ao mediodía) temos que realizar un pequeno cálculo trigonométrico para calcular o ángulo que forma o Sol co cénit. Para iso necesitaremos saber a lonxitude do gnomon utilizado (se non deches aínda trigonometría pídelles ao teu profesor que che axude co cálculo).



$$\text{tang } \alpha = \frac{\text{longitud sombra}}{\text{longitud gnomon}}$$

Como realizamos a medida o mesmo día desde o Faro de Fisterra e o Faro de Orchilla, un máis ao norte que o outro, obteremos dúas medidas da sombra diferentes, e xa que logo dous ángulos distintos.



Simplemente calculando en canto difiren devanditos ángulos, teremos a diferenza angular dos dous observatorios visto desde o centro da Terra, é dicir, coñeceremos a diferenza existente entre a latitude de ambos os lugares.

Como fixo Eratóstenes para coñecer o perímetro da Terra realizaremos unha sinxela regra de tres, a condición de que coñezamos que distancia separa ambos os lugares. Este é un dato que non poderemos medir nós, a distancia entre os dous faros é moi grande, e ademais non nos serve a distancia entre Fisterra e Orchilla, non están na mesma lonxitude e necesitamos que un estea ao Sur do outro. Se usásemos a distancia existente entre Fisterra e Orchilla, está aumentaría ata os 1842 km. Eratóstenes cometeu este erro ao considerar que Asuán estaba xusto ao Sur de Alexandría.

Necesitamos a distancia entre, por exemplo, o faro de Orchilla e un punto no mar que está á mesma latitude que Fisterra pero no propio meridiano que Orchilla. Esa distancia é de **1683.6 km**.



Agora si que temos todas as ferramentas para calcular o perímetro da Terra. Coñecemos a diferenza angular entre os dous puntos de observación, (a diferenza das dúas medidas), e a distancia entre ambos os faros, nun mesmo meridiano (1683.6km)

Realizamos a nosa regra de tres onde chamamos ángulo, ao existente entre os dous observatorios. O perímetro da Terra P, será:

$$\frac{\text{ángulo}}{1683.6\text{km}} = \frac{360^\circ}{P} \qquad P = \frac{360 * 1683.6}{\text{ángulo}}$$

Poderías calcular o radio da Terra?, sabendo que o perímetro dunha circunferencia é igual a 2 R.



Medida da circunferencia da Terra segundo o experimento de Eratóstenes (século III a. C.)

## DE ORCHILLA A FINISTERRE:



## CURIOSIDADES

### O MAIOR ERRO DA HISTORIA

Un dos erros máis importantes da Historia foi o que cometeu Cristóbal Colón. Os sinxelos cálculos realizados por Eratóstenes para calcular o perímetro da Terra sufriron moitas modificacións ao longo do tempo. Colón baseouse no Atlas Catalán (1375) e no mapamundi de Fra Mauro (1459) que daban un tamaño á Terra de ata 10.000km inferior, para xustificar como posible a súa viaxe a Asia polo Oeste, convencendo aos Reis Católicos de que era posible esta aventura.

Cristóbal Colón estaba tan seguro de que as terras descubertas eran a súa Cipango (Xapón) e de que os seus cálculos eran correctos, que cando novas medicións as puxeron en dúbida, Colón dixo que “quizais a Terra non sexa esférica, senón que ten forma de pera: ancha por baixo e estreita por riba”. Foi Américo Vespuccio quen convenceu a todos de que o descuberto por Colón era un novo continente. Todo se debeu a un erro de cálculo.



### ERATÓSTENES ESTÁ NA LÚA

Os cráteres da Lúa reciben o nome de grandes científicos. Ao Sur do Mar das Choivas podemos atopar un cráter de 60 km. de diámetro que recibe o nome de “Eratóstenes”, en homenaxe a este ilustre científico.

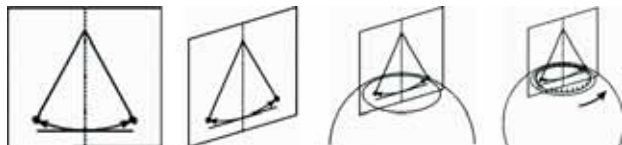
### ERROS DE ERATÓSTENES

Eratóstenes era consciente de que o cálculo da distancia era só aproximada. Equivocouse ao pensar que Siena (actual Asuán) está xusto ao Sur de Alexandría, cando a súa localización está lixeiramente ao Leste. Ademais, en Siena a sombra nos pozos non desaparece por completo. Tampouco sabía que a Terra é lixeiramente achatada.



## PÉNDULO DE FOUCAULT

Un péndulo, é unha masa suspendida por un cable que na súa oscilación queda incluído nun plano vertical e inmóbil.



A Terra onde se atopa este péndulo, non está inmóbil, senón que vira dando unha volta completa cada 24 horas. A medida que rota lentamente, dámonos conta do movemento terrestre xa que vira o plano de oscilación do péndulo. Para comprobar este movemento, dispónse na base do péndulo unhas testemuñas que, como consecuencia da rotación da Terra, serán derrubados.

## A VIAXE DO MERIDIANO CERO

Eratóstenes elaborou un mapa no que destacaba a presenza dun meridiano que transcorría sobre as cidades de Alexandría e Siena e que servía de referencia para a cartografía. Máis tarde, Ptolomeo situouno no Pico de Tenerife (o Teide), ao ser unha referencia bastante visible para os navíos en alta mar. Este punto de referencia tan preciso, como podía ser o ecuador para determinar a latitude, estivo simultaneamente en París, Berlín, Greenwich, Cádiz, Lisboa, Estocolmo, Nápoles, Pulkova, Río de Janeiro, Wáshington, Azores ou a illa canaria do Ferro, dependendo de quen o usase.

O 1 de outubro de 1884 reuníronse finalmente na cidade de Wáshington 41 delegados de 25 países, «co propósito de discutir e, se é posible, fixar un meridiano apropiado para ser empregado como un punto 0° común de lonxitude e estándar de cálculo de tempo en todo o mundo». Chegáronse a propor a Gran Pirámide, o estreito de Bering ou o Templo de Xerusalén, pero, finalmente, máis por motivos políticos que científicos, elixiuse Greenwich como “Meridiano cero”.



Medida da circunferencia da Terra segundo o experimento de Eratóstenes (século III a. C.)



