

CAPITULO XIII

DOBLE REFRACCION DE LA LUZ

I

FENÓMENOS DE DOBLE REFRACCION EN LOS CRISTALES DE UN EJE

Examinando Erasmo Bartholin, sabio médico danés que vivía en Copenhague á mediados del siglo XVII, ciertos cristales que un amigo suyo le había llevado de Islandia, se quedó muy sorprendido al ver que los objetos parecían duplicados cuando se los observaba al través de ellos. En 1669 advirtió tan singular fenómeno y describió en una Memoria especial todas sus circunstancias. Veinte años despues, Huygens se dedicaba de nuevo al estudio de lo que luégo se ha llamado *doble refraccion*, formulaba sus leyes, y establecía su teoría con arreglo á los principios del sistema de las ondulaciones, cuyos primeros cimientos había echado aquel grande hombre.

Desde el descubrimiento de Bartholin y las observaciones de Huygens (que reconoció la misma propiedad en el cuarzo) se han estudiado en todas sus fases los fenómenos de igual índole, formando hoy su conjunto toda una rama de la óptica. Antes de describir los principales, recordemos lo que ocurre cuando cae un haz de luz sobre la superficie de un medio transparente como el agua ó el vidrio.

Al llegar á la superficie, una parte del haz luminoso se refleja con regularidad, de modo que da una imágen del objeto del que emana, y otra porcion se refleja irregularmente en todos sentidos. Esto, en cuanto á la luz que vuelve sobre su paso, ó si se quiere, que cambia de curso sin cambiar de medio. La otra parte del rayo de luz penetra en la sustancia transparente, en la que se propaga sin variar de direccion si la incidencia es normal, ó donde se refracta, es decir se desvia, si el rayo cae oblicuamente sobre la superficie. Pero en ambos casos, el rayo continúa siendo simple, y lo es tambien cuando sale del medio transparente, de

suerte que el ojo que lo recibe ve una sola imágen del foco luminoso. A pesar de esto, no siempre sucede todo del modo descrito. Hay sustancias á través de las cuales procede un rayo de otra manera, pues se duplica y presenta, como Bartholin lo indicó por vez primera, dos imágenes del objeto en vez de una sola.

En los filones, en las calizas metamórficas y en las arcillas compactas se encuentra un mineral que cristaliza en romboedros sólidos de seis caras paralelógramas, muy trasparente, in-

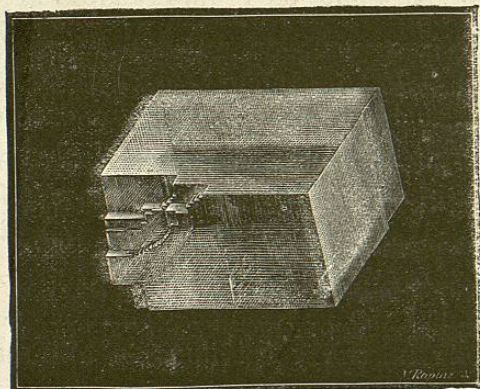


Fig. 146.—Fragmento de espato de Islandia

coloro, y cuya composición química le da á conocer como carbonato de cal con algunas partes de protóxido de manganeso. Los ejemplares más hermosos, que á veces tienen hasta diez centímetros de espesor, proceden de Islandia, por cuya razon se conoce el mineral de que hablamos con el nombre de *cristal ó espato de Islandia* (fig. 146).

Los cristales de esta clase se exfolian con la mayor facilidad en todas sus caras, de suerte que se les puede dar una forma rigurosamente geométrica, más cómoda para el estudio de sus propiedades ópticas, y entónces el romboedro se compone de seis losanjes iguales entre sí.

Cada uno de estos losanjes tiene dos ángulos obtusos de $101^{\circ} 55'$ y dos agudos de $78^{\circ} 5'$. Seis de los ocho ángulos sólidos que forman los vértices del cristal, se componen de otro

ángulo obtuso y de dos agudos: los otros dos de tres obtusos. Supongamos que se enlacen estos últimos con una recta; esta diagonal del romboedro es de gran importancia por lo que respecta á los fenómenos de que vamos á ocuparnos, y se llama *eje óptico* del cristal, por la causa que muy en breve veremos. (1)

Describamos ahora los fenómenos de doble refraccion, conforme se los puede observar fá-

cilmente con un trozo de espato de Islandia. Cojamos un pedazo de este cristal, pongámosle sobre una línea escrita ó impresa y mirando á través de él seremos testigos del fenómeno que tanto llamó la atencion de Bartholin: cada letra se habrá duplicado. Notemos además que cada imágen aislada es ménos negra que la letra misma; que ha tomado un color ceniciento, y que lo que prueba que esto no

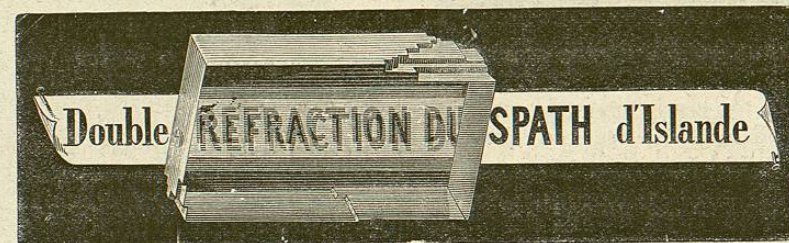


Fig. 147.—Imágenes dobles de objetos vistos al través de un cristal de espato de Islandia

depende de la absorcion de la luz por el cristal, es que dicho color se presenta negro allí donde están superpuestas las dos imágenes. Hasta las aristas del cristal vistas por refraccion parecen dobles, y una línea trazada en el papel se divide en otras dos paralelas. Dirijamos un haz de luz solar sobre una de las caras; el rayo luminoso sale duplicado y forma en una pantalla dos imágenes diferentes, cuya distancia depende de la inclinacion del rayo incidente sobre la cara del cristal.

Prosigamos adelante en el análisis del fenómeno, y para ello simplifiquemos el experimento, es decir, no examinemos más que un punto á la vez. Este punto, visto al través del cristal, parece doble. Demos al cristal una vuelta sobre sí mismo, en sentido paralelo á las caras de incidencia y de emergencia. ¿Qué veremos entónces?

Una de las imágenes gira alrededor de la otra, y cuando el cristal ha descrito una circunferencia entera, la imágen vuelve á colocarse en su posición primitiva, despues de describir un círculo alrededor de la otra imágen inmóvil.

Cuando en vez de observar un punto se ob-

serva una línea recta, se advierte que, en dos posiciones diferentes del cristal, una de las líneas, que parece moverse paralelamente á la otra, llega á una desviacion máxima; y que en otras dos posiciones, las imágenes parecen coincidir, coincidencia que es tan sólo aparente, porque si se ha marcado un punto en la línea observada, se ve la doble imágen de este punto, áun cuando las imágenes paralelas de las líneas estén superpuestas. En este caso como en el precedente, se verifica la rotacion de una de las imágenes alrededor de la otra.

Digamos desde luégo que se da el nombre de imágen *ordinaria* á la imágen inmóvil, y el de imágen *extraordinaria* á la que ejecuta su rotacion alrededor de la primera. La razon de

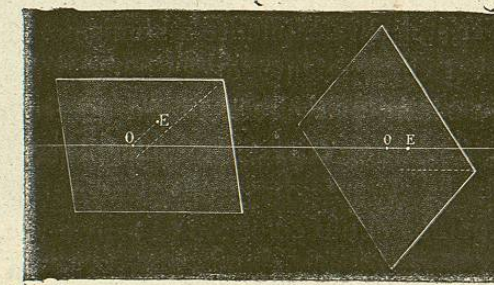


Fig. 148.—Posiciones de la imágen extraordinaria con respecto al plano de incidencia. Seccion principal

esto está en que el rayo refractado que produce la imágen inmóvil, sigue en su camino las leyes de la refraccion simple, tales cuales las han formulado Snellio y Descartes, al paso que

(1) No se debe considerar el eje óptico como una línea única. En un cristal hay tantos ejes que gozan de esta misma propiedad como líneas paralelas á la direccion de la diagonal del romboedro. En otros términos, aquí *eje* es sinónimo de direccion, y si se dice del espato de Islandia que es un *cristal de un eje*, consiste en que sólo hay una direccion respecto de la cual sea exacta la definicion anterior.

el otro rayo no obedece á las mismas leyes (1). Esta diferencia característica de las dos imágenes se puede poner en evidencia de muchos

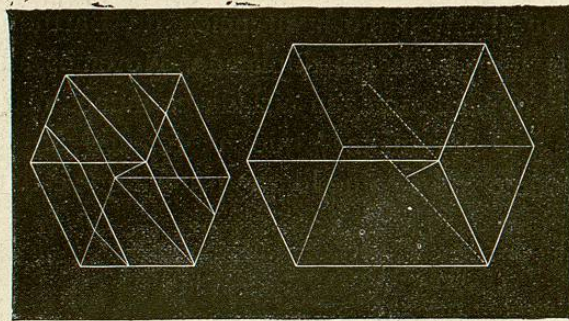


Fig. 149.—Secciones principales y eje óptico del espato de Islandia

modos. Hágase caer un rayo de luz perpendicularmente á una de las caras del cristal, y se bifurcará al penetrar en el interior; pero uno de los rayos seguirá la dirección del incidente y tampoco se refractará á su emergencia: este es el rayo ordinario, el que obedece á la ley de Descartes. El otro rayo se desviará de la dirección del incidente, á su entrada en el cristal y á su salida; es el rayo que producirá la imagen extraordinaria.

Cuando la incidencia es oblicua, los dos rayos se refractan; pero el ordinario se desvía también, cualquiera que sea la posición del cristal, con tal que las caras de incidencia y de emergencia conserven una dirección paralela á la primitiva; en una palabra, su curso es el que seguiría al través de un pedazo de cristal de caras paralelas. No sucede lo propio con el otro rayo, con el que motiva la imagen extraordinaria, puesto que, según hemos visto, esta imagen gira alrededor de la primera, si se da vueltas al cristal paralelamente á sí mismo.

En este movimiento de la imagen extraordinaria ocurre una circunstancia que conviene notar. Puesto el cristal sobre una hoja de papel en la cual se haya marcado un punto, supongamos el ojo colocado en el plano de incidencia. El rayo refractado ordinario estará también en este plano, como lo indica la ley de simple refracción, y la imagen ordinaria O del punto se hallará en la línea II del plano de in-

(1) En una palabra, por una parte, el rayo refractado extraordinario no se halla por lo común en el plano de incidencia; y por otra, la relación de los senos de los ángulos de incidencia y de refracción no permanece constante.

cidencia con el papel (fig. 149). Pero no sucederá así con la imagen extraordinaria E, y la línea que reúne las dos imágenes formará un ángulo con la II mencionada. Pero se observa que dicha línea OE continúa siempre paralela, durante el movimiento de rotación del cristal, á la bisectriz AD del ángulo obtuso de la cara paralela al plano del papel. Así es que cuando, á causa de dichos movimientos, la bisectriz se ha colocado paralelamente á II, la imagen extraordinaria misma se halla en esta línea, y los dos rayos refractados en el plano de incidencia.

Así pues, entre las secciones que cortan el cristal perpendicularmente á una de sus caras, hay otra sección tal, que si el rayo incidente está contenido en ella, el extraordinario obedecerá á la primera ley de simple refracción, exactamente como el otro rayo. Dase á este plano el nombre de *sección principal*. Todo plano perpendicular á una de las caras del espato de Islandia, y paralelo á la pequeña diagonal del losanje, ó á la bisectriz del ángulo obtuso, es una sección principal de esta cara.

Toda sección principal es paralela al eje óptico, y esta condición basta; de suerte que si se cortase una cara artificial en el cristal, cualquier plano trazado perpendicularmente á esta cara y paralelo al eje óptico sería también una sección principal de la cara artificial. Por último, si se corta una cara artificial ABC perpendicular al eje óptico NI, todo rayo que caiga

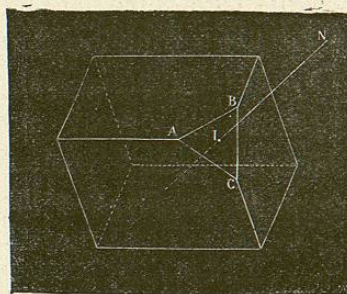


Fig. 150.—Sección artificial perpendicular al eje óptico

en ella estará forzosamente en una sección principal, y los dos rayos refractados en el plano de incidencia. En este caso, la observación hace ver que si el rayo incidente es normal á la cara artificial, no hay más que un rayo refractado. Tenemos pues una dirección en la cual desaparece el fenómeno de la bifurcación; no ocurriendo tampoco la doble refracción cuan-

do el rayo incidente cae paralelamente al eje óptico.

Monge ha hecho un experimento singular, de muy fácil reproducción y que demuestra cuál es la marcha seguida en el cristal por los haces emanados de un punto luminoso para producir las dos imágenes ordinaria y extraordi-

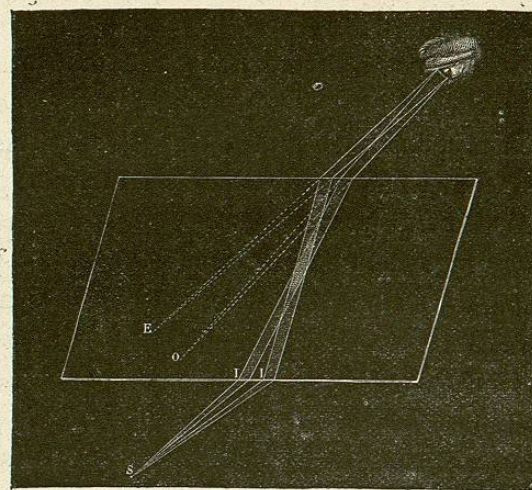


Fig. 151.—Cruzamiento de los haces luminosos que producen la imagen ordinaria y la extraordinaria

naria del punto. Examinando la doble imagen de un punto S (fig. 151), situado á alguna distancia de la cara inferior, y pasando por debajo de esta cara una cartulina opaca *ab*, reconoció con sorpresa que la imagen más distante de la cartulina es la primera que desaparece. Hé aquí cómo se explica este fenómeno. Un haz luminoso incidente SI se bifurca y da dos haces refractados, y por lo tanto produce, á la salida de la cara paralela, dos haces emergentes que divergen, y uno solo de los cuales puede penetrar en el ojo: supongamos que este sea el que produce la imagen ordinaria O. Otro haz incidente, inmediato al primero, dará también dos haces emergentes, uno de los cuales penetrará en el ojo y producirá la imagen extraordinaria E. Como las caras del cristal son paralelas, cada haz emergente se compone de rayos paralelos á los del rayo incidente. Por consiguiente, puesto que los que producen las imágenes van á encontrarse en el ojo, es preciso que los haces refractados correspondientes se crucen en el cristal.

Así se explica el experimento de Monge; la cartulina *ab* empieza por interceptar el haz que produce la imagen más distante, y por lo tanto esta imagen, es decir, la extraordinaria E

es naturalmente la primera que debe desaparecer.

Tales son las circunstancias más notables que constituyen el fenómeno de la doble refracción. Las leyes que rigen este fenómeno son demasiado complejas para que podamos explicarlas en una obra tan elemental como el *Mundo físico*; pero trataremos de dar en breves líneas una idea de la diferencia que existe entre la simple y la doble refracción.

Hemos dicho ya que el haz ordinario sigue las dos leyes de Descartes; es decir que el rayo refractado está siempre en el plano de incidencia, y que si se hace variar el ángulo de incidencia, la relación que existe entre su seno y el del ángulo de refracción es siempre constante. El haz extraordinario no sigue la primera de estas leyes sino cuando el rayo incidente está en una sección principal. Tampoco sigue en modo alguno la segunda, de suerte que la relación de los senos, lo que se llama índice de refracción, varía según el ángulo que el rayo incidente forma con el eje óptico del cristal. Si este ángulo es nulo, ó si el haz incidente es paralelo al eje óptico, la doble refracción desaparecerá en estos casos solamente; una de las imágenes se confunde con la otra, habiendo

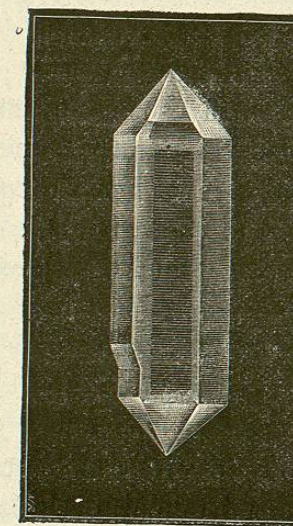


Fig. 152.—Cristal de roca

igualdad entre los índices ordinario y extraordinario de refracción. Cuanto mayor es el ángulo, más va creciendo la desigualdad de estos índices, llegando á su máximo cuando el haz incidente tiene una dirección perpendicular al eje óptico. En el espato de Islandia, único cristal dotado de la doble refracción que hemos examinado hasta aquí, el índice de refracción del rayo ordinario es mayor que el del rayo extraordinario. Lo contrario acontece si se consideran ciertas sustancias birefringentes, por ejemplo, el cristal de roca. ¿De qué dimana esta diferencia? Para exponer su causa, sería preciso desarrollar la teoría entera de la refrac-

cion simple y doble en el sistema de las ondulaciones; demostrar que la refraccion tiene por origen la diferencia de velocidad que experimentan las ondas de éter al pasar de un medio á otro más refringente; que el rayo ordinario procede como si se moviese en un medio homogéneo no cristalizado, al paso que el extra-

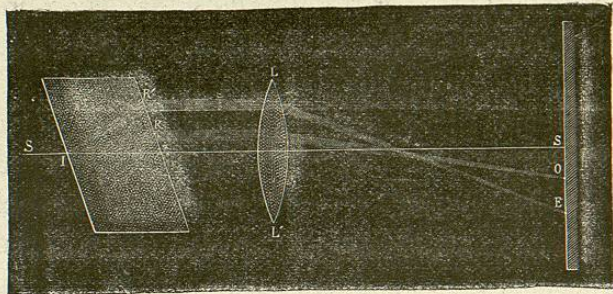


Fig. 153.—Propagación de las imágenes ordinaria y extraordinaria de un cristal birefringente. Igualdad de intensidad

ordinario se propaga con más ó menos facilidad segun que se mueva en esta ó en la otra direccion relativamente á la orientacion de las moléculas cristalinas. En el espató de Islandia, el rayo extraordinario es el dotado de mayor velocidad, sucediendo lo contrario en el cristal de roca.

De aquí proceden los nombres de cristales *positivos* y cristales *negativos* dados á las sustancias dotadas de doble refraccion, segun que se las clasifique en la una ó en la otra categoría, teniendo las primeras por tipo el cristal de roca, y las segundas el espató de Islandia.

La turmalina, el rubí y la esmeralda son cristales negativos; el cuarzo—nombre mineralógico del cristal de roca,—el sulfato de potasa y de hierro, el hiposulfato de cal y el hielo figuran en el número de los cristales positivos.

II

DOBLE REFRACCION EN LOS CRISTALES DE DOS EJES

Prodúcese también la doble refraccion en toda una clase de sustancias cristalinas, designadas con el nombre de *cristales de dos ejes*. El topacio, la aragonita, el sulfato de cal, el talco, el feldespato, la perla y el azúcar son cristales de dos ejes: en cada cristal de esta clase hay dos direcciones distintas por las cuales pasa el rayo sin bifurcarse; estas dos direcciones son los *ejes ópticos* del cristal. Pero hay una diferencia esencial entre los fenómenos de doble refraccion en los cristales de un eje y los de los

cristales de dos ejes. En los primeros, uno de los dos rayos refractados sigue las leyes de la refraccion simple; en los segundos los dos rayos son extraordinarios: ninguno de ellos sigue la ley de Descartes. Un experimento de Fresnel lo demuestra así sencillamente. Se divide un topacio en muchos fragmentos, cada uno de estos con la forma de láminas de caras paralelas, pero tallados en diferentes sentidos; y después de pegar dichos fragmentos por sus caras planas, se da al conjunto la forma de un paralelepípedo. Mirando entonces al través de él una línea recta paralela á la arista refringente, se ven dos imágenes de la línea, cada una de las cuales es una mixta cuyas diversas partes corresponden á los fragmentos del topacio; ahora bien, si uno de los sistemas de rayos refractados siguiese las leyes de Descartes, la imagen que resultaría sería una línea recta, porque la direccion de los rayos en el prisma sería entonces independiente de la direccion de los ejes ópticos en cada pedazo de los que le componen. La experiencia prueba, pues, que los dos rayos son extraordinarios. En breve veremos (artículo III del capítulo XIV) otro medio de distinguir los cristales de uno y de dos ejes.

Terminemos lo que teníamos que decir acerca de la doble refraccion enumerando los medios refringentes en que no se presenta esta clase de fenómenos, ó que están dotados de la refraccion simple. Estos medios son ante todo los gases, los vapores y los líquidos: y entre las sustancias que han pasado del estado líquido al sólido, aquellas cuyas moléculas no han adquirido una estructura cristalina regular, como por ejemplo, el cristal, lacola, la goma y las resinas; por último, los cristales cuya forma primitiva es el cubo, el octaedro regular y el dodecaedro romboidal. Debemos añadir que los cuerpos pertenecientes á estas dos últimas categorías pueden adquirir la propiedad de la refraccion doble cuando se los somete á compresiones ó á dilataciones violentas, ó bien cuando se calientan desigualmente sus diferentes partes.

Ciertos sólidos pertenecientes al reino vegetal ó al reino animal, como el asta, la pluma y el nácar, están también dotados de doble refraccion.

CAPITULO XIV

POLARIZACION DE LA LUZ

I

POLARIZACION DE LA LUZ POR DOBLE REFRACCION

Cuando se observa un objeto luminoso al través de un cristal dotado de doble refraccion, verbigracia, de un romboedro de espató de Islandia, se ven, segun ya sabemos, dos imágenes distintas, una llamada ordinaria, que sigue las leyes de la refraccion simple, y otra extraordinaria, cuyas propiedades hemos indicado en los artículos anteriores. Reconócese fácilmente esta última en que gira alrededor de la otra cuando se imprime al cristal un movimiento de rotacion en un plano paralelo á las caras de incidencia y de emergencia de los rayos. Ahora importa observar que, en todas estas posiciones, no varía la intensidad relativa de las dos imágenes; el brillo de cada una es la mitad menos que el del objeto luminoso, como es fácil comprobarlo observándolo directamente. Supongamos que se examina un circulito blanco sobre fondo negro. Donde quiera que las dos imágenes ordinaria y extraordinaria del punto están separadas, presentan una tinta cenicienta de igual intensidad, y el brillo es igual al del objeto allí donde ambas imágenes se sobreponen. Por último, ocurre siempre el mismo fenómeno, cualesquiera que sean los colores respectivos del objeto y del fondo.

Hácese también el mismo experimento en las cátedras, dejando llegar un haz de luz al cristal y recibiendo los dos haces refractados en una lente convergente: las dos imágenes se proyectan en una pantalla (fig. 153). Si se da entonces vuelta al cristal paralelamente á la cara de incidencia, las dos imágenes se separan describiendo cada cual una circunferencia, y se ve que en cualquier posicion su intensidad luminosa es igual. Si se hace de modo que las dos imágenes se sobrepongan en parte,

el brillo de las porciones sobrepuestas será doble del que tienen las separadas, como se ve en la figura 154.

Un bonito y antiguo experimento hecho por Huygens nos probará que los haces luminosos que salen del espató de Islandia adquieren nuevas y notables propiedades después de la

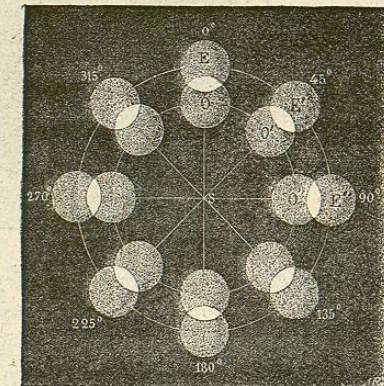


Fig. 154.—Igualdad de la intensidad de las imágenes ordinaria y extraordinaria en la doble refraccion

desviacion en el medio cristalizado, propiedades que no tenía el haz luminoso antes de pasar por el cristal. Este experimento consiste en recibir en un segundo cristal los rayos ordinario y extraordinario después de su salida del primer romboedro, y en examinar las intensidades relativas de las imágenes que de ello resultan cuando se varía la orientacion del segundo cristal alrededor del haz emergente. El medio más sencillo de observar los fenómenos que entonces ocurren, medio empleado por el mismo Huygens, es el siguiente:

Coloquemos un primer cristal sobre un punto negro en medio de un fondo blanco, y veremos dos imágenes de igual intensidad. Pongamos ahora otro espató de Islandia sobre el primero, y de tal modo que sus secciones principales coincidan; uno de los medios de realizar esta condicion consiste en colocar las caras del uno paralelamente á las del otro; y siempre