

El navegante y las olas

Francisco Xavier Martínez de Osés

Departamento de Ciencia e Ingeniería Náuticas. Universidad Politécnica de Cataluña

La profesión del marino, ha sido un arcano nutrido de un altísimo nivel de conocimiento práctico derivado de la propia experiencia, que se ha traducido en doctrina científica en los últimos siglos. De entre la amplia panoplia de conocimientos que recibe el alumno o cadete de náutica, destaca la meteorología náutica y en concreto, conceptos relacionados con la formación y efectos del oleaje y de su generador, el viento. Ambos fenómenos están descritos científicamente en la dinámica de fluidos, pero desde el punto de vista del navegante, se analizan desde una perspectiva muy pragmática. En cualquier caso y en atención al interés que suscita al marino, iniciaremos este artículo con una somera descripción de los efectos del viento, de las variables que definen el oleaje y de cómo se relacionan entre sí, hablaremos de situaciones extremas y terminaremos con unas breves conclusiones.



Buque, sufriendo fuertes cabezadas al salir del puerto

El viento como generador de las olas

La velocidad media del viento válida para todo navegante, es la que se mide a 10 metros de altura en mar abierta. Es común ver los anemómetros situados en el tope superior de la arboladura en los veleros o, a bordo de un buque mercante, al piloto de guardia asomado en el alerón del puente con un anemómetro portátil. De hecho, un marino experimentado puede obtener un resultado similar a partir de la observación del estado de la mar, por la relación que existe entre escalas de alturas de ola e intensidad del viento.

Sabemos además que a diez metros de altura, la velocidad del viento del equilibrio, es aproximadamente de dos tercios de la velocidad del mismo al nivel de la capa límite o no perturbada (unos 900 metros sobre el nivel del mar). Obviamente, las breves rachas que acompañan al viento entablado, superan esos valores medios y nos sugieren el poten-

cial daño que puede producirse en una tormenta severa.

A partir de la energía transmitida a la superficie marina por parte de la fuerza de avance del viento, se generan las olas por un efecto de arrastre. Éstas aparentemente no se ven afectadas por fuerzas desviadoras derivadas de la rotación terrestre como la de Coriolis.

Las olas se inician como unas ondulaciones (ripples) en la superficie marina cuando el viento empieza a soplar. La intensidad del viento, su dirección sobre la mar y el lapso de tiempo durante el cual éste sopla, determinan cómo las olas evolucionarán y qué tamaño tendrán. Dichas ondulaciones en la mar desaparecen con el tiempo si cesa el viento o crecen a una mar más desarrollada, que dada su reciente formación se denomina mar de viento (wind seas). Es decir, las olas precisan de un período de tiempo mínimo para generarse a partir de los efectos del viento, pero a la vez cumplen el principio de conservación del movimiento, y necesitan también mucho tiempo para desvanecerse una vez el viento haya cesado.

La mar de viento madurará a mar de fondo (swell) cuando haya abandonado el área de origen y no estén relacionadas con los efectos locales del viento. Así pues, el estado actual de la mar en cualquier punto del océano, es el producto de las condiciones existentes de tiempo y los hechos recientemente pasados.

Tras haber agrupado en dos genéricas definiciones los espectros de olas oceánicas, pasamos a detallar los factores de formación y crecimiento de las mismas, siendo principalmente:

- La **intensidad** del viento, medida en nudos y expresada en grados de la escala Beaufort.
- La **persistencia** o duración en horas en las que el viento sopla sobre un área oceánica.
- El **fetch** o distancia marina en millas náuticas sobre la cual el viento sopla.

Podemos por tanto decir que la generación de olas por el

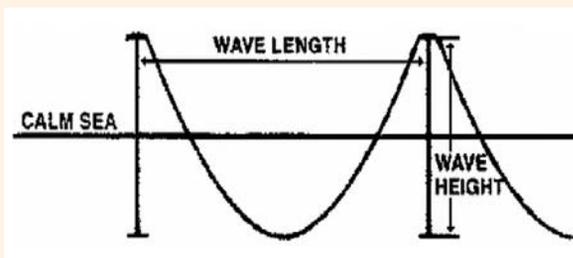


Figura 1: Esquema de una ola y sus componentes principales.
Fuente, Mariner's Weather Log

viento, precisa de tiempo y espacio. No obstante, también existe una correlación entre la máxima altura de ola para cada combinación de intensidad de viento, persistencia y fetch. Esta condición en las olas cuando se alcanza, se denomina "Mar completamente desarrollada" o *Fully Developed Seas* (FDS). Registrándose por tanto las mayores olas en los océanos del hemisferio sur, donde fuertes vientos pueden soplar sobre vastas áreas oceánicas completamente expuestas, durante largos períodos de tiempo.

Parametrización del oleaje

Las olas se describen mediante cuatro parámetros principales: altura, longitud, período y velocidad. Estos componentes se relacionan directa o indirectamente entre ellos en expresiones matemáticas.

La altura de la ola, es la distancia vertical entre las crestas y el valle contiguo en un tren de olas, la longitud de ola es la distancia horizontal entre sucesivas crestas, el período es el tiempo en segundos que tarda en pasar una cresta tras la siguiente y la velocidad es la rapidez de la propia traslación de la ondulación sobre la superficie marina.

Si repasamos las relaciones de los términos descritos, en el caso de la altura de las olas, ésta la podemos definir como cinco veces el período al cuadrado de la misma:

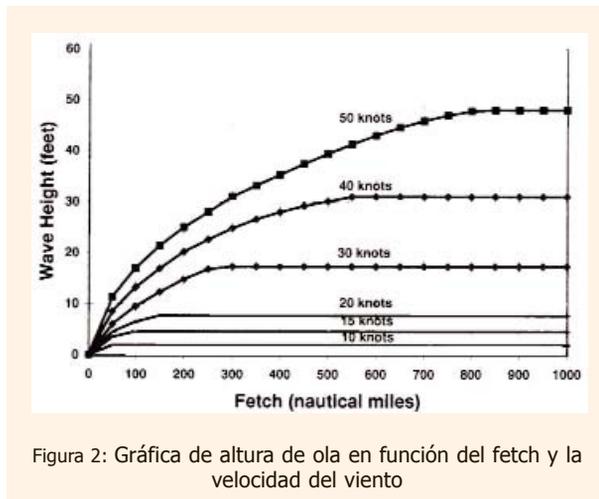


Figura 2: Gráfica de altura de ola en función del fetch y la velocidad del viento

$$H = 5(T^2) \text{ con } T, \text{ en segundos y } H, \text{ en pies } (').$$

Se acostumbra a usar la altura significativa de la ola (H_s), la cual es la altura media del tercio más alto de las olas que rodean al observador. Dicha definición se desarrolló durante la Segunda Guerra Mundial y refleja la tendencia que todo observador tiene de fijarse siempre en las olas más altas. La altura media (H_m) de las olas es el 64% de la altura significativa. El 10% de olas más altas en un área, corresponde al 129% de la altura significativa y la altura extrema de las olas, al 187% de la altura significativa. Así por ejemplo, si $H_s = 10'$ en un área determinada, $H_m = 6,4'$, el 10% más alto tendría $12,9'$ y las olas extremas $18,7'$.

Para cualquier velocidad del viento, una H_s determinada precisa de un tiempo mínimo para formarse, en el caso de una velocidad del viento de grado 8B (34-40 nudos), se requiere

que el viento esté soplando durante 40 horas, con un fetch ilimitado, para elevar las crestas a $27,5'$.

Si cambiamos cualquiera de las componentes citadas, la altura de la ola crecerá o se reducirá. Por ejemplo si el fetch se limita a 10 millas, la H_s se reducirá a $7,3'$ siendo indiferen-

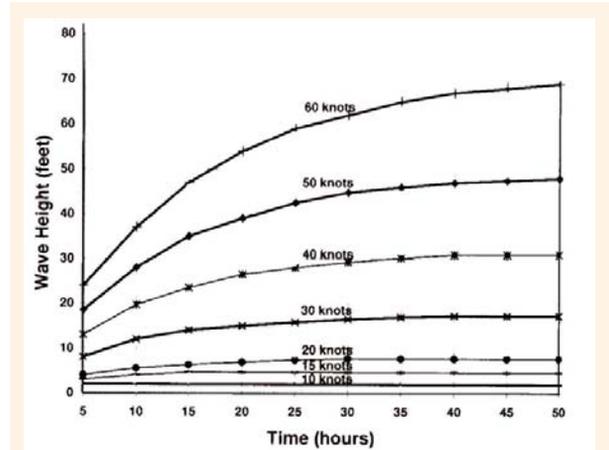


Figura 3: Gráfica de altura de ola en función de la persistencia y velocidad del viento.

te el valor de la persistencia en este supuesto. No obstante si reducimos el fetch, también limitaremos la altura de las olas; y esto es importante porque en la práctica, la mar raramente alcanza su nivel de pleno desarrollo para unos parámetros dados puesto que la intensidad y dirección del viento cambian a medida que el sistema depresionario se desplaza por el océano.

Si hacemos un ejercicio retrospectivo y nos remontamos a la "Halloween storm" de 1991, famosa por la novela y posterior película, "Tormenta perfecta" y la pérdida del F/V "Andrea Gail" y sus seis tripulantes, hay constancia de que se registraron olas de hasta 33 metros de altura debido entre otros factores, a que los núcleos depresionarios de la misma fueron esencialmente estacionarios, provocando que los vientos soplaran entablados a lo largo de días. Mientras que un valor estadístico de persistencia para un viento entablado se podría fijar en 27 horas, el ejemplo anterior ratifica el peso de la variable persistencia.

De todos modos, un cambio en la dirección del viento, no implica un cambio de dirección en las olas generadas previamente, sino que al primer tren de olas no se le aportará más energía de una forma directa, pudiendo dichos trenes de olas continuar su derrota hasta ser refractadas por un bajo o una isla.

Otras situaciones extremas

En 1998, dos temporales simultáneos de finales de octubre, uno de ellos considerado bomba meteorológica y conocida como la APL China, (nombre de uno de los buques que se vio afectado por la misma y al que barrió toda la cubertada) en el Pacífico Norte, infligieron importantes daños y la pérdida de cientos de contenedores que impactaron con cinco buques mercantes, atribuyéndose sus efectos a la generación de olas extremas.

En este caso cuando las olas penetran en fondos someros

y precisamente cuando la profundidad es menor de la mitad de la longitud de la ola, el movimiento de las mismas se ralentiza por contacto con el fondo, aumentando entonces su agudeza. Éstas se hacen más altas y cortas.

Este fenómeno se denomina "tocar fondo" o shoaling, provocando que la ola se frene, se vuelva inestable y rompa. La relación física es 5/3 para que las olas empiecen a romper (3 pies de altura para 5 pies de fondo). Aunque en el caso de las olas oceánicas cuando sobrepasan un bajo, pueden aumentar drásticamente su altura sin romper, denominándose dicho efecto ground swells, siendo frecuente tras el paso de temporales intensos. Si estas olas encuentran una isla a su paso, el efecto refractivo de la misma puede conllevar a una mar confusa, aguda y con rompientes en su costado de sotavento.

El velero Fantome, hundido con sus 31 tripulantes, sufrió dicho tipo de olas mientras aguantaba a sotavento de la isla Roaton a la altura de Honduras tratando de resguardarse del huracán de categoría 5, Mitch. Cuestión aparte es el nivel de estabilidad del buque y su reacción, además de las decisiones que tomó su Capitán.

Relación entre variables del oleaje

Podemos decir que la velocidad de la ola es tres veces su período y aunque éstas no son simétricas en su forma, las crestas son de natural más agudas y estrechas que los valles, estando para el nivel medio de la mar, media altura (amplitud) de la ola por debajo del mismo. Para una mar completamente desarrollada, existe una relación entre longitud de la ola, período y velocidad:

$$L = (T^3) \text{ (para una medida en pies)}$$

$$L = 1,5(T^2) \text{ (para una medida en metros)}$$

$$V = 3T$$

Por ejemplo, una ola con un período de 5 segundos, tendrá una longitud de 125' ó 37,5 metros y una velocidad de 15 nudos.

Cuando un viento entablado sopla sobre la mar, se empiezan a levantar olas de corto período, pequeñas y lentas. A medida que éstas reciben más energía del viento, se aceleran e incrementan su período, hasta que la velocidad de avance de las mismas se iguala a la velocidad del viento, llegando entonces a una situación tope en cuanto a su período y de las demás variables relacionadas.

El tamaño de una ola simple está limitado por su agudeza, y más allá de una altura físicamente límite, empiezan a romper formando espumosos borreguitos o "white horses". En mar abierta, dicho límite alcanza la relación de 1/13, quedando la expresión por tanto en: $H = L/13$, es decir que antes de romper una ola con un período de 10 segundos y longitud de 150 metros podría alcanzar una altura de 12 metros mientras que una ola con un período de 20 segundos y una longitud de 600 metros, alcanzaría una altura de 46 metros, si el viento se mantuviera soplando con una persistencia suficiente a 60 nudos (ver relaciones anteriores).

Dicha limitación física en la altura, se produce de forma más tangible para períodos de ola pequeños, hasta 8 segundos, mientras que para olas de mayor período, dicha limitación llega más tarde, aparte de la posible mutación en las carac-

terísticas de la propia ola, debido a la intervención de factores como la topografía local y en concreto la llegada a fondos someros.

En la práctica, el estado final de las olas vendrá determinado no sólo por el campo de viento existente sino también por el efecto de los trenes de olas de mar de fondo, levantados con anterioridad por vientos distantes. La expresión que refleja la altura de la ola resultante en este caso, será:

$$H_s = (H_{fdo}^2 + H_{vto}^2)^{1/2} \text{ (siendo la altura real de la mar de fondo y la altura significativa para la mar de viento)}$$

A la vez debido a la propia variabilidad de la intensidad del viento, podemos encontrar diferentes tamaños de olas, siendo una de las consecuencias el hecho de que la longitud de ola para cualquier período, tenderá a ser menor que la obtenida por fórmula. También dada la naturaleza no lineal de la misma, la altura instantánea de una ola puede diferir fácilmente del valor dado por la ecuación, sobre todo cuando las mares de viento y tendida, avanzan en direcciones distintas. En esta circunstancia, la ola toma una forma piramidal. Generalmente si el viento crece, favorece la generación de olas, pero si declina, el primero se ve avanzado por las propias olas, deduciéndose de este hecho que dada la mencionada variabilidad del viento, la mar raramente alcanza el estado de equilibrio.

A efectos prácticos, la velocidad de una ola tiende a ser mayor que la del viento, si éste sopla por debajo de los 25 nudos, mientras que la ola tiende a ser más lenta si el viento sopla a mayor velocidad. De todos modos, una vez la ola abandona la estela de la tormenta generadora, se extiende por el océano, disipando una pequeña porción de su energía en forma de borreguitos pero con muy poca disminución en su altura, trazando una derrota de círculo máximo. Se han podi-

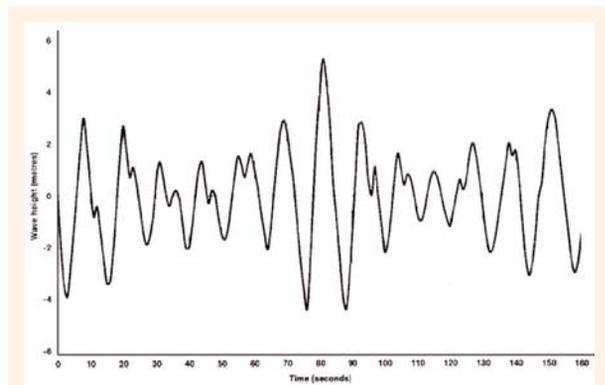


Figura 4: Gráfica reflejando la variación en la altura de las olas, al paso por un punto dado.

do registrar olas, con un período de 20 segundos generadas por tormentas en las cercanías de Ciudad del Cabo (vientos de más de 60 nudos) y con una longitud de 600 metros, llegadas en sólo 9 días a las costas de Cornualles, mediando una distancia entre los dos puntos de entre 10.000 y 12.000 kilómetros.

La mar de fondo aunque tenga una larga edad, no implica ello que su impacto sea menor en su aproximación a fondos más someros, si bien es cierto que la altura de la misma acostumbra a ser menor que la altura de la mar de viento de la que

se deriva. De entre sus principales consecuencias no sólo citamos la incomodidad que sentimos al entrar o salir de puerto consecuencia de la mayor altura que toman las olas al recalcar en la costa, sino que su importancia es tal que en áreas expuestas se realiza un seguimiento de las tormentas del Atlántico Norte occidental para prevenir daños, como es el caso de la costa NW de España, donde también se realiza un seguimiento en el punto en que los trenes de mar de fondo provenientes del oeste, sobrepasan la isobática de 100 brazas (2750 m) en la bahía del Golfo de Vizcaya. No sólo son los daños a los artefactos en la mar, sino las propias costas bajas de la Europa occidental se ven afectadas.

A título de ejemplo mencionamos la situación registrada en el Canal de la Mancha en febrero de 1979, cuando una profunda depresión extratropical de 952 mb, que se hallaba al sur de Terranova unos 3 días antes. Esta depresión avanzaba a la misma velocidad que las olas que generaba (30 nudos), lo que produjo una mar de fondo con un período de 18-20 segundos desplazándose por el Atlántico Norte. En el buque meteorológico LIMA (en situación $I = 57^{\circ}N$ y $L = 20^{\circ}W$) y la Boya de adquisición de datos nº1 en la zona de Western Approaches, se registró una mar tendida de 18 segundos de período y una altura significativa de 7 metros a las 0000 del 13 de febrero. Mientras que sobre la misma hora se registró al sur de Lisboa (en una zona de menor profundidad) una ola de 17,2 metros de altura con un período de 20 segundos. Aunque la altura de las olas no fuere tan excepcional, la combinación de una longitud de ola muy larga con una leve pleamar y la llegada de la misma a fondos más someros, ocasionó importantes inundaciones a lo largo de las costas del Canal de la Mancha. Los efectos de profundas y lejanas depresiones también juegan un papel considerable en el oleaje tropical, donde el estado de la mar es dominado por la mar de fondo generada en latitudes superiores.

Observaciones

Una de tantas leyendas de la tradición marina, versa sobre el tamaño de gigantescas olas. La mayor de ellas reportada por estimación visual, data de 1933 y se avistó a bordo del buque USS Ramapo en el Pacífico Norte, registrándose una altura de 112' de valle a cresta; existen otros muchos avistamientos de entre 80' y 100' de altura. De hecho la actual tecnología de registro de parámetros oceanográficos, nos permite medir con mayor exactitud la altura de las olas. Pero estos métodos no hacen más que corroborar la existencia de tan fabulosas masas de agua.

La configuración de las olas es consecuencia de la interacción no lineal de los componentes que las forman, siendo la que sufre una mayor variabilidad la propia longitud de la ola, que refleja el viento medio responsable de ese estado de la mar; distando las longitudes de los diferentes trenes de olas en un 20% aproximadamente. Esto implica también que las olas entre ellas mantienen un valor de longitud media cada cinco a diez longitudes de ola, produciéndose olas mayores

cada dichos espacios, llenándose con olas menores entre las primeras. El conocimiento popular marinero, responde a dichos fenómenos con leyendas como la de las "Siete olas" o las "Tres Marías", según la proveniencia en nuestra geografía del proverbio.

En ciertos estados de la mar, el escenario es más complicado especialmente cuando la mar de viento y la mar tendida recalcan en diferentes direcciones. En este caso las olas creadas pueden llegar a ser excepcionalmente más altas debido a un fenómeno de superposición entre dichos trenes. En este caso no hay un claro límite de altura teórica, siendo una consecuencia del efecto de convergencia de olas la llamada "ola gigante" o freak wave (siendo este último término acuñado originalmente para el oleaje generado en la costa Índica de Sudáfrica en la que interaccionan viento, corriente y fondo somero en la generación de



Olas a proa, vistas desde el puente de un navío

dicho oleaje). Este fenómeno traducido en cifras supone que una ola de cada diez, puede tener hasta un 30% más que la altura significativa del espectro y que una de cada 500 olas tendrá cerca del doble de la altura del tercio más alto de las olas de ese tren. En la práctica, una de cada cien mil olas podrá tener dos veces y media la altura significativa de la mar existente, y es la que hemos denominado al principio del artículo como "ola extrema".

La estadística del oleaje tiene ante sí un reto tanto más difícil cuando trata de describir la distribución de la altura signifi-



Remolcador en el instante de impactar con una ola en su proa

cativa de las olas. Cualquier análisis hecho, debe de reflejar no sólo las variaciones estacionales sino también la contribución de temporales importantes como ciclones tropicales o profundas tormentas extratropicales; las cuales deberían de considerarse como un subgrupo dentro del amplio abanico de eventos que se pueden desatar en un lugar en concreto. Ejemplos extremos que pueden desembocar en situaciones de mal tiempo son las mares excepcionalmente picadas, las cuales provienen de un incremento fortísimo en la intensidad del viento debido tanto a fuertes temporales o líneas de turbona-

da como las llamadas "ciclogénesis explosivas". Estas últimas, formadas por jóvenes depresiones extratropicales que se profundizan repentinamente (una profundización de 24mb en 24 horas se denomina bomba meteorológica), pudiendo existir casos extremos como el de la pequeña depresión a la altura de la Bahía del Chesapeake con un valor de 996mb a las 0000 horas registrada el 4 de enero de 1989, y que 24 horas después se hundió a 936mb mientras se desplazaba al SW de la isla de Sable. Dichas casos se designan como "ultrabombas".

En circunstancias como la anterior, la intensidad del viento crece con tal rapidez que la altura de las olas puede provocar rápidamente una mar escarpada, con alturas significativas de ola de 8 metros, períodos alrededor de 10 segundos y longitudes de 150 metros; pero con algunas olas sustancialmente mayores.

Otro factor añadido y a veces no contemplado es la combinación del viento y la mar, con el cambio producido en el nivel de la superficie marina al paso de depresiones desarrolladas o en el extremo de los ciclones tropicales. La combinación del movimiento de la borrasca y la elevación producida por la menor presión de la columna atmosférica sobre la mar; desarrolla, genera la llamada "marea de temporal" o storm surge. El efecto de la misma en costas desnudas y bajas es evidentemente desastroso, pero si la marea formada es canalizada entre estrechos y fondos someros como la parte meridional del Mar del Norte, la elevación de las aguas se amplifica. En el caso de huracanes o de tormentas tropicales, la propia elevación del nivel de la mar también es un signo indicador de su proximidad a las costas.

Corolario

El marino desde los inicios de su actividad, ha sido uno de los observadores más persistente del tiempo, ya que su trabajo y seguridad dependían en gran medida del mismo. Aunque actualmente los buques hayan progresado de forma prodigiosa en lo que concierne a seguridad constructiva, la no dependencia del viento ante la superioridad de la propulsión mecánica o la existencia de naves de tamaño cada vez mayor; no son en suma factores suficientes como para que el navegante pueda obviar la importancia de la atenta observación de la mar, de su evolución y sus efectos sobre el buque. Este condensado artículo ha pretendido recordarnos a todos el respeto y atención que le debemos a la mar.

Bibliografía

Burroughs, W. et al., Maritime Weather and Climate. Whiterby Ed. 1999.

Barry, R.G., Chorley, R.J., Atmósfera, tiempo y clima. Ed. Omega, Barcelona, 1972.

Dashew, S. & L., Mariner's weather Handbook. Beowulf, Inc. Tucson, Arizona, 1998

Martínez de Osés, F. X., Meteorología aplicada a la navegación. Edicions UPC, Barcelona. 2003

NOAA US Department of Commerce., Mariners Weather Log. Vol 44, Nº3. December 2000

La Retorta del aire

coordinada por *Jose I. Prieto*

*El aire es azul por culpa de las tinieblas
que están sobre él,
pues el negro y el blanco engendran el azul.*

Leonardo da Vinci

El Color del agua

Un razonamiento muy extendido liga el color de las superficies marinas al azul del aire. Parece que lo propuso Lord Rayleigh en su teoría del color, hacia 1899:

*El muy admirado azul oscuro del mar profundo es sólo
el azul del cielo visto por reflexión.*

Su opinión era por entonces muy respetada, por lo que aún nos llegan sus ecos. A Rayleigh la vista del Everest desde su habitación de hotel le inspiró un curioso cálculo. De la falta de nitidez de los contornos de la montaña dedujo la refracción de

la luz en el aire, y de ella el número de moléculas por metro cúbico en tal aire. Unas décadas después, otro turista privilegiado, de viaje por el mar Rojo y el Mediterráneo, pondría en duda la azul conjetura, en un artículo sobre el color del Mediterráneo. La opalescencia de ese mar se debía según el profesor Raman a la dispersión de la luz solar por las moléculas de agua. No fue un hallazgo fortuito ni una conclusión apresurada. Escuchémosle:

Las variaciones de densidad debidas a vibraciones moleculares alteran el índice de refracción y resultan en la dispersión de luz. Cuando eliminamos la reflexión superficial con un prisma de Nicol posicionado en el ángulo de Brewster, el color del mar mejora (...) Una capa de agua pura de más de 50 metros de profundidad muestra por dispersión molecular un color azul más saturado que luz celeste de intensidad parecida. El color azul se debe por tanto a difracción. La absorción ayuda a saturar el tono algo más.

Su explicación podría traducirse en la recomendación de usar gafas polaroid para eliminar el brillo del cielo y apreciar