

**RADIACIÓN SOLAR:
PRINCIPIOS, EVALUACIÓN Y APROVECHAMIENTOS**

LECCIÓN INAUGURAL
DEL CURSO ACADÉMICO 2009-2010
PRONUNCIADA POR EL
PROF. DR. JOSÉ LUIS TORRES ESCRIBANO
CATEDRÁTICO DE INGENIERÍA AGROFORESTAL
DE LA UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA



Pamplona, 18 de septiembre de 2009

Edita: Universidad Pública de Navarra : Nafarroako Unibertsitate Publikoa
Coordinación: Dirección de Comunicación
Fotocomposición: Pretexto. pretexto@pretexto.es
Imprime: Ona Industria Gráfica
Depósito Legal: NA 2.508/2009
Distribución: Sección de Publicaciones
Universidad Pública de Navarra
Campus de Arrosadía
31006 Pamplona
Fax: 948 169 300
Correo: publicaciones@unavarra.es

Excelentísimo Sr. Presidente del Gobierno de Navarra,
Sr. Rector Magnífico,
Excelentísimas e Ilustrísimas Autoridades,
Miembros de la Comunidad Universitaria,
Señoras y Señores:

Es para mí un honor, no exento de responsabilidad, poder impartir la lección inaugural del curso 2009-2010. Desde que recibí el encargo del Rector, no tuve dudas acerca del tema sobre el que versaría: la radiación solar; pero sí del enfoque que debería darle. Por un lado, un planteamiento muy técnico, minucioso, y riguroso en los procedimientos de cálculo, me obligaría a introducir expresiones matemáticas, conceptos y terminología que podrían resultar extraños a algunos de ustedes y quizá terminaría aburriéndoles. Culturalmente, parece estar arraigada la opinión de que lo expresado de forma físico-matemática, lo técnico y científico, requiere un considerable esfuerzo para ser comprendido. Es posible, pero les confieso que cuando leo la glosa que habitualmente se incluye en el pequeño folleto que acompaña la exposición de un artista, frecuentemente me quedo perplejo y aún después de sucesivas relecturas sigo sin haber comprendido bien el texto. Tal vez se deba a que no controlo un lenguaje que sin embargo se dirige a un público probablemente tan heterogéneo como el presente en esta aula. Por otro lado, un planteamiento muy descriptivo, apoyado en ejemplos más o menos acertados y cotidianos, conduciría, en algunos casos, a una falta de rigor que los expertos podrían criticar. Decididamente, pienso que lo mejor, en esta situación, es una solución de compromiso entre ambos extremos. Espero que el resultado final cumpla con este objetivo y haber alcanzado el necesario equilibrio como ya lo han hecho con anterioridad otros compañeros de claustro en las excelentes lecciones que he tenido oportunidad de atender durante varios años, en este mismo acto.

Por lo demás, he intentado eliminar la pompa que según la definición de la Real Academia de la Lengua acompaña a estas exposiciones, aproximando la lección a la que impartiría a mis alumnos habituales.

En lo que sigue, se tratará la radiación solar desde un punto de vista energético. En concreto, tras una obligada introducción en la que se establecerá su carácter, se pondrá de manifiesto su importancia para la humanidad y se comentarán sus componentes esenciales, se abordarán: la problemática de su evaluación en un determinado lugar, los modelos matemáticos que se han desarrollado para estimarla, los equipos disponibles para su medida y el interés en ser capaces de predecirla con cierta antelación. Por último, se describirán brevemente sus aplicaciones actuales en aprovechamientos tanto directos como indirectos.

En el Universo, el Sol es una estrella corriente, no es ni muy joven ni muy vieja, ni muy pequeña ni muy grande, ni muy brillante ni poco luminosa, pero es nuestra estrella y eso ha hecho que haya sido objeto de especial estudio e incluso de culto desde la antigüedad. Mitologías de diferentes civilizaciones han situado a los dioses solares en un lugar preferente de su panteón. Son los casos, entre otros, del egipcio Ra, del inca Inti y de la japonesa Amaterasu a los que, además, se les atribuía un importante número de facultades beneficiosas para el hombre, como la prosperidad, la producción de alimentos, la belleza, la medicina y la curación. Aunque, a primera vista, puede parecer raro ese compendio de facultades, un análisis detallado de la importancia del Sol en nuestras vidas nos llevaría a la conclusión de que nuestros antepasados aún se quedaron cortos. Paradójicamente, la teoría geocéntrica que perduraría hasta el siglo XVI, relegaba al Sol a un segundo plano, al considerar que todos los astros, incluido él, giran en torno a la Tierra, que se constituye así en el centro del Universo. Hoy día, superada la adoración religiosa, el Sol sigue proporcionándonos muchos de los efectos benéficos atribuidos a dichas deidades. En algunos aspectos nuestro conocimiento del Sol es notable e incluso podría considerarse como suficiente para determinadas aplicaciones. Sin embargo, los físicos solares reconocen que aún no se entiende bien y que nos falta mucho para ser capaces de predecir su comportamiento.

Sabemos que el Sol es un cuerpo celeste muy complejo, un esferoide de aproximadamente un millón y medio de kilómetros de diámetro, compuesto de varias capas que interaccionan entre sí y donde las reacciones termonucleares de fusión que, cada segundo, convierten cientos de millones de toneladas de hidrógeno en algunas menos de helio, liberan una ingente cantidad de energía. Se trata en suma de un gigantesco reactor nuclear situado a 150 millones de kilómetros de la Tierra.

Son conocidas las relaciones geométricas entre el Sol y la Tierra que permiten, en un momento dado, situarlo con bastante precisión respecto a cualquier plano localizado en cualquier punto de la superficie terrestre, ya sea de la fachada de un edificio o de la cubierta de un panel térmico. Los egipcios ya las emplearon para que se pudiera ver el sol en la cúspide de los obeliscos, justo antes del amanecer, e incluso las utilizaron como recurso escénico en los templos para, en el momento adecuado, mostrar la grandeza del faraón, o para señalar la posición de pasadizos secretos. Otras culturas

que cimentaron la nuestra, como la árabe y la romana, usaron la geometría Sol-Tierra en la construcción de relojes. El emperador Augusto hacia el año 10 a. de C. mandó construir uno, el *Horologium Augusti*, que, fabricado en mármol travertino, ocupaba una gran plaza en el Campo de Marte de Roma. Desgraciadamente, al parecer, sólo mantuvo la precisión esperada durante algunas décadas. Don Quijote recurre a términos cultos que se corresponden con conceptos y referencias empleados en la localización del Sol cuando recrimina a Sancho diciéndole: «*Tú no sabes que cosas son coluros, eclípticas, solsticios y equinoccios de que se compone la esfera celeste*».

También sabemos que el Sol experimenta cambios en su actividad que están relacionados con la formación de manchas solares. Ya en 1843 se observó que se trata de ciclos, de una duración aproximada de once años, en los que los periodos de mayor actividad coinciden con los de aparición de un mayor número de estas manchas. No obstante, hoy día, más de 160 años después de su descubrimiento, sigue siendo difícil establecer con precisión el momento en el que uno de estos ciclos acaba y comienza el siguiente. De hecho, en enero de 2008 se anunció que comenzaba el ciclo 24 y, sin embargo, en la primavera de 2009 aún no se podía confirmar que el ciclo 23 hubiese acabado.

En las fases de mayor actividad solar tienen lugar violentos acontecimientos que pueden producir interferencias en las comunicaciones, fallos en nuestros sistemas eléctricos, alteraciones en los satélites e incluso afecciones a la salud de los astronautas. Se trata de: las llamaradas solares, que son explosiones de enorme potencia en la atmósfera solar; el viento solar turbulento, que llena el sistema solar de partículas cargadas eléctricamente; o las eyecciones de masa desde la corona solar, que liberan miles de millones de toneladas de material hacia el espacio a grandes velocidades. Con todo, estos cambios no producen alteraciones significativas en la energía que llega a la atmósfera terrestre que sólo varía un escaso 0.1% entre los momentos de mayor y menor actividad. Por suerte, el pequeño valor de la oscilación y la brevedad de los ciclos hacen que estas variaciones no tengan efectos sobre el clima en nuestro planeta. Cuestión distinta es la posible existencia de ciclos de mayor duración, en los que un periodo prolongado de baja actividad solar podría acarrear cambios climáticos muy superiores a los inducidos por la actividad humana. Pero, por ahora, las teorías al respecto no están suficientemente contrastadas.

La radiación electromagnética que emite el Sol y que tarda aproximadamente ocho minutos en llegar a la Tierra, transporta la energía liberada en él de una forma parecida a como las olas marinas transportan la energía descargada por una tormenta mar adentro hasta la costa. Hay dos diferencias clave: la primera es que la radiación electromagnética no precisa de ningún medio material –el agua en el caso de las olas– para propagarse desde su lugar de origen y, la segunda, que tal propagación se hace en todas las direcciones del espacio. Se trata de una energía radiante que resulta de

la superposición de muchas oscilaciones, esto es, de muchas ondas puras de distinta frecuencia. El arco iris, producido por la descomposición de la luz blanca al pasar por las gotas de agua en un día de lluvia, nos permite comprobar experimentalmente como dicha luz blanca resulta de la superposición de luces de distintos colores, que se corresponden con otras tantas ondas diferentes. Pero la luz, la radiación visible, sólo es una parte, aunque importante, del espectro de la radiación solar. Ésta también incluye ondas de mayor energía como las ultravioleta, los rayos X o los rayos gamma y de menor energía, como las infrarrojas, que nos producen la sensación de calor, las microondas o las de radiofrecuencia. La energía contenida en las bandas del ultravioleta, el visible y el infrarrojo, alcanza el 99% de la energía radiada por el Sol que incide en la parte alta de nuestra atmósfera, quedando el 1% restante para las demás.

Hasta finales del siglo XIX, el comportamiento ondulatorio de la luz sirvió a la física clásica para explicar muchos fenómenos naturales y la radiación solar era, consecuentemente, contemplada como el flujo continuo de una onda de energía. Pero, a principios del siglo XX, se observó que las hipótesis basadas en la teoría ondulatoria no eran validadas por los resultados experimentales en algunos fenómenos como el fotoeléctrico. En estos casos, se comprobó que la luz no se comportaba como una superposición de ondas, sino como un conjunto cuantificable de partículas que poseen valores discretos de energía. La radiación tenía por tanto un comportamiento corpuscular y debía ser considerada como una lluvia de fotones. El intentar reconciliar mentalmente el comportamiento ondulatorio y corpuscular de la radiación solar es una tarea complicada. Afortunadamente, lo que importa es saber cuando la radiación debe ser considerada como una onda, cuando como conjunto de partículas y por último, en que aplicaciones el que tenga uno u otro carácter es irrelevante.

Ya se ha comentado que la energía recibida del Sol se mantiene bastante constante, pero ¿cuánta llega a la parte alta de la atmósfera terrestre? Para responder a esta pregunta, desde mediados del siglo XIX, pioneros como Pouillet, Langley o Abbot, a partir de mediciones hechas a nivel del suelo en distintos lugares, realizaron los primeros cálculos de la denominada constante solar. Por constante solar debe entenderse la energía que llega cada segundo a un metro cuadrado de superficie situado fuera de la atmósfera terrestre, a la distancia promedio anual de la Tierra al Sol y expuesto perpendicularmente a los rayos de éste.

Al mismo tiempo la búsqueda de esta constante propició el desarrollo de nuevos equipos de medida de la energía total contenida en la radiación solar y de cómo ésta se distribuye entre las distintas bandas del espectro, algunas de las cuales, recuérdese, han sido referidas con anterioridad. Conforme el siglo XX fue avanzando, el desarrollo de la aeronáutica hizo posible la realización de medidas desde plataformas situadas cada vez a mayor altura, como fueron, los globos, los aviones y, finalmente, los satélites. Hoy se considera que la citada constante solar alcanza un valor de 1367

W/m^2 , siguiendo la propuesta de la Organización Mundial de Meteorología, sólo un 10% superior a las primeras estimaciones realizadas en el siglo XIX. Además, se conoce como estos 1367 W se distribuyen entre cientos de estrechas bandas del espectro. Teniendo en cuenta el valor de la constante solar, un cálculo sencillo lleva a que, cada año, a la parte alta de la atmósfera terrestre, llega una energía de ciento setenta y cuatro mil teravatios-año. Por sí sola, esta cifra tal vez no diga mucho, pero si se añade que es más de setenta y cinco veces la correspondiente a la de todas las reservas energéticas no renovables estimadas en nuestro planeta con la tecnología actual, sí que es posible hacerse una idea de su magnitud.

Dado que la órbita que describe el movimiento de la Tierra respecto del Sol es elíptica, la distancia entre ambos cuerpos varía de un día a otro. Consecuentemente, en aquellos momentos en que la Tierra está más alejada, recibirá menos energía y al contrario cuando esté más próxima. Para calcular cada día la radiación extraterrestre recibida, basta con multiplicar el valor promedio anual, que representa la constante solar, por un factor que toma en consideración la distancia a la que se encuentra la Tierra del Sol en el día en cuestión. Según esto, el día en que estamos más lejos del Sol, en junio, la irradiancia extraterrestre es un 3.3% inferior a la constante solar y un 3.3% superior, el día de diciembre, en que estamos más cerca.

Aunque se han sugerido algunas ideas, por ahora de dudosa viabilidad técnica, para la explotación energética de la radiación solar extraterrestre en tierra, lo cierto es que la humanidad sólo usa esta radiación de forma directa para la alimentación de satélites y de la estación espacial. Hoy por hoy, para el aprovechamiento energético en tierra, lo que realmente nos interesa no es la radiación extraterrestre, sino la que finalmente alcanza nuestra superficie después de atravesar la atmósfera. Además de atenuar la radiación solar que le llega, la atmósfera también modifica la distribución de su energía entre las distintas bandas del espectro. Esto último puede ser de importancia relevante en determinadas aplicaciones, como la fotovoltaica. La atenuación tiene su origen en los fenómenos de absorción y dispersión, que se producen cuando la radiación, procedente del Sol, interacciona con las moléculas y las partículas presentes en la atmósfera terrestre. La dispersión de la radiación solar por las moléculas de aire, en un día claro, es la que hace que veamos el cielo de color azul, mientras que la absorción de los ultravioletas más energéticos, los B y los C, por parte del ozono presente en las capas altas de la atmósfera nos protege de daños en la piel e incluso de alteraciones del ADN. Volviendo por un momento a las grandes cifras, la energía solar disponible, cada año, sólo en la superficie de los continentes de nuestro planeta es del orden de 25000 teravatios-año, lo que representa aproximadamente 1500 veces la demanda mundial de energía en el mismo periodo. Como curiosidad, Pouillet en 1832 calculó que el calor recibido del Sol en la superficie de la Tierra era igual al necesario para fundir una capa de hielo de 14 m de espesor extendida sobre todo el globo terráqueo.

La parte de la radiación solar que no es dispersada por la atmósfera y que llega siguiendo la dirección de los rayos del sol recibe el nombre de radiación directa. La proporción que, en el conjunto anual de la energía recibida, supone esta componente depende mucho de la latitud, de las condiciones climáticas particulares del lugar y de la posición del plano de captación. Como ejemplo, en Pamplona, sobre un plano horizontal, fue del 45% en el 2007 y del 53% en el 2008. Dado su carácter direccional, es la radiación que puede ser concentrada. Distintos procedimientos de concentración permiten alcanzar densidades energéticas que van, desde las equivalentes a unos pocos soles, hasta las correspondientes a varios miles de ellos. Ya en 1774 el célebre químico francés Lavoisier desarrolló un horno solar, en el que la radiación directa era concentrada en dos lentes, y, con él, llevó a cabo experimentos de calentamiento de metales y de diamante. Cien años más tarde, en la exposición mundial de París de 1878, se presentó una pequeña planta solar de producción de vapor que empleaba un disco parabólico para concentrar esta componente de la radiación solar. Actualmente, la radiación directa es la útil en las plantas solares termoeléctricas. En una modalidad de éstas, un cíclope gigante –una torre de varias decenas de metros de altura– recibe en su único ojo, los rayos procedentes de la reflexión del sol en centenares de espejos, denominados heliostatos. Luego, con el calor procedente de toda esa energía concentrada, se genera electricidad de una forma similar a como se hace en una central térmica convencional. Simplemente el sol sustituye al gas natural, al carbón, al fuel-oil o al uranio. La idea de concentrar la radiación solar con espejos no es nueva, cuenta la leyenda como Arquímedes los utilizó para incendiar los barcos romanos que sitiaban Siracusa allá por el 213 a. de C. Reconstrucciones experimentales, realizadas hace pocos años, han demostrado que, aunque técnicamente pudiera ser posible, la eficacia del invento como arma de guerra es dudosa. En todo caso, el almirante romano al mando sólo tenía que haber mantenido la flota fuera del punto de encuentro de los rayos concentrados y esperar pacientemente a un día nublado.

De toda la radiación solar que es dispersada por la atmósfera, una parte es devuelta al espacio y otra llega a la Tierra en forma de lo que se conoce como radiación difusa. Como resultado, la radiación solar global recibida en la Tierra es la suma de dos componentes básicas: la directa, antes comentada, y la difusa. Esta última tiene un carácter multidireccional, se trata de una radiación que vemos llegar desde todos los puntos de la bóveda celeste excluido el disco solar y, gracias a ella, disfrutamos de luz natural en aquellos lugares o momentos en los que el sol se encuentra ocultado u oscurecido, durante los periodos diurnos. La radiación difusa también puede ser aprovechada energéticamente y, aunque puede ser isotrópica bajo determinadas condiciones de cielo muy particulares, en general su intensidad varía a lo largo del cielo. Cualquiera puede dar fe de la anisotropía de la radiación difusa con dos sencillas observaciones. Al mirar hacia el sol en un día calmoso o cubierto con nubes finas, se puede apreciar como hay una zona del cielo que rodea al disco solar y que brilla casi tan intensamente como éste. Se trata de la corona o de la aureola correspondiente a

la radiación difusa circunsolar. Por otro lado, si en un día claro al contemplar el cielo se baja la mirada desde el cenit hasta el horizonte, se puede observar como su color cambia, desde un azul intenso y homogéneo, hasta un blanco brillante en la zona próxima al encuentro con la tierra. Esa franja constituye la denominada banda de brillo de horizonte de la radiación difusa.

Con algunos de los datos que se han introducido anteriormente, y al margen de consideraciones más o menos subjetivas, debería haber quedado clara la importancia de la radiación solar como recurso energético para la humanidad. Para su aprovechamiento en un lugar concreto es necesario proceder a su evaluación de forma previa. Esto es, debemos ser capaces de cuantificar la energía solar que en cada momento se recibe en dicho lugar y, si fuera necesario, cómo se distribuye esa energía en las distintas bandas de su espectro. Es importante, por ejemplo, conocer la distribución espectral de la radiación para evaluar el efecto de las modernas láminas selectivas que se colocan, con distintas finalidades, en los cristales de los edificios o, cuando se pretenda un aprovechamiento luminoso de dicha radiación, interesará la energía presente en la banda que contiene ondas cuya longitud va desde los 380 hasta los 780 nm, ya que el resto no sensibilizarían el ojo humano.

Hoy se dispone, básicamente, de dos procedimientos para cuantificar la radiación solar. El primero consiste en calcularla mediante el empleo de modelos físico-matemáticos que encadenan una serie de algoritmos, el segundo, en medirla directamente.

A partir de la constante solar y su distribución espectral, dos tipos de modelos pueden ser usados para el cálculo de la radiación terrestre y su distribución espectral, los primeros resuelven de forma rigurosa las ecuaciones de transferencia radiativa y contemplan la complicada estructura de la atmósfera terrestre, teniendo en cuenta sus distintas capas; los segundos, más simples, parametrizan las transmitancias de sus principales elementos atenuadores (moléculas de aire, ozono, aerosoles, vapor de agua y gases uniformemente mezclados). Los modelos rigurosos son generalmente usados por los científicos de la atmósfera para explorar los efectos de los constituyentes de ésta en la atenuación cualitativa y cuantitativa del espectro solar. Son muestra de ellos, entre otros, el LOWTRAN que data de los años 70 ó los más recientes MODTRAN, 5S, LibRadTran y DISORT. El elevado detalle que se precisa en sus datos de entrada, su complejidad global y las limitaciones de sus salidas, los hace inapropiados en aplicaciones de ingeniería. En este ámbito, son preferibles los modelos del segundo tipo, a pesar de que siguen obligando a repetir los mismos cálculos, de forma separada para las radiaciones directa y difusa, una y otra vez, para cada una de las bandas en que se haya dividido el espectro solar extraterrestre de partida, antes de obtener, por suma, la radiación conjunta que al final llega a la superficie terrestre. Desde que Moon, allá por 1940, propusiera el primer modelo espectral dirigido a aplicaciones de ingeniería, muchos investigadores han centrado su labor en este

asunto. Es reconocido que el trabajo de Leckner, publicado en 1978, marcó un hito en este campo. Su modelo ha servido de base para otros posteriores que han intentado mejorarlo, pero que a la postre, sólo han conseguido mejoras tangibles en el caso de la radiación difusa, siendo muy limitadas en la radiación directa. Habitualmente, la información mínima que requieren estos modelos como datos de entrada incluye: la posición del Sol, la presión atmosférica, la cantidad de ozono, la de agua precipitable y la turbidez de aerosoles. De hecho, los espectros de las radiaciones directa y difusa están fuertemente influenciados por las características ópticas de estos últimos. Se trata de partículas suspendidas en la atmósfera, de gran diversidad de formas, tamaños y orígenes, que la enturbian reduciendo la visibilidad y constituyen el dato más complicado de obtener con precisión de todos los enumerados en la lista anterior. Son aerosoles, por ejemplo, las partículas enviadas a la atmósfera como consecuencia de las erupciones volcánicas que, cuando son importantes, producen cambios apreciables en la radiación solar recibida durante periodos relativamente largos de tiempo y en áreas muy extensas. Baste recordar como la violenta erupción del Pinatubo, ocurrida en Filipinas en 1991, produjo una reducción de la radiación solar sobre la tierra que, a su vez, supuso un enfriamiento transitorio del planeta. Como efecto colateral también propició un considerable número de publicaciones científicas en las que se recogían las modificaciones que debían ser introducidas en los modelos preexistentes y como tendrían que ir suavizándose con el paso del tiempo.

En aquellos casos en que el conocimiento de la distribución espectral no sea necesario, es posible emplear modelos físicos aún más simplificados que tratan de manera conjunta la radiación solar sin considerar su descomposición en las distintas longitudes de onda y que se podrían denominar de banda ancha. La facilidad y rapidez de su cálculo, que puede hacerse manualmente sin recurrir a ordenadores, los ha hecho populares. Por ejemplo, son utilizados en diversos procedimientos de control de calidad de datos de radiación, como el empleado en la confección del Atlas Europeo de Radiación Solar. No obstante, el incremento en la velocidad de cálculo de los ordenadores y la mejora en la precisión y versatilidad de los modelos espectrales para ingeniería, como es el caso del SMARTS de Gueymard, está haciendo que éstos vayan ganando terreno rápidamente.

Una debilidad importante de la mayoría de los modelos físico-matemáticos, sean espectrales o no, es que sólo son aplicables a condiciones de cielos sin nubes. No es que los investigadores hayan pasado por alto el que la presencia de nubes es frecuente, sino que es muy complejo modelar su influencia y prácticamente imposible hacerlo de forma determinista. En efecto, cualquiera puede experimentar como el oscurecimiento del sol por parte de una nube opaca situada en el lugar apropiado reduce dramáticamente la irradiancia recibida en un determinado punto. También es observable como la reflexión de la radiación desde la misma nube, que se ha movido hacia otro lugar y que ahora se vería con un color blanco brillante, puede reforzar la

radiación recibida en dicho punto. En definitiva, el hecho de que idénticas proporciones de nubes en el cielo, de distinto tipo o dispuestas de forma diferente, puedan producir considerables variaciones en la irradiancia solar recibida es un problema que trae de cabeza a aquellos que tratamos de realizar cálculos de radiación solar bajo cielos con nubes, en periodos cortos de tiempo como pueden ser los horarios o los diezminutales. Algunas veces, después de haber elaborado e implementado complicados algoritmos para la determinación de la radiación en presencia de nubes, la disparidad entre sus resultados y las observaciones obliga a reconsiderar todo el problema, llevando, incluso, a dudar de la fiabilidad de los equipos de medida adecuadamente calibrados y presumiblemente precisos. Entonces, al contrastar la valoración que la sociedad hace de la investigación frente a otras actividades, los investigadores experimentan un cierto desanimo, mas aún si se comprueba como la situación no parece haber mejorado sensiblemente con el tiempo. Así, Echegaray, ingeniero, catedrático de Física Matemática y premio Nobel de literatura, a principios del siglo pasado ya advertía que: *«El cultivo de las Altas Matemáticas no da lo bastante para vivir. El drama más desdichado, el crimen teatral más modesto, proporciona mucho más dinero que el más alto problema de cálculo integral»*.

A pesar de todo, Nann y Riordan en 1991 propusieron un modelo espectral que puede ser aplicado a cielos con nubes, pero la consideración de estas últimas se hace mediante la inclusión de un simple factor modificador que fue empíricamente determinado. Por su parte, el METSTAT de Maxwell usado para generar datos de radiación solar en la red nacional de EEUU (NSRDB) es un modelo de banda ancha que también contempla la presencia de las nubes e introduce una parte estadística para intentar reflejar el carácter aleatorio de la posición de las mismas. Pero sus resultados hora a hora no son muy precisos y sólo es capaz de dar una buena representación de la distribución típica de los valores de la radiación horaria a lo largo de un mes.

Resulta evidente que otra forma de conocer la radiación solar que se recibe en un determinado punto de la tierra es simplemente midiéndola. Los primeros desarrollos realizados por los europeos Herschel, Bellani y Pouillet de equipos rudimentarios, destinados a medir la intensidad de la radiación solar, de una forma científica y sistemática, datan de la tercera década del siglo XIX. En nuestro país habría que esperar casi 30 años para que Rico y Sinobas realizara en Madrid, entre diciembre de 1854 y el verano de 1855, la primera serie de observaciones actinométricas. Para ello utilizó un actinómetro que inventó el citado Herschel a raíz de una experiencia ciertamente molesta para él. En un viaje que estaba realizando por Europa para visitar a varios científicos decidió pasar de Francia a Italia a través de los Alpes por el Monte Cenis y la exposición al sol le produjo tales quemaduras que escribió: *«El efecto de quemado de los rayos del sol sobre cada una de las partes expuestas de la piel fue tan severo como para excitar en mi mente un vivo deseo de desarrollar algún medio preciso de medida de la causa de tan desagradable efecto»*. Rico y Sinobas era catedrático de Física de la Universidad

Central y autor, entre otras, de una memoria tan curiosa como vigente, titulada *Causas que producen las constantes sequías de las provincias de Murcia, Alicante y Almería*. Gracias a su concienzudo trabajo y pacientes anotaciones, se sabe que a primera hora del día uno de enero de 1855 el cielo presentaba: «*Cirrostratos muy transparentes en las inmediaciones del disco solar; que había brisa y que una niebla que se aproximaba por el sudoeste se hallaba muy próxima*» y, también, como evolucionaban las medidas de radiación solar cada minuto y medio. Además de la búsqueda de la constante solar ya citada, otros acontecimientos mundiales han propiciado el refinamiento de los equipos de medida. Es el caso de la crisis de la energía y el correspondiente impulso de la energía solar ocurridos en la década de los 70 y, más recientemente, la preocupación por el cambio climático global que ha estimulado la investigación en un campo en el que una pieza crucial es, precisamente, la interacción con la atmósfera tanto de la radiación solar como, de la reemitida por la superficie terrestre.

Hoy día hay piranómetros, pirheliómetros y espectrorradiómetros capaces de medir las radiaciones, global, difusa y directa, así como su distribución espectral. Los pirheliómetros de cavidad absoluta, que se mueven apuntando permanentemente al sol, pueden medir la irradiación sin necesidad de acudir a instrumentos de referencia, con un margen de error inferior al 0.3%. Una red de estaciones de medida de alta precisión de irradiancia sobre superficie terrestre, conocida como BSRN (*Baseline Surface Radiation Network*) promovida a finales de los años 80 por el Programa Mundial de Investigación del Clima –con el fin de validar los códigos climáticos y las medidas efectuadas desde satélites, y monitorizar los cambios en la irradiancia a largo plazo– tiene repartidas más de cincuenta estaciones entre los cinco continentes. Por su parte, el Centro Mundial de Datos de Radiación de San Petersburgo procesa permanentemente datos de radiación solar suministrados por más de 500 estaciones localizadas en 56 países diferentes, y opera un archivo con más de 1200. Pero existen muchas más estaciones de diversa índole registrando datos de radiación solar. Las hay que tienen como finalidad la investigación y el desarrollo, y normalmente realizan medidas de las componentes básicas de la radiación solar y de parámetros específicos que son el objeto de investigaciones concretas. En las estaciones de este tipo no es, en general, prioritaria la continuidad a largo plazo de los datos, por lo que no resultan útiles para la caracterización de climas locales. Otras, en cambio, tienen objetivos climáticos y registran medidas de un número limitado de variables fundamentales de forma rutinaria y a largo plazo. También las hay que tienen como misión servir de soporte de información a un determinado proyecto o instalación y, consecuentemente, los parámetros registrados están relacionados con la finalidad de aquél. En Navarra, aproximadamente el 84% de las 61 estaciones meteorológicas automatizadas registran medidas de radiación solar global.

Los datos proporcionados por las estaciones meteorológicas convencionales son adecuados cuando se evalúa el potencial solar en zonas abiertas, en las que la ausen-

cia de obstáculos naturales o artificiales hace que se reciba radiación desde toda la bóveda celeste. No obstante, tal evaluación se hace más compleja cuando se trata del aprovechamiento solar en entornos urbanos tanto, pasivo (arquitectura bioclimática) como activo (termosolar y fotovoltaico). La presencia de obstáculos, como edificios cercanos, que pueden ocultar el disco solar u otras porciones del cielo hace, por un lado, que la radiación celeste recibida sea menor que la esperada en ausencia de ellos y, por otro, que deban ser contempladas las aportaciones procedentes de las reflexiones de la radiación sobre los mismos. El impacto que tales obstáculos pueden tener sobre los citados aprovechamientos ha llevado al estado de California a promulgar una normativa que protege el derecho al sol de los consumidores. Otros estados planean aprobar normativas similares. Fernández Flórez en un artículo titulado *La propiedad inmaterial* en el que se hacía eco de cómo una reciente construcción sombreaba la casa de un amigo, ya reclamaba una reglamentación que salvaguardase el derecho al sol, argumentando que: «¿No formaban ya parte de su casa la alfombra luminosa que tendía en el suelo, desde la ventana del mediodía, el buen sol encendido por Dios cada mañana, o los dibujos que recortaba en la pared del despacho?».

La reducción de la radiación solar producida por la presencia de un determinado obstáculo no es constante, sino que depende del momento del año por dos motivos: el primero es que el movimiento del sol puede hacer que en unos instantes éste sea visible y en otros no, es decir, que haya momentos en que la radiación solar directa sea interceptada por el obstáculo y otros en los que no; el segundo es que dada la variabilidad en la claridad y nubosidad, puede que haya ocasiones en que el citado obstáculo oculte una zona brillante del cielo y otras en que la zona ocultada emita poca radiación. Cualitativamente, la situación es fácil de explicar y entender, pero cuantitativamente, hay que enfrentarse de nuevo a la aleatoriedad de la posición y características de las nubes y de la cantidad de algunos elementos atenuadores de la atmósfera. En definitiva, en el caso de entornos complejos, se vuelve interesante no sólo conocer cuánta radiación se recibe en un determinado lugar, sino en que cuánta llega desde cada punto o zona de la bóveda celeste, o lo que es lo mismo, es importante conocer como se distribuye direccionalmente la radiación en el hemisferio visible.

El aprovechamiento pasivo de la radiación solar no debe tener un carácter exclusivamente térmico. Un diseño inteligente apoyado en el conocimiento preciso de la luz natural –esto es, de una de las bandas del espectro de radiación solar– puede economizar energía de iluminación y aumentar el grado de confort.

Existe, de hecho, un paralelismo entre las medidas de luz natural, técnicamente de iluminancia, y de radiación solar, técnicamente irradiancia. Hoy existen fotómetros que son capaces de medir con precisión la iluminancia global o sus componentes difusa y directa. También los escasos equipos comerciales, *sky scanners*, que miden la radiancia desde distintos puntos de la bóveda celeste, miden su equivalente de ilu-

minación. A semejanza de la red BSRN de estaciones de medida de radiación solar, el Programa Internacional de Medida de Luz Natural, auspiciado por la Comisión Internacional de Iluminación, ha hecho posible disponer, hoy día, de varias decenas de estaciones de alta precisión de medida de iluminación natural repartidas por el mundo y denominadas habitualmente como estaciones IDMP (*International Daylight Measurement Programme*).

Los pioneros en la determinación de la constante solar utilizaron medidas terrestres para obtener valores extraterrestres. En la actualidad, una potente línea de trabajo en evaluación de radiación solar, que viene desarrollándose desde hace 30 años, sigue el camino inverso. Esto es, el de obtener estimaciones de la radiación terrestre a partir de medidas registradas en sensores situados fuera de la atmósfera en satélites geoestacionarios. Se trata de un procedimiento que combina los datos proporcionados por los equipos de medida con las ecuaciones de los modelos matemáticos. Su principal ventaja es que permite realizar una estimación de la radiación solar, que geográficamente es casi continua, soslayando la necesidad de una tupida red de estaciones en tierra. Esta característica es de gran importancia para los países menos desarrollados que, en muchos casos, tienen un alto potencial solar. En realidad lo que el sensor de radiancia colocado en el satélite detecta no es la radiación solar incidente en la Tierra, sino la que es devuelta al espacio como consecuencia de la reflectancia o albedo de la atmósfera y de la superficie terrestre. Se aprovecha, así, la capacidad de las ondas electromagnéticas de transportar, además de energía, información acerca de los medios en que se originan y de aquellos a través de los que se propagan. También en este caso existen distintos modelos matemáticos de diferente complejidad. Desde los modelos físicos de resolución de la ecuación de transferencia radiativa, aplicados con éxito a la observación de puntos objetivo en limitadas áreas y dentro de estudios de cambio climático, hasta los modelos estadísticos más simples, que son indicados en estudios de recursos solares de ámbito regional. Actualmente, los errores observados al comparar las estimaciones de radiación hechas desde satélites con las medidas en tierra están cercanos a los mínimos teóricamente alcanzables y derivan principalmente de dos causas: los propios errores de medida y la genuina microvariabilidad del campo de irradiancia dentro de cada uno de los píxeles observados por el satélite. En la medida en que la resolución espacial de las imágenes de los satélites mejore, hoy día es del orden de 1km x 1km, se irá reduciendo la segunda causa de error. En cualquier caso, las estimaciones de radiación solar por satélite en un determinado lugar ya son mejores que las que se podrían hacer, a partir de datos de estaciones meteorológicas cercanas, mediante interpolación geográfica, cuando éstas se encuentran a más de 25 km del lugar en cuestión.

La creciente penetración de la energía solar en los sistemas energéticos globales requerirá de información de futuro, de predicciones cuantitativas, de las condiciones de insolación. Tales predicciones son útiles para optimizar la operación y seguridad de las plantas de potencia, equilibrar y estabilizar las redes eléctricas, reconocer cue-

llos de botella en la producción y vender el producto en el mercado eléctrico. En este sentido, predicciones de corto plazo (de una a varias horas) son requeridas para la previsión de la regulación de sistemas de energía solar. Para aplicaciones puntuales, métodos estadísticos como las cadenas de Markov y modelos autorregresivos, basados en series temporales de medidas regionalmente representativas, han demostrado su utilidad. Técnicas fundamentadas en inteligencia artificial, como las redes neuronales, parecen incluso dar mejores resultados. Por otro lado, las predicciones a largo plazo (más allá de 24 horas en adelante) de la irradiancia solar están conectadas con modelos numéricos de pronóstico general del tiempo.

Hasta aquí se ha hablado de las características básicas de la radiación solar y sus componentes, de su enorme potencial energético y de que, para evaluarla en un determinado lugar, se pueden emplear modelos matemáticos de diversa complejidad y alcance, equipos de medida, o un procedimiento que podría considerarse mixto como es el de la estimación mediante satélite. Es el momento de hacer unos breves comentarios sobre los posibles aprovechamientos energéticos de esta radiación solar. En primer lugar conviene establecer una división entre los que podrían considerarse como aprovechamientos directos y los que en cambio son indirectos.

Los aprovechamientos directos de la radiación, de lo que habitualmente se conoce como energía solar, son aquellos en los que se produce una transformación directa de esta fuente de energía primaria, en energía final o útil para el usuario. En este sentido, los dos aprovechamientos directos básicos, que hoy se pueden llevar a cabo a nivel comercial, son el fotovoltaico y el térmico. Otros como la producción de combustibles como el hidrógeno, por fotólisis del agua, todavía se encuentran en fase de investigación.

Las células fotovoltaicas transforman directamente la radiación solar en electricidad y son un ejemplo de aplicación en el que es interesante considerar a la radiación como corpuscular. De hecho, lo que las células fotovoltaicas hacen es captar los fotones energéticamente eficientes de la radiación solar, los cuantos de luz con suficiente energía, para producir electrones libres en su seno que, al ser extraídos hacia un circuito eléctrico externo proporcionan potencia eléctrica. Se trata de una tecnología relativamente reciente que se apoya en descubrimientos realizados en la primera mitad del siglo pasado. La gran mayoría de las células utilizadas en el mundo en los sistemas de generación fotovoltaica son de silicio cristalino. No obstante, es de esperar que las denominadas células y módulos de lámina delgada, que pueden ser fabricados con distintos materiales y procedimientos, experimenten un notable crecimiento en el futuro propiciado por su menor coste, su fácil integración arquitectónica o el menor consumo energético de sus procesos de fabricación.

En la actualidad, las eficiencias máximas de los módulos fotovoltaicos planos de alto rendimiento que reciben directamente la radiación solar, como en las conocidas

huertas solares, se sitúan en el entorno del 22%. Eficiencias mucho mayores, del orden del 41%, han sido reportadas en células multicapa, bajo radiación concentrada y en condiciones de laboratorio. En fase de comercialización ya existen sistemas fotovoltaicos que, utilizando células de triple unión con rendimientos del 38% y sistemas de concentración de doble etapa que son capaces de suministrar a dichas células la radiación correspondiente a centenares de soles, pueden convertir más de una cuarta parte de la radiación recibida en electricidad útil.

A nivel mundial, algunos estudios realizados, sobre hipótesis muy optimistas en cuanto al impulso de la fotovoltaica y la eficiencia en el consumo, predicen que dentro de 20 años la energía solar fotovoltaica podría aportar el 14% de las necesidades de electricidad del mundo.

En la energía solar térmica, los sistemas captadores transforman directamente la radiación solar en calor que es transferido a un fluido para su posterior utilización. Su principio de funcionamiento se basa en el conocido efecto invernadero. Actualmente la mayoría de los sistemas termosolares son de baja temperatura, destinados a la producción de agua caliente sanitaria o calefacción de ambientes y piscinas. En ellos, el fluido calentado a su paso por la superficie del absorbente selectivo, con una alta capacidad de absorción de radiación solar y un bajo poder emisor, alcanza temperaturas inferiores a 100° C, normalmente entre 40 y 60° C. Sus rendimientos dependen mucho de la aplicación a que vayan dirigidos, pudiéndose encontrar en un intervalo que está comprendido entre el 50% y el 75% en condiciones normales de funcionamiento. La presencia de estos sistemas se está haciendo habitual en nuestros paisajes urbanos y se verá incrementada como consecuencia de la aplicación de normativas de reciente promulgación. La idea subyacente en este aprovechamiento térmico no es ni mucho menos nueva, como lo demuestra el que la primera patente española de colectores solares fue solicitada en 1921 por el Ingeniero Agrónomo Sancho Peñasco. Se trata de una tecnología madura y asentada que se enfrenta a dos retos importantes: el de su introducción en procesos industriales, probablemente del sector agroalimentario y el de la producción de frío. Aunque es posible que las temperaturas de trabajo para estas aplicaciones tengan que ser superiores a las antes indicadas, requiriendo sistemas termosolares de media temperatura, hoy ya existen realizaciones comerciales de refrigeración solar con paneles de baja temperatura. Previsiones optimistas pronostican que, en Europa, dentro de 10 años, habrá una superficie total instalada equivalente a un metro cuadrado de panel por cada habitante, lo que proporcionaría una energía de 320 GWth al año, aproximadamente la cuarta parte del potencial de esta energía de la Unión Europea.

Por último, los aprovechamientos térmicos a alta temperatura se destinan principalmente a la producción de electricidad, constituyendo una línea específica de desarrollo, bajo el nombre de energía solar termoeléctrica en las plantas CSP (*Con-*

centrating Solar Power). Las primeras centrales termoeléctricas datan de los años 80 y tuvieron una fuerte implantación en California. En nuestro país, la Plataforma Solar de Almería (PSA) construida por esa época, ha servido de campo de investigación para distintas tecnologías termoeléctricas. De hecho, las que utilizan concentradores cilíndrico-parabólicos y las de torre, ya comentadas, son hoy día una realidad industrial, con plantas en funcionamiento en Andalucía que alcanzan rendimientos del 17%, en un sector que está experimentando un fuerte crecimiento a nivel mundial. Según un reciente artículo publicado en la revista generalista *TIME* con esta tecnología el desierto del Sahara, una tierra de escaso valor económico, podría convertirse en una fuente potencial de energía para Europa en el futuro. Los cálculos realizados demuestran que, con el 0.2% de la superficie del mayor desierto del mundo, se podría suministrar electricidad a 500 millones de europeos. El mayor problema no parece estar en la generación mediante plantas como las señaladas, sino en el transporte y distribución de toda la energía producida. En cualquier caso, este planteamiento perpetuaría un modelo energético centralizado y la dependencia del exterior.

Varias fuentes de energía renovable pueden ser consideradas como aprovechamientos indirectos de la radiación solar. Así, es ésta la que suministra la energía a la gran máquina térmica que es la atmósfera terrestre para producir los gradientes de presión responsables del movimiento de las masas de aire y, en última instancia, de la energía eólica. La radiación solar también está en el origen de la energía hidráulica ya que es la que hace posible la evaporación de las masas de agua y su posterior transporte hacia zonas de la superficie terrestre en las que posee mayor energía potencial. Asimismo, la biomasa y los biocombustibles, producidos a partir de la fotosíntesis, son muestras de aprovechamientos indirectos de la radiación solar. De hecho, la disponibilidad anual de energía solar es varios órdenes de magnitud superior a la del conjunto de las demás energías renovables.

Si se asume la teoría imperante acerca de la formación del petróleo, este combustible fósil, del que depende en gran parte nuestra economía, es un recurso energético que la naturaleza ha tardado cientos de millones de años en producir. Es resultado de un complicado proceso de conversión, de bajísimo rendimiento, cuya fuente de energía primaria fue la radiación solar, la luz que brilló en nuestro planeta hace millones de años.

Tal vez se esté asistiendo al ocaso de la economía del petróleo y la humanidad se enfrenta a una situación nueva. Ciertamente, en el crepúsculo de la madera como fuente energética básica, ya se sabía que sería reemplazada por el carbón, y en el declinar de éste también se sabía que el petróleo sería su sustituto. Hoy, sin embargo, no se sabe cuál será la energía imperante cuando el petróleo se agote. Se habla del *mix* de energía lo que no deja de reflejar que, por ahora, no se prevé que haya una claramente dominante.

A pesar de todo, los humanos nos comportamos como si los recursos fueran inagotables, seguimos utilizando vehículos que consumen una reliquia de radiación solar, en lugar de consumir la que cada día recibimos, y dilapidamos la energía en muchos otros ámbitos. Probablemente estemos mal acostumbrados y confiados en que, como ha ocurrido en el pasado, la tecnología, al final, responda a las necesidades de la humanidad.

Bibliografía

BP Statistical Review of World Energy 2008.

Euroobserver (2008). Solar Thermal Barometer. **187**, 141-157.

Fernández W. (1957). La propiedad inmaterial. *Semana*. Octubre.

Green M.A., Emery K., Hishikawa Y. and Warta W. (2009). Solar Cell Efficiency Tables (Version 33). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. **17**, 85-94.

Kidwell P.A. (1981). Prelude to solar energy: Pouillet, Herschel, Forbes and the solar constant. *Annals of Science*. **38**, 457-476.

Perez R., Aguiar R., Collares-Pereira M., Dumortier D., Estrada-Cajigal V., Gueymard C., Ineichen P., Littlefair P., Lund H., Michalsky J., Olseth J.A., Renné D., Rymes M., Skartveit A., Vignola F. and Zelenka A. (2001). Solar resource assessment: A review. In *Solar Energy The State Of The Art*, Gordon F. (Ed) pp 497-575. James & James, London.

Perez R. and Perez M. (2009). A fundamental look at energy reserves for the planet. *Draft for publication in the IEA/SHC solar update*.

Petty G. W. (2004). *A First Course in Atmospheric Radiation*, 445 pp. Sundog Publishing, Madison.

Sánchez J. M. (1999). *Cinzel, martillo y piedra*, 468 pp. Santillana, Madrid.

Walt V. (2009). Could the solar energy that bakes the Sahara one day power all of Europe? Dreamers believe so. *TIME*. January, 42-43.