

# Capítulo 1

## BREVE HISTORIA DE LA ENERGÍA NUCLEAR

ENTRE LOS FENÓMENOS conocidos por la humanidad, tal vez la radiación sea el que peor se comprende. Incluso hoy, cuando se sabe perfectamente cuáles son sus efectos, la palabra *radiación* sigue suscitando una exagerada reacción de temor en la mayoría de las personas. Durante las eufóricas décadas de estudio que siguieron a su descubrimiento a finales del siglo XIX, la gente, en su ignorancia, tenía una actitud más despreocupada. La investigadora más conocida entre los pioneros de la radiación, Marie Curie, murió en 1934 de una anemia aplásica contraída durante las décadas en las que se expuso (sin protección) a aquellas sustancias débilmente luminosas que guardaba en los bolsillos o los cajones de su escritorio. Junto a su marido Pierre, llevó más allá el descubrimiento crucial de los rayos X efectuado por Wilhelm Röntgen en 1895, trabajando incansablemente en «un cobertizo abandonado utilizado previamente como sala de disección de la Facultad de Medicina»,<sup>1</sup> dentro de los terrenos de la Universidad de París. La propia Curie, en sus anotaciones, declara: «Uno de nuestros placeres consistía en entrar en la sala de trabajo por la noche... los tubos brillantes parecían lucecitas decorativas».<sup>2</sup> Mientras investigaba el uranio, la pareja descubrió y bautizó nuevos elementos químicos, como el torio, el polonio y el radio, y ambos dedica-

ron mucho tiempo a estudiar los efectos de aquellas ondas tan inusuales que irradiaban estos cuatro elementos. Marie llamó *radiación* a esas ondas y su trabajo fue merecedor del Premio Nobel. Hasta entonces, se creía que el átomo era la partícula más pequeña que existía. Se aceptaba que los átomos eran unidades indivisibles y que constituían las piezas de construcción del universo. La revelación de Curie de que la radiación se generaba cuando los átomos se rompían fue revolucionaria.

Curie descubrió que el radio fluorescente destruía las células humanas enfermas más rápidamente de lo que destruía las células sanas, lo cual generó a principios del siglo xx un sector completamente nuevo que vendía las propiedades (imaginadas, en su mayor parte) de este nuevo y mágico elemento a un público mal informado e ignorante. Algunas figuras autorizadas alimentaron esta moda, como el doctor C. Davis, quien escribió en el *American Journal of Clinical Medicine*: «La radiactividad previene la demencia, suscita emociones nobles, retrasa el envejecimiento y propicia una vida espléndida, juvenil y alegre».<sup>3</sup> Esferas de relojes (de pared o de pulsera), uñas, tableros de instrumentos militares, miras de armas e incluso juguetes infantiles brillaban por efecto del radio, pintado a mano en las fábricas por jovencitas que trabajaban para la United States Radium Corporation. Las confiadas artesanas lamían sus pinceles (ingiriendo al hacerlo partículas de radio) para mantener afilada la punta durante su precisa labor, pero con el paso de los años sus dientes y cráneos empezaban a desintegrarse. Radithor, el «arma moderna de la ciencia curativa» y una muestra de los diversos productos medicinales del radio de la época, se anunciaba jactanciosamente como una cura para el reumatismo, la artritis y la neuritis.<sup>4</sup> Los cosméticos y

los dentífricos de radio que prometían una piel y unos dientes jóvenes gozaron de gran popularidad durante unos años, al igual que otros productos que presumían de su condición de radiactivos: había condones, chocolate, cigarrillos, pan, supositorios, lana, jabón y colirios de radio, además del llamado *radioendocrinador escrotal* (del mismo genio que nos regaló el Radithor) para potenciar la virilidad, e incluso arena de radio para areneros infantiles, que su creador anunciaba como «más higiénica y [...] más beneficiosa que el barro de los balnearios de fama mundial». <sup>5</sup> La gente no tuvo conciencia ni admitió la verdadera peligrosidad del radio (que es en torno a 2,7 millones de veces más radiactivo que el uranio) hasta las décadas de 1930 y 1940. <sup>6</sup>

El intenso trabajo para desvelar los secretos del átomo prosiguió durante los primeros años del siglo xx, en los que los científicos europeos realizaron importantes avances. <sup>7</sup> En 1932, el físico inglés James Chadwick descubrió el neutrón, un hallazgo que le valió el Nobel. Era la pieza que faltaba para completar el rompecabezas. Con el descubrimiento de Chadwick se desentrañaba la estructura del átomo: un átomo se componía de un núcleo (la región central de protones y neutrones) rodeado de electrones. La era atómica había dado verdadero comienzo.

Varios años más tarde, en 1939, físicos como Lise Meitner, Otto Frisch y Niels Bohr determinaron que cuando el núcleo de un átomo se partía y generaba nuevos núcleos (un proceso llamado fisión nuclear) liberaba grandes cantidades de energía, y una reacción en cadena de fisión nuclear era algo factible. La noticia traía consigo la teoría de que, en potencia, tal reacción en cadena podía aprovecharse para generar un sumi-

nistro infinito de energía limpia destinado a barcos, aviones, fábricas o viviendas; o también podía desatarse desde un arma de inmensa fuerza destructiva. Justo dos días antes del comienzo de la Segunda Guerra Mundial, Bohr y John Wheeler publicaron un artículo en el que sugerían que la fisión funcionaría mejor en un medio donde se introdujera un «moderador» para ralentizar la velocidad de los neutrones que se mueven en el átomo, pues con ello dichos neutrones tendrían más probabilidades de chocar y dividirse.<sup>8</sup>

Cuando se conocieron mejor los peligros de los productos radiactivos y su popularidad en el ámbito civil se hundió, la desesperación y la urgencia de la Segunda Guerra Mundial trajo más avances extraordinarios en el sector. En un principio, Gran Bretaña era el país más comprometido con la tarea de desentrañar los secretos de un arma de fisión. Alemania tenía un programa nuclear, pero su interés principal era desarrollar un reactor de energía. Tras el ataque japonés a Pearl Harbour el 7 de diciembre de 1941, Estados Unidos (que antes se había concentrado en la propulsión nuclear naval) empezó a investigar la fisión con mayor profundidad y destinó enormes recursos al desarrollo de una bomba atómica. En un año, el primer reactor nuclear del mundo, Chicago Pile-1, fue construido en la Universidad de Chicago como parte del Proyecto Manhattan estadounidense, bajo la supervisión del Nobel de física Enrico Fermi. El reactor, descrito en una famosa frase por Fermi como «una rudimentaria pila de ladrillos negros y vigas de madera»,<sup>9</sup> alcanzó por primera vez el punto crítico (consiguió una reacción en cadena automantenida) el 2 de diciembre de 1942. Con el grafito como moderador, el reactor no tenía ni blindaje antirradiación ni ningún tipo de sistema de

refrigeración.<sup>10</sup> Era una temeridad, un riesgo enorme asumido por Fermi, quien hubo de convencer a sus colegas de que sus cálculos eran lo suficientemente precisos como para descartar una explosión.

Josef Stalin se enteró de que los Estados Unidos, Gran Bretaña y Alemania estaban investigando la fisión cuando un físico llamado Georgi Flerov, que regresaba del frente, advirtió que todos los estudios de física nuclear habían desaparecido de las revistas científicas internacionales de reciente publicación. El joven (que ahora cuenta con un elemento químico artificial bautizado en su honor: el flerovio) detectó que todos los artículos habían sido clasificados como confidenciales y escribió una carta a Stalin en la que insistía en la importancia de tal ausencia con estas palabras: «Construyamos la bomba de uranio sin dilación».<sup>11</sup> El dictador tomó nota y dedicó más recursos a las posibilidades de la energía de fisión. Ordenó al prominente científico ruso Ígor Kurchátov que se centrara en coordinar la información del Proyecto Manhattan obtenida mediante el espionaje, y que iniciara una investigación secreta a fin de determinar qué necesitarían los soviéticos para construir una bomba. Para que el secreto fuera absoluto, Kurchátov puso en marcha un nuevo laboratorio oculto en la boscosa periferia de Moscú.

Las fuerzas aliadas declararon la victoria sobre Alemania el 8 de mayo de 1945, tras lo cual Estados Unidos centró su atención en Japón. Mientras tanto, Kurchátov había hecho rápidos progresos, pero seguía por detrás de los estadounidenses, quienes bajo la dirección de Robert Oppenheimer probaron con éxito el primer artefacto atómico a las 05:29:21 del 16 de julio de 1945, cerca de Alamogordo, Nuevo México.<sup>12</sup> Como

era la primera vez que se realizaba un ensayo con un arma de potencial tan devastador y no se habían constatado sus consecuencias, Fermi se ofreció a aceptar apuestas de los físicos y del personal militar allí presente sobre si la bomba incendiaría la atmósfera y, en caso afirmativo, sobre si destruiría solo el estado o todo el planeta.<sup>13</sup> La explosión, cuyo nombre en clave era *Trinity*, abrió un cráter de 365 metros de diámetro y produjo temperaturas de «decenas de millones de grados Fahrenheit». Asustado por lo que habían presenciado, el físico George Kistiakowsky dijo: «Estoy seguro de que cuando llegue el fin del mundo, en el último milisegundo de existencia de la Tierra, el último hombre verá lo que acabamos de ver».<sup>14</sup> Tan solo tres semanas después, el 6 de agosto, un Boeing B-29 Superfortress modificado para la ocasión dejaba caer la primera bomba atómica sobre la ciudad japonesa de Hiroshima y sobre su población de 350.000 personas. La bomba convirtió 0,6 gramos de uranio en una potencia energética equivalente a 16.000 toneladas de TNT. Tres días más tarde, una segunda bomba fue lanzada sobre Nagasaki. Más de 100.000 personas, la mayoría civiles, murieron de forma instantánea. Japón se rindió al cabo de pocos días: la Segunda Guerra Mundial había llegado a su fin.

A pesar de tan horrenda demostración, en algunos lugares del mundo el miedo fue dando paso al asombro y al optimismo, suscitados por el hecho de que un artefacto tan pequeño pudiera producir tal cantidad de energía. En cualquier caso, el desarrollo armamentista continuó. El primer reactor ruso de producción de plutonio (el plutonio no se encuentra en la naturaleza) empezó a funcionar en Mayak en 1948, y poco después, en agosto de 1949, el primer ensayo con una bomba

atómica se llevó a cabo en los desiertos de Kazajistán.<sup>15</sup> Fuera de la Unión Soviética, en Occidente, la atención se focalizó en cómo utilizar con fines civiles ese potencial energético sin precedentes que proporcionaba la fisión.<sup>16</sup> Cinco días antes de la Navidad de 1951, el pequeño Reactor Experimental Reprodutor Número Uno, construido por los estadounidenses, se convirtió en el primer reactor del mundo que producía electricidad, en este caso la suficiente como para encender cuatro bombillas de 200 vatios.<sup>17</sup> Dos años después, el entonces presidente de los Estados Unidos, Eisenhower, pronunció un discurso en el que anunciaba el programa Átomos para la Paz; Eisenhower declaraba que los Estados Unidos se comprometían con «determinación a ayudar a resolver el temible dilema atómico, y a consagrar todo su corazón y toda su mente a buscar el modo de que la milagrosa inventiva del hombre no esté al servicio de su muerte, sino al servicio de su vida».<sup>18</sup> Átomos por la Paz (en parte un intento genuino por impulsar una infraestructura nuclear civil y una mayor investigación, y en parte un programa propagandístico para silenciar la crítica mundial a la energía nuclear y proporcionar una tapadera para el desarrollo de armas nucleares) propició en última instancia la creación de las centrales nucleares estadounidenses.<sup>19</sup>

Uno de los reactores militares rusos de producción de plutonio se modificó para generar electricidad, y en junio de 1952 el AM-1 (forma abreviada de «Átomo Pacífico 1» en ruso) se convirtió en el reactor de la primera central nuclear civil del mundo, una instalación capaz de generar 6 megavatios de electricidad (MW).<sup>20</sup> Utilizaba el grafito como moderador y el agua como refrigerante, lo que luego serviría como prototipo para los reactores de Chernóbil: los RBMK (Reactor

de condensador de alta potencia). Dos años después, la reina Isabel II inauguraba en Windscale el primer reactor nuclear comercial británico, capaz de generar 50 MW, al tiempo que el Gobierno de Gran Bretaña anunciaba que dicha instalación era «la primera central en todo el mundo en producir electricidad a partir de energía atómica, de manera industrial y a gran escala».<sup>21</sup>

Estas dos superpotencias advirtieron que aquella fuente de energía tenía evidentes posibilidades en el ámbito naval, pues solo necesitaba reabastecerse cada pocos años. Así pues, empezaron a trabajar intensamente para reducir la escala de los diseños de sus reactores. En 1954, la miniaturización había avanzado lo suficiente como para que los estadounidenses botaran el primer submarino nuclear, el USS Nautilus, y al cabo de cinco años tanto Estados Unidos como Rusia dispusieron de barcos de superficie propulsados por energía nuclear.

En 1973, el primer reactor de alta potencia RBMK-1000 (el mismo tipo utilizado en Chernóbil, que por entonces se hallaba en construcción) comenzó a operar en Leningrado. Estados Unidos y la mayoría de los países occidentales se habían centrado en el diseño de reactores de agua a presión (con el agua como moderador y refrigerante) por considerarlos la opción más segura. Desde finales de la década de 1970 hasta principios de la del 2000, la construcción de nuevos reactores se detuvo por dos razones: por la reacción mundial a los accidentes de Chernóbil y de Three Mile Island y por la mejora en la capacidad energética y la eficiencia de los reactores ya existentes. Si nos guiamos por el número de reactores, la energía nuclear alcanzó su punto máximo en 2002, momento en el que había 444 reactores operativos, pero no fue hasta 2006 cuando se ba-



tió el récord de producción eléctrica nuclear: 2.660 teravatio-hora por año natural.<sup>22</sup>

A partir de 2011, la energía nuclear proporcionó el 11,7% de la electricidad mundial, generada con los más de 430 reactores nucleares comerciales repartidos entre 31 países.<sup>23</sup> En conjunto, estos reactores generan 372.000 megavatios de electricidad. En la actualidad, la mayor planta nuclear es la japonesa de Kashiwazaki-Kariwa, cuyos siete reactores son capaces de generar 8.000 MW, aunque hoy en día no está en funcionamiento. Francia es el país con mayor dependencia de la energía nuclear, pues el 75% aproximadamente de su electricidad proviene de plantas nucleares, mientras que Estados Unidos y Rusia rondan un porcentaje del 20%. A finales de 2014, Eslovaquia y Hungría eran los otros únicos países que también producían más del 50% de su electricidad a partir de energía nuclear; aunque Ucrania, donde se ubica Chernóbil, los sigue de cerca: el 49% de su energía todavía se produce por medios nucleares.<sup>24</sup>

La energía nuclear se ha convertido en la fuente energética de preferencia para propulsar los grandes buques de guerra. El punto álgido se alcanzó a principios de la década de 1990, momento en el que había más reactores nucleares en barcos (la mayoría militares y más de 400 en submarinos)<sup>25</sup> de los que había generando energía eléctrica en las plantas nucleares comerciales de todo el mundo.<sup>26</sup> Desde entonces, ese número se ha reducido, pero todavía hay unos 150 barcos y submarinos con reactores nucleares. Rusia está construyendo la primera central nuclear flotante (en una barcaza) para usarla en el Ártico, de modo que podría ser remolcada hasta donde se necesite energía. El *Akademik Lomonosov*, equipado con dos reac-

tores navales modificados procedentes de rompehielos y con una capacidad operativa de 70 MW, está operativo desde julio de 2019.<sup>27</sup> Por más que los rusos proclamen que es la primera barcaza que produce energía nuclear, lo cierto es que la idea de las centrales nucleares flotantes no es nueva. En la década de 1960, los Estados Unidos construyeron la primera de ellas dentro de un buque de la clase Liberty reconvertido tras la Segunda Guerra Mundial, aunque hoy ya no disponen de centrales flotantes operativas. También China está entrando en ese mercado y espera empezar a generar electricidad con su primera central nuclear flotante a lo largo de 2020.<sup>28</sup>

### **Accidentes previos**

No es posible asegurar cuánta gente ha muerto como resultado de los accidentes nucleares, porque a menudo no puede discernirse entre los cánceres y otros problemas médicos causados por la exposición a la radiación y los debidos a otra causa. Tan solo pueden realizarse estimaciones. Al igual que en el caso de Marie Curie, es probable que muchos de los investigadores pioneros de la radiación (y de los primeros pacientes que recibieron dosis demasiado intensas de rayos X)<sup>29</sup> murieran pasado el tiempo (por cáncer o por otras enfermedades relacionadas con la radiación) como consecuencia de su propio objeto de estudio. A pesar de que el trabajo de Curie deterioró su salud (y la de sus compañeros), ella continuó negando los peligros de la radiación hasta su misma muerte en 1934. Sus dos hijos, que prosiguieron el trabajo de la madre y ganaron su propio Premio Nobel, también murieron a causa de la ra-

diación.<sup>30</sup> Ni siquiera existen estadísticas fiables de las muertes debidas al síndrome agudo por radiación, puesto que la Unión Soviética encubrió todos los accidentes graves ocurridos antes de Chernóbil. Y es posible que otros países con capacidad nuclear, más herméticos y tristemente célebres por su corrupción burocrática, como Pakistán, Irán y Corea del Norte, sigan procediendo como los soviéticos.

En los registros públicos, existen alrededor de setenta accidentes nucleares y de radiación que hayan causado muertes. En casi todos ellos, los fallecidos son menos de diez, aunque sin duda han habido otros que se han ocultado.<sup>31</sup> Resulta interesante constatar que muchos de estos incidentes se atribuyen a calibraciones erróneas o al robo de equipos médicos de radioterapia.

Por ejemplo, en septiembre de 1987 más de 240 personas estuvieron expuestas a la radiación en Goiânia (Brasil), después de que unos ladrones desmantelaran una cápsula de acero y plomo robada de un hospital medio en ruinas situado en los alrededores. La cápsula, que contenía cesio radiactivo procedente de una máquina de radioterapia, se guardó en el jardín trasero de uno de los hombres. Allí, durante varios días en los que ambos ladrones acabaron enfermando, la pareja intentó abrir la cápsula hasta que agujerearon la carcasa protectora de acero. Los hombres atribuyeron sus síntomas a algo que habían comido, sin sospechar qué tipo de botín tenían entre manos, de modo que vendieron la cápsula dañada a un chatarrero llamado Devair Ferreira. Aquella noche, Devair vio que el material del interior de la cápsula emitía un resplandor azul y pensó que era valioso, o incluso sobrenatural. Para protegerla, guardó la cápsula en la casa en la que vivía con su mujer

Gabriela, y distribuyó polvo y fragmentos entre sus amigos y familiares. Entre ellos estaba el hermano de Devair, quien dio un poco de polvo de cesio a su hija de seis años. Atraída por el mágico resplandor azul, la niña jugó con el polvo, se lo aplicó como si fuera purpurina e ingirió partículas radiactivas. Dos de los empleados de Devair pasaron un par de días desmontando todavía más la cápsula, a fin de extraer el plomo que contenía.

Gabriela fue la primera en notar que tanto ella como las personas de su entorno se estaban poniendo muy enfermas. Pese a que un médico le dijo que estaba sufriendo una reacción alérgica por algo que había comido (lo mismo que pensaron los ladrones), estaba convencida de que el culpable era el extraño material que tanto había fascinado a la familia. Gabriela reclamó la cápsula a un chatarrero a quien para entonces ya se la habían revendido, y se la llevó (en autobús) a un hospital cercano, donde afirmó que la cápsula «estaba matando [a su] familia». <sup>32</sup> Su presagio impidió que el incidente adquiriera mayor gravedad.

Así pues, el cesio permaneció sin identificar en un patio hasta el día siguiente, cuando un físico médico, invitado en el hospital por otro doctor para investigar, «llegó justo a tiempo para disuadir a los bomberos de su intención inicial de recoger el artefacto para tirarlo al río». <sup>33</sup> Gabriela murió, al igual que su pequeña hija y los dos empleados de Devair. Este último, en cambio, sobrevivió pese a recibir dosis más altas que los cuatro fallecidos. La cápsula se había abierto y transportado varias veces durante aquellas dos semanas, por lo que diversas áreas de la ciudad estaban contaminadas y fue necesario demoler muchos edificios. <sup>34</sup>

El número total de muertos por accidentes relacionados con la energía nuclear empleada con fines civiles es relativamente bajo, mucho más que el de las muertes debidas al carbón convencional, al petróleo o a los accidentes relacionados con la energía hidráulica.

Para poner los datos en perspectiva, conviene fijarse en el total de muertos de los peores accidentes vinculados a las fuentes de energía convencionales. La minería del carbón, con fama de ser peligrosa, aporta una enorme cifra de muertes. Una lista de solo 32 accidentes graves en las minas de carbón arroja un total de casi 10.000 muertos,<sup>35</sup> mientras que todos los accidentes estadounidenses en la minería del carbón desde 1839 han causado más de 15.000 muertos.<sup>36</sup> El peor de estos accidentes ocurrió el 26 de abril de 1942, exactamente 44 años antes de la catástrofe de Chernóbil, cuando una explosión de gas en la mina de carbón de Benxihu, China, produjo la muerte a 1.549 mineros.<sup>37</sup>

En 1998, un oleoducto de la Nigerian National Petroleum Corporation explotó en la aldea de Jesse y causó más de 700 muertos (solo un ejemplo entre las docenas de casos similares ocurridos en Nigeria). Nunca se determinó la causa exacta porque todos los que se hallaban en las inmediaciones del lugar murieron, pero el origen de la explosión fue la falta de mantenimiento o (con igualdad de probabilidades) el sabotaje deliberado de unos saqueadores que pretendían robar petróleo.<sup>38</sup> Otro accidente impresionante de gas y petróleo ocurrió cerca de la ciudad rusa de Ufá. Cuando se produjo una fuga en un gran gasoducto, cerca de un remoto tramo de la vía férrea del Transiberiano, en lugar de localizarla y arreglarla, los trabajadores aumentaron la presión de gas del gasoducto para

compensar la pérdida. La consecuencia fue que gradualmente el valle por el que discurría la tubería se llenó de una mezcla inflamable de bencina, propano y butano, de modo que incluso personas que estaban a más de 8 kilómetros afirmaron oler a gas. El 4 de junio de 1989, dos trenes que circulaban en sentidos opuestos y transportaban a más de 1.200 pasajeros (familias de vacaciones) se cruzaron cerca del gasoducto dañado. Las chispas de las ruedas prendieron el gas allí acumulado y se desencadenó una explosión de «pavorosa violencia» equivalente a 10.000 toneladas de TNT. Las dos locomotoras y sus 38 vagones fueron lanzados fuera de los raíles y quedaron incinerados, según palabras de Mijaíl Moiséyev, general jefe del Estado Mayor del ejército soviético. La explosión fue tan fuerte que «derribó todos los árboles en un radio de cuatro kilómetros», cuenta Moiséyev. El accidente se cobró la vida de 675 personas, de las que más de un centenar eran niños.<sup>39</sup>

El accidente más catastrófico asociado a la energía hidráulica ocurrió durante el supertifón Nina, en 1975, después de que en la provincia china de Henan cayera en 24 horas la lluvia de un año.<sup>40</sup> El Observatorio Meteorológico Central de Pekín había pronosticado 100 litros de lluvia por m<sup>2</sup>, por lo que la gente no estaba preparada para lo que había de venir. En su punto máximo, cayeron 190 litros de lluvia por m<sup>2</sup> en una sola hora.<sup>41</sup> «Siguió lloviendo y los días eran como las noches, mientras el agua caía como flechas –manifiestan los supervivientes según citas recogidas en los archivos oficiales–. Después de la lluvia, las montañas estaban todas cubiertas de gorriones muertos». Justo después de la una de la madrugada del 8 de agosto, la presa de Banqiao se rompió con un ruido que sonó «como si el cielo se estuviera hundiendo y la Tierra se resquebrajara».<sup>42</sup>

Un aluvión imparable de agua provocó entonces una reacción en cadena que causó el colapso de otras 61 presas y embalses. La ola que se produjo, que tenía 11 kilómetros de ancho y avanzaba a 50 kilómetros por hora, dejó la escalofriante cifra de 171.000 personas muertas, destruyó los hogares de otros 11 millones y barrió comunidades enteras.<sup>43</sup>

Existen también algunos accidentes nucleares que vale la pena destacar. Un ejemplo temprano es el de la masa de plutonio de 6,2 kilos que alcanzó el punto crítico en dos incidentes separados, ambos en el laboratorio de investigación nuclear de Los Álamos, Nuevo México (Estados Unidos). Posteriormente, a esta masa se le dio el sobrenombre de «núcleo del demonio». El primer suceso ocurrió el 21 de agosto de 1945, cuando Harry Daghlian estaba trabajando solo y, por accidente, se le cayó un ladrillo reflector de neutrones en el núcleo, lo que provocó una instantánea e incontrolable reacción en cadena.<sup>44</sup> Daghlian sabía lo que estaba sucediendo, pero hubo de desmontar parcialmente el experimento para retirar el ladrillo y, para entonces, ya había recibido una dosis mortal de radiación. Murió veinticinco días después. A pesar de que tras el accidente se revisó el protocolo de seguridad, antes de que pasara un año ocurrió otro incidente con la misma pieza de plutonio. En este caso, el físico Louis Slotin permitió accidentalmente que dos semiesferas reflectoras de neutrones envolvieran el núcleo, lo que hizo que este alcanzara el nivel crítico. Al estar inclinado sobre el núcleo, en menos de un segundo Slotin recibió una dosis mortal y murió nueve días más tarde tras «la total desintegración de sus funciones corporales».<sup>45</sup> Después de este segundo accidente, se dejaron de efectuar experimentos de forma manual y empezaron a utilizarse máquinas especiales ma-

nejadas por control remoto. Acabada la guerra, los científicos colocaron el «núcleo del demonio» en una bomba nuclear y la detonaron bajo el agua en el atolón Bikini. El ensayo formaba parte de la operación Crossroads, un estudio estadounidense cuyo objetivo era probar los efectos de las armas nucleares en los buques de guerra.

El peor accidente nuclear de Gran Bretaña fue consecuencia directa de una reconversión con escasa visión de futuro: la de los dos reactores de producción de plutonio de Windscale (hoy Sellafield, Cumbria) a fin de que produjeran tritio, elemento necesario para una bomba termonuclear. Los reactores, con moderador de grafito y refrigerados por agua, no eran adecuados para la tarea programada, que requería una reacción de fisión más intensa y a temperatura más alta de la que su diseño permitía. Los ingenieros realizaron modificaciones en el núcleo que posibilitaron la producción de tritio a costa de reducir la seguridad. Cuando las pruebas iniciales tuvieron éxito sin causar problemas aparentes, comenzó a producirse tritio a pleno rendimiento y a gran escala. Nadie sabía que modificar el reactor había variado peligrosamente la distribución de calor dentro del núcleo, por lo que el reactor se estaba calentando en exceso en áreas que antes estaban frías y faltaban los sensores adecuados para medir esas temperaturas. En el momento en que se diseñaron los reactores de Windscale, los científicos británicos no habían experimentado cómo respondía el grafito al ser bombardeado con neutrones, por lo que no eran conscientes de que este «sufría dislocaciones en su estructura cristalina que producían una acumulación de energía potencial», la cual podía escapar de forma espontánea en un peligroso estallido de calor. El problema no se detectó hasta que los reactores es-



tuvieron operativos, y entonces ya fue demasiado tarde para rediseñarlos. La solución, bastante poco fiable, fue un proceso de templado lento, en el que el grafito se calentaba y luego se dejaba enfriar, de modo que el grafito calentado volvía a su estado inicial al liberar de forma gradual la energía acumulada.

El 7 de octubre de 1957, los trabajadores de Windscale efectuaron un proceso habitual de templado, calentando y después apagando el reactor para esperar a que se enfriara, pero pronto notaron que la liberación de energía no marchaba según lo previsto. Los operadores calentaron el núcleo una segunda vez, pero en la mañana del día 10 se dieron cuenta de que algo iba mal: la temperatura del núcleo debería haber descendido mientras se liberaba lentamente la energía del grafito, pero no fue así. El combustible de uranio que contenía el reactor estaba en llamas. (Nota: en principio se informó de que lo que ardía era el grafito, pero el análisis posterior mostró que en realidad se había incendiado el uranio). Al desconocer este dato crucial, los operadores aumentaron el flujo de aire en el núcleo para ayudar a enfriarlo, pero eso no hizo sino avivar las llamas. Entonces se dieron cuenta de que los monitores de radiación montados en la parte superior de la chimenea estaban en el tope máximo de la escala. Una rápida inspección manual del reactor reveló que estaba ardiendo y que llevaba así dos días enteros. Tras esforzarse desesperadamente por extinguir las llamas, primero con dióxido de carbono y luego con agua, el director de Windscale, Tom Tuohy, dio orden de evacuar a todo el personal excepto al estrictamente necesario, apagó el aire de refrigeración y cerró la ventilación. A continuación, subió varias veces hasta el altísimo tiro de la chimenea para examinar directamente la parte trasera del reactor y asegurarse de

que el fuego se apagaba. Más tarde diría: «Me hice a un lado, esperando tener suerte, pero si estás mirando directamente al núcleo de un reactor apagado te vas a llevar una buena dosis de radiación».<sup>46</sup>

El incidente, ya de por sí espantoso, habría desembocado en catástrofe de no ser por el llamado «disparate de Cockcroft». *Sir John Cockcroft* era el director del Centro de Investigación de la Energía Atómica del Reino Unido y había ganado en 1951 el Premio Nobel de Física, junto con Ernest Thomas Sinton Walton, «por su trabajo pionero sobre la transmutación de los núcleos atómicos mediante partículas atómicas aceleradas artificialmente».<sup>47</sup> Cuando Windscale ya estaba medio construido, Cockcroft intervino e insistió, rechazando todas las objeciones, en que se instalaran unos caros filtros de radiación. Los filtros se añadieron y dieron como resultado unas protuberancias características en la chimenea a las que se llamó el «disparate de Cockcroft»... hasta que su presencia impidió la catastrófica propagación de partículas radiactivas por toda el área. Durante casi treinta años, siguieron sin hacerse públicos todos los hechos relativos al accidente, pero en 1983 un informe de la Junta Nacional de Protección Radiológica británica estimó que, probablemente, 260 personas habían contraído cáncer de tiroides a causa del incidente, y otras 30 ya habrían fallecido o «sufrido daños genéticos capaces de causar enfermedades o la muerte a sus descendientes».<sup>48</sup> Lo sucedido en Windscale se consideró el peor accidente causado por un reactor hasta que ocurrió el de Three Mile Island, y el suceso es en sí mismo una historia fascinante. Recomiendo alguna lectura al respecto en esta nota.<sup>49</sup>

En Estados Unidos, el primer accidente grave con un reactor, el único en la historia del país en causar muertes que

se sepa, tuvo lugar el 3 de enero de 1961 en el reactor experimental SL-1 del ejército estadounidense.<sup>50</sup> Durante unas tareas de mantenimiento, los ingenieros debían desconectar la gran barra de control principal de sus motores y luego, para reconectarla, era necesario que el operador, el especialista del ejército John Byrnes, levantara manualmente la barra unos pocos centímetros. Byrnes retiró demasiado la barra y ello provocó que al instante el reactor entrara en estado crítico. El agua del interior del núcleo se vaporizó y explotó, lo que originó una onda de presión que golpeó desde dentro la cubierta del reactor y empujó la vasija hacia arriba, de modo que las barras de control y los tapones de blindaje salieron eyectados. Uno de estos tapones entró por la inglete del electricista Richard C. Legg y le salió por el hombro, de tal manera que quedó empalado y clavado al techo. Legg se hallaba en la parte superior del reactor en el momento de su muerte. Asimismo, el agua y el vapor provocaron la muerte del propio Byrnes, y un aprendiz que se hallaba cerca también falleció después a causa de las heridas. Algunos sugieren que tal vez no se tratara de un accidente, sino de un suicidio criminal, pues Byrnes sospechaba que su mujer le estaba engañando con otro operador de su mismo turno.<sup>51</sup>

En lo referente a accidentes con reactores de submarinos, dos sobresalen del resto. El 4 de julio de 1961, el submarino K-19 armado con misiles balísticos sufrió una fuga grave en el sistema de refrigeración del reactor, lo que provocó que fallaran por completo las bombas de refrigeración. Aunque las barras de control se habían insertado en el núcleo para neutralizar la reacción, el calor por desintegración nuclear (resultado del decaimiento de los radioisótopos que generan calor

mientras pierden energía, un proceso que, por otro lado, contribuye en gran medida al calor del núcleo terrestre) elevó la temperatura interior a 800 °C. En la fase de construcción del reactor, un soldador había permitido que cayera una gota de soldadura en una tubería de refrigeración, lo que produjo una grieta microscópica. Durante un ejercicio, la grieta se abrió por efecto de la presión. El capitán Nikolái Zatéyev se dio cuenta de que no tenía más alternativa que crear un sistema de refrigeración improvisado para el reactor, lo cual se hizo cortando una válvula de purga de aire y soldándole una tubería de agua. Según Aleksandr Fateyev, miembro de la tripulación: «Habría sido un Chernóbil, solo que treinta años antes». La solución de urgencia funcionó, pero toda la tripulación recibió grandes dosis de radiación, y los seis valientes que entraron en el compartimento del reactor para trabajar en las tuberías murieron en pocas semanas, envenenados por la radiación. A ellos les seguirían otros dieciséis. «Allí mismo, su apariencia empezó a cambiar –recordaría el capitán Zatéyev tras la caída de la Unión Soviética–. La piel que no cubría la ropa empezó a enrojecerse, la cara y las manos, a hincharse. Les salieron unos puntos de sangre en la frente, bajo el cabello: al cabo de dos horas ya no éramos capaces de reconocerlos. La gente murió plenamente consciente, con dolores terribles. No podían hablar, pero sí susurraban. Nos imploraban que los matásemos». Pasado el tiempo, el suceso sería recreado en la película *K-19: The Widowmaker*, protagonizada por Harrison Ford.<sup>52</sup>

Más de dos décadas después,<sup>53</sup> el 10 de agosto de 1985, el submarino K-431 de la clase Echo-II fondeaba en las agitadas aguas de la bahía de las instalaciones navales de Chazhma, al sureste de Vladivostok, en la triple frontera entre Rusia, China

y Corea del Norte. El submarino, de veinte años de antigüedad, se hallaba en la fase final de los diez pasos que componían el proceso de reabastecimiento. Este proceso requería separar las barras de control de la tapa del reactor de doce toneladas; después había que elevar esta última con una grúa cuyo brazo debía extenderse sobre el agua desde un barco cisterna situado en el lateral, para así permitir la colocación de los nuevos elementos combustibles. Pues bien: la tapa del reactor se había recolocado, las barras de control se habían vuelto a acoplar y el sistema de refrigeración se había reabastecido de agua, pero los trabajadores del submarino descubrieron que la tapa no se había sellado perfectamente. Sin esperar la debida autorización, levantaron la tapa con la grúa unos pocos centímetros para solucionar el problema, dejando las barras acopladas para ahorrar tiempo. En ese preciso momento, el peor posible, un barco torpedero del ejército pasó rápidamente y creó una estela lo suficientemente violenta como para sacudir el barco cisterna y el brazo de la grúa. El movimiento hizo que la tapa y las barras de control acopladas se separaran del núcleo y el reactor alcanzó de inmediato el punto crítico, lo que derivó en una explosión de vapor que lanzó fuera del compartimento el contenido del núcleo y destruyó el casco de presión del submarino. La explosión mató a ocho oficiales y dos operadores, y hubo otros 290 que recibieron dosis considerables de radiación durante las cuatro horas de lucha para controlar el fuego.<sup>54</sup> El accidente se mantuvo en secreto hasta que en 1993 se publicó un volumen de documentos desclasificados, una vez desaparecida la Unión Soviética.

## Kyshtym

El suceso conocido como «desastre de Kyshtym» ocurrió cerca de la ciudad cerrada rusa de Cheliábinsk-65, a 120 kilómetros de la frontera con Kazajistán. La existencia de ciudades cerradas era un secreto muy bien guardado durante la Guerra Fría (incluso entre los mismos ciudadanos de la Unión Soviética), porque albergaban a trabajadores de instalaciones nucleares cercanas, fábricas de armamento u otros importantes centros industriales. Ni aparecían en mapas ni en señales de tráfico, no se permitían visitantes sin permiso expreso del Gobierno y los residentes que salían de la ciudad tenían prohibido decir a los de fuera dónde vivían o trabajaban. Con tanto secreto, el desastre acabó recibiendo el nombre de *Kyshtym* por la ciudad conocida más cercana. Además de albergar una de las mayores fábricas de tanques rusas, Cheliábinsk-65 se hallaba cerca de los reactores de producción de plutonio ubicados en Mayak (destinados a armamento nuclear) y de la planta de reprocesamiento, una de las instalaciones nucleares más grandes del país y el lugar donde se fabricó la primera arma nuclear. El Gobierno soviético no era conocido precisamente por su compasión hacia el pueblo en lo referente a seguridad, ni por su preocupación por el medio ambiente, y Mayak no era una excepción, como prueba la larga lista de accidentes nucleares y barbaridades ecológicas que allí tuvieron lugar en las décadas posteriores a su finalización en 1948. En la época de la catástrofe que recibiría el nombre de *Kyshtym*, las instalaciones de Mayak ya habían contaminado el área circundante con constantes vertidos nucleares y químicos en la red de los ríos Techa-Iset-Tobol y los lagos cercanos, hasta el punto de

que, décadas después, el lugar sería considerado como el más contaminado de la Tierra.

Mayak refrigeraba parte de sus residuos nucleares en tanques de acero y hormigón enterrados, cada uno de los cuales contenía 300 m<sup>3</sup> (unas 80 toneladas) de materiales. En algún momento de septiembre de 1957, uno de los sistemas de refrigeración de los tanques falló. La temperatura del interior empezó a elevarse debido al calor por desintegración nuclear sin que nadie detectara nada ni siquiera cuando la temperatura se situó en torno a los 350 °C. En la tarde del 29 de septiembre de 1957, la presión acumulada provocó que el tanque explotara con una fuerza de entre 70 y 100 toneladas de TNT, lo que hizo saltar por los aires la tapa de hormigón de 160 toneladas, dañando los dos tanques adyacentes y arrojando 740.000 terabecquereles de partículas radiactivas al aire, el doble que en Chernóbil.

El viento preponderante del noreste propagó la nube radiactiva por una extensión de más de 20.000 km<sup>2</sup>, y 800 km<sup>2</sup> quedaron seriamente contaminados. Resulta imposible encontrar estadísticas médicas fiables, puesto que las autoridades ocultaron el accidente a la opinión pública y no se creó ningún registro para realizar un seguimiento sanitario de los afectados. Tras un (injustificable) retraso inicial de una semana, más de 10.000 personas fueron evacuadas de sus casas durante los siguientes dos años. A quienes cayeron enfermos, los médicos les diagnosticaron la «enfermedad especial», puesto que no podían mencionar la radiación mientras las instalaciones de Mayak fueran secretas. Y funcionó: el accidente permaneció oculto hasta 1976, cuando Zhores Medvédev (que luego escribiría el excelente *The Legacy of Chernobyl* [«El legado de Chernóbil»]) expuso el suceso en un artículo para *New Scientist*. Al incidente se le adju-

dicó entonces el nivel 6 en la Escala Internacional de Accidentes Nucleares, lo que lo situaba como el tercero peor de la historia. Lev Tumerman, un científico soviético que había pasado por la zona en 1960, corroboró las afirmaciones de Medvédev. Tumerman declaró que «a unos 100 kilómetros de Sverdlovsk, una señal de la autopista advertía a los conductores de que no se pararan en los siguientes 20 o 30 kilómetros y condujeran a máxima velocidad. A ambos lados de la carretera, hasta donde alcanzaba la vista, la tierra estaba “muerta”: no había pueblos ni ciudades, solo las chimeneas de las casas destruidas; no se veían cultivos ni pastos ni ganado ni gente... Nada».<sup>55</sup> Trascendió que la CIA era conocedora del accidente desde hacía más de quince años, pero había guardado silencio para evitar que el miedo a las instalaciones nucleares se extendiera entre la población estadounidense.

Diez años después, Mayak volvió a sufrir otro grave accidente radiactivo. El Karachay es un pequeño lago situado en un lugar que había servido de vertedero de residuos radiactivos durante más de una década. Los vertidos al lago prosiguieron tras la explosión, y mediada la década de 1960 estaba tan contaminado que, en esa época, permanecer una hora en la orilla bastaba para recibir una dosis radiactiva letal. Los años 1965 y 1966 fueron especialmente secos, con lo que el lago empezó a secarse. Durante una sequía ocurrida en la primavera de 1967, las zonas más bajas del lago se evaporaron por completo y los sedimentos radiactivos quedaron expuestos a la atmósfera. Una violenta tormenta barrió la zona y esparció las partículas contaminadas en un área de varios cientos de kilómetros desde el lecho completamente seco del lago, de modo que 185.000 terabecquerels de radiactividad (la misma cantidad liberada por la bomba de Hiroshima) se depositaron sobre



medio millón de personas, las mismas personas irradiadas por la explosión de Mayak diez años antes. Años más tarde, el lago se rellenó con miles de bloques huecos de hormigón para impedir que se repitiera de nuevo el suceso.<sup>56</sup>

Los accidentes soviéticos no se produjeron solo en instalaciones militares.<sup>57</sup> Los operadores de la central nuclear de Beloyarsk estuvieron expuestos a una fuerte radiación en 1977 como consecuencia de una fusión parcial del núcleo, y también un año después, durante el incendio de un reactor. Pese a todos estos sucesos, las autoridades soviéticas continuaron manteniendo en público que su programa nuclear era absolutamente seguro. Lev Feoktistov, vicedirector del Instituto I. V. Kurchátov de Energía Atómica (que toma el nombre de su fundador y es hoy la institución rusa más importante en desarrollo e investigación nuclear) coescribió un artículo en la revista *Soviet Life* un año antes del accidente de Chernóbil. En él afirmaba: «... en los treinta años que siguieron a la inauguración de la primera planta nuclear soviética, no hubo un solo caso en el que los lugareños o el personal de la planta estuvieran seriamente amenazados, ni hubo ningún problema en las operaciones habituales que pudiera haber ocasionado la contaminación del aire, del agua o del suelo. Estudios exhaustivos llevados a cabo en la Unión Soviética han demostrado que las centrales nucleares no afectan a la salud de la población».<sup>58</sup>

### **Three Mile Island**

Entre los accidentes ocurridos en plantas nucleares, el más conocido antes de Chernóbil es el de la central estadounidense

de Three Mile Island (TMI), Pensilvania, que tuvo lugar el 28 de marzo de 1979 cuando un fallo de refrigeración provocó la fusión del recién estrenado segundo reactor. Aunque no hubo heridos, el de Three Mile Island es considerado el peor accidente en la historia de la energía nuclear estadounidense. De modo similar a Chernóbil, en él se combinaron una compleja serie de negligencias y errores de consecuencias casi catastróficas.

Once horas antes del accidente, mientras se intentaba limpiar un filtro de condensado, un bloqueo persistente obligó a los trabajadores a inyectar aire comprimido en una tubería de agua, con la intención de que la fuerza del agua limpiara el filtro. La idea funcionó, pero también provocó un inadvertido goteo de agua que se fue filtrando en el sistema de control de las bombas de alimentación de agua. Este fallo no se descubrió hasta que el accidente hubo concluido.

Once horas después, a las cuatro de la madrugada, una pequeña avería en el circuito secundario, no nuclear, de refrigeración de agua impidió una adecuada disipación del calor y provocó que subiera la temperatura del refrigerante primario. El reactor de TMI se apagó y la reacción en cadena se detuvo, pero el calor por desintegración nuclear siguió aumentando la temperatura del núcleo. Por sí solo, esto no suponía un problema, pues los reactores nucleares están diseñados teniendo en cuenta el calor por desintegración, por lo que se instalan múltiples sistemas de seguridad de repuesto, automáticos e independientes, a fin de evitar un accidente. Sin embargo, por una desafortunada coincidencia, las tres bombas de refrigerante auxiliares que también se activaron fueron incapaces de bombear agua, porque sus válvulas se habían cerrado para

efectuar un mantenimiento de rutina. El calor por desintegración del núcleo generó una acumulación de presión, de modo parecido a como sucedió en Mayak, y eso causó que se abriera la válvula de alivio operada por piloto (PORV por su sigla en inglés) del presurizador, lo que estabilizó el nivel de presión. Entonces las cosas empezaron a ir mal. La avería mecánica ocurrida once horas antes entró en juego impidiendo que la válvula volviera a cerrarse. Los operadores del segundo reactor supusieron erróneamente que la válvula se había cerrado, pues sus tableros de control indicaban que se le había enviado una señal de «cerrado» (pero no cuál era la verdadera posición de la válvula). Por ello, no se dieron cuenta de que el refrigerante llevaba varias horas escapando del sistema, y eso les llevó a dar los pasos equivocados.

Con el refrigerante escapándose con rapidez, el ordenador de control inyectó en el sistema agua de emergencia de los tanques presurizados, para compensar. Aunque un considerable volumen de esta agua inyectada también se salió a través de la válvula PORV, por los sensores de agua del presurizador pasó una cantidad suficiente como para engañar a los operadores, que creyeron que en el sistema de refrigeración había demasiada agua. Así que su respuesta fue reducir el flujo de agua de repuesto, con lo que sin querer dejaron al reactor falto de agua y permitieron que el vapor se acumulara peligrosamente en el sistema de refrigeración primario. Cuando en un fluido se forman burbujas de vapor que luego se rompen, emiten ondas de choque de alta presión que pueden dañar las tuberías. El fenómeno se llama cavitación. El personal de la sala de control de TMI, que todavía pensaba que había suficiente agua circulando por el sistema de refrigeración, cerró las bombas para

impedir dicho fenómeno. Al reducirse los niveles de agua, la parte superior de los elementos combustibles del interior del núcleo fue quedando al descubierto. Esto provocó que alcanzaran temperaturas extremas y se fundieran, con lo cual se liberaron partículas radiactivas en el agua que quedaba. Durante todo este proceso, los operadores del reactor intentaban averiguar por todos los medios qué estaba fallando.

Solo cuando a las 6 a. m. se cambió el turno de la sala de control, la mirada fresca de los recién llegados detectó que la temperatura de la válvula PORV era más alta de lo esperado. A las 6:22 a. m. los operadores cerraron una válvula de bloqueo auxiliar situada entre la válvula de seguridad y el presurizador. La pérdida de refrigerante cesó, pero para entonces el vapor sobrecalentado impedía la circulación por inercia del agua, de modo que poco a poco los operadores aumentaron la presión inyectando agua presurizada en el sistema de refrigeración. Dieciséis horas después de que comenzara el desastre, la presión subió lo suficiente como para volver a accionar las bombas primarias sin temer que se produjera cavitación. La medida funcionó: la temperatura del reactor cayó, pero no antes de que la mitad del núcleo y el 90% del envainado de seguridad del combustible se hubieran fundido. El suceso no derivó en catástrofe absoluta gracias a la vasija de presión del reactor, un enorme blindaje metálico que rodea al núcleo y que aloja sus restos radiactivos fundidos. Un tipo de contenedor vital del que, precisamente, carecían los reactores RBMK de Chernóbil.<sup>59</sup>

Al igual que en la ciudad ucraniana, se anunció a los cuatro vientos que la causa del accidente de TMI era el error de los operadores, pero unos meses después la propia comisión pre-

sidencial del presidente estadounidense Jimmy Carter llegó a conclusiones más pragmáticas.<sup>60</sup> Su informe detectó muchas áreas que podían mejorarse. «Si bien el entrenamiento puede haber sido el adecuado para la operatividad de la planta en circunstancias normales, no se prestó suficiente atención a los posibles accidentes graves que pudieran sobrevenir». Asimismo, el informe reconocía que algunos «procedimientos operativos aplicables a este accidente son cuando menos bastante confusos, por lo que pueden interpretarse de un modo que lleve a los operadores a adoptar las medidas incorrectas que, efectivamente, tomaron». El informe también apuntó problemas con la confusa interfaz de control: «La sala de control, desde la cual se opera [con el reactor], presenta carencias de muchos tipos. El tablero de mandos es demasiado grande y tiene cientos de alarmas, y algunos indicadores cruciales están colocados en lugares donde los operadores no pueden verlos... Durante los primeros minutos del accidente, saltaron más de cien alarmas, y no existía ningún sistema que eliminara las señales menos importantes, de modo que los operadores pudieran concentrarse en las alertas más relevantes». Por último, el eterno problema de no aprender de los errores del pasado también tuvo su parte de responsabilidad, pues trascendió que un incidente similar había ocurrido en otra planta estadounidense hacía poco más de un año, un suceso del que, sin embargo, no se informó a los operadores del resto del país.<sup>61</sup>

Si bien estos incidentes provocan inquietud cuando se los examina de manera aislada, es importante recordar que la energía nuclear sigue siendo con creces el método de producción energética menos dañino que existe. Basándose en los datos históricos de producción, los científicos de la NASA cal-

cularon en 2013 que la energía nuclear había impedido una media de 1,84 millones de muertes asociadas a la contaminación del aire, así como la emisión de 64 gigatoneladas de CO<sub>2</sub>, el equivalente a los gases de efecto invernadero que se habrían emitido con la quema de combustibles fósiles entre 1971 y 2009.<sup>62</sup> Los datos se basaban en las plantas europeas y estadounidenses, que suelen ser más limpias que las de otros lugares del mundo, lo que significa que probablemente esas cifras sean en realidad más altas. Según un estudio del profesor asociado Teng Fei, de la Universidad Tsinghua, la contaminación por carbón en China provocó la alarmante cifra de 670.000 muertes en 2012,<sup>63</sup> mientras que la media mundial de muertes asociadas a la misma causa es de 170 por teravatio-hora (TWh) de electricidad generada. En comparación, los datos de 2012 muestran que la electricidad generada con petróleo causa 36 muertes por TWh; con biocombustibles, 24 muertes por TWh; con energía eólica, 0,15 muertes por TWh; la hidroelectricidad, si incluimos el desastre de Banqiao, causa 1,4 muertes por TWh, pero, aunque no lo incluyéramos, debe considerarse que provoca la devastación generalizada del paisaje circundante. La energía nuclear, incluyendo los casos de Chernóbil y Fukushima, es responsable de 0,09 muertes por teravatio-hora.<sup>64</sup>