

Como a genética contribuiu para compreender os efeitos biológicos da exposição humana à radiação ionizante de Césio-137?



Lorrayne Guimarães Oliveira³, Samara Socorro Silva Pereira³,
Elza Maria Gonçalves Santos Uchoa³, Daniela de Melo e Silva³,
Emília Oliveira Alves Costa¹, Thaís Cidália Vieira Gigonzac^{2,3},
Cláudio Carlos da Silva^{1,2,4}, Aparecido Divino da Cruz^{1,2,3}

¹Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Escola de Ciências Médicas e da Vida, Programa de Mestrado em Genética, Grupo de Pesquisa Replicon, Goiânia, GO

²Laboratório de Citogenética Humana e Genética Molecular, Secretaria Estadual de Saúde de Goiás

³Universidade Federal de Goiás, Programa de Pós-Graduação em Genética e Biologia Molecular, Instituto de Ciências Biológicas, Campus Samambaia, Goiânia, GO

⁴Universidade Estadual de Goiás, Unidade de Goiânia, Goiânia, GO

Autor para correspondência - acruz@pucgoias.edu.br

Palavras-chave: césio-137, radiação, mutação

Há 34 anos ocorreu em Goiânia, Goiás (Brasil), o maior acidente radiológico em área urbana, tendo como consequência a exposição humana, animal, vegetal e ambiental pelo Césio-137. As vítimas do acidente manifestaram contaminação externa e/ou interna a radiações ionizantes para doses que variaram até 7 Gy e se viu a necessidade do acompanhamento da saúde genética dessas pessoas. Tecidos biológicos são extremamente vulneráveis à radiação ionizante que pode causar acúmulo gradual de danos no DNA, por exemplo. As exposições a baixas doses, por sua vez, causam uma **instabilidade genômica progressiva**. Melhorias nas tecnologias de análise genômica proporcionaram a chance de investigar, com alto nível de precisão, diversos tipos de biomarcadores, possibilitando uma estimativa real do risco genético de populações exposta à RI.

Histórico do acidente em Goiânia com Césio-137

Em 13 de setembro de 1987, em Goiânia, capital do Estado de Goiás, foi encontrada uma cápsula de chumbo de um equipamento de teleterapia descartada pelo Instituto Goiano de **Radioterapia** (IGR), num local abandonado e parcialmente demolido sem qualquer advertência ou avisos sobre os riscos associados ao equipamento.

Dois sucateiros, que passavam pelo local abandonado e vendo aquele monte de ferro e chumbo desprezados, presumiram que o material poderia ter algum valor como sucata. Removeram os destroços do local, levaram para casa e, posteriormente, para um ferro velho para serem comercializados (Figura 1).

O cabeçote de chumbo era a blindagem para 19,26 g de cloreto de césio-137, um sal radioativo comumente usado para o tratamento do câncer. A blindagem foi rompida e a fonte radioativa do equipamento liberada. Subsequentemente, as partes foram levadas ao ferro velho. A ruptura da fonte permitiu acesso ao cloreto de césio que era altamente solúvel e prontamente dispersável no meio ambiente. Ao se deparar com aquele sal, o dono do ferro velho, sem entender o que de

fato era aquilo, notou que, no escuro, o pó que saía da cápsula emitia uma luz azul reluzente (Figura 1B). Fascinado com aquela descoberta, mostrou o material radioativo para amigos, vizinhos e familiares (Figura 1C).

Com isso, o césio-137 radioativo, liberado da cápsula, passou a circular na região central de Goiânia, contaminando pessoas e ambientes por onde espalhou. O irmão do dono do ferro-velho, ao visitá-lo levou um pouco da substância para casa, pois também ficou intrigado com aquele fenômeno. Chegando em casa, mostrou para os filhos, incluindo a filha de 7 anos, que ficou deslumbrada com aquele pó e brincou durante horas com ele. Durante o jantar, ela ingeriu os alimentos com as mãos contaminadas com o sal radioativo (Figura 1D).

Após alguns dias, diversas pessoas exibiram sintomas gastrointestinais resultantes da exposição à radiação, como náuseas, vômitos e diarreia. Uma das vítimas pressupôs que os sintomas eram em virtude do pó e, com a ajuda de um funcionário do ferro velho, levou a cápsula de Césio-137 de ônibus à Vigilância Sanitária de Goiânia que, em menos de 24 horas, identificou a substância como radioativa (Figura 1E).

A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), policiais e bombeiros militares foram acionados no dia 29 de setembro, dando início à descontaminação da região

Instabilidade genômica -

Nome dado à ocorrência de efeitos numa célula irradiada e em suas descendentes. Mesmo após várias gerações da célula parental irradiada, a instabilidade pode ser observada.

Radioterapia -

especialidade médica na qual se utilizam radiações ionizantes para tratamento oncológico. A radiação é emitida por um aparelho, que fica distante do paciente, apontado para o local a ser tratado.

e a mitigação dos riscos para a população local. Mais de 112,8 mil pessoas foram monitoradas, 249 pessoas estavam contaminadas, entre estas, 120 possuíam roupas e sapatos contaminados e 129 manifestaram contaminação externa e /ou interna com o radionuclídeo (Figura 1F). Dezenas de pessoas apresentaram a síndrome aguda da radiação e, dentre elas, uma passou por

cirurgia de amputação do antebraço e 4 pessoas foram a óbito na fase aguda do acidente. Atualmente, os rejeitos radioativos provenientes do acidente radiológico com césio-137 estão depositados em um repositório permanente em Abadia de Goiás, em uma Unidade de Conservação Ambiental de 160 hectares, sob vigilância e monitoramento constante da CNEN.



Figura 1. Linha do tempo dos eventos do acidente com Césio-137 em Goiânia (Goiás – Brasil). **A:** Dois sucateiros tiraram a cápsula dos escombros para vendê-la. **B:** O dono do ferro velho, que comprou a cápsula, percebeu que, no escuro, o pó possuía um brilho azul. **C:** O dono do ferro velho mostrou a cápsula aos vizinhos e amigos. **D:** A sobrinha do dono do ferro velho ingeriu um ovo com as mãos sujas de Césio-137. **E:** Duas vítimas levaram a cápsula para a Vigilância Sanitária de ônibus. **F:** Monitoramento da exposição da população à radiação ionizante.

Em 1988, a partir da necessidade de acompanhamento da população exposta ao Césio-137, o governo de Goiás instituiu a Fundação Leide das Neves Ferreira, nome de uma das vítimas fatais do acidente. As competências dessa fundação foram transferidas em 1999 para a Secretaria Estadual da Saúde de Goiás que, atualmente, conta com o Centro de Assistência aos Radioacidentados (C.A.R.A). O C.A.R.A possui atribuições de atendimento médico, odontológico, psicológico, assistência farmacêutica e social e monitoramento biológico mediante pesquisas científicas para a avaliação da saúde genética da população exposta e seus familiares.

Neste artigo, reunimos dados sobre o monitoramento da saúde genética dos indivíduos expostos acidentalmente e ocupacionalmente à radiação ionizante de césio-137, realizado pelo Núcleo de Pesquisa Replicon da PUC Goiás, em parceria do Laboratório de Citogenética Humana e Genética Molecular que faz parte do Laboratório Central da Secretaria de Saúde do Estado de Goiás (LaGene/LACEN/SES-GO), durante as três décadas de acompanhamento da saúde genética da população goiana exposta à radiação ionizante.

Afinal, por que o Césio-137 é radioativo?

O Césio-137 foi descoberto em 1860 por Robert Wilhelm Bunsen e Gustave Robert Kirchhoff na água mineral de Durkheim, na Alemanha, por espectroscopia de emissão da luz azul, de onde deriva seu nome em latim, *caesium*, céu azul. O césio possui 31 isótopos, dentre eles, apenas o isótopo 133 é estável e naturalmente presente em dois minérios, polucita e rodozita. Todos os outros isótopos são radioativos e denominados radionuclídeos ou radioisótopos.

Um radionuclídeo é um átomo energeticamente instável, que possui núcleos atômicos com o mesmo número de prótons, mas diferentes números de nêutrons. Portanto, ao estabilizar o núcleo, emite radiação ionizante. Este fenômeno é conhecido com decaimento. No caso do Césio-137, o decaimento ocorre pela liberação de partículas β , que são elétrons de alta energia (pósitrons), e fica com excesso de prótons, transformando-se em bário radioativo e que, por emissão de radiação gama, é uma onda eletromagnética formada por fótons altamente energéticos. Assim, o Césio-137 decai para o um estado estável de bário (Ba-137) (Figura 2). A radiação ionizante emitida pelo césio-137 é utilizada para fins médicos em radioterapia e braquiterapia para o tratamento de tumores malignos responsivos à radioterapia.



Braquiterapia - Tratamento oncológico através do qual a radiação será emitida de uma fonte de dentro do corpo do paciente, em contato com o local a ser tratado.

Tumores malignos - São células replicadas de maneira desordenada e descontrolada, formando os tumores que, geralmente, desenvolvem-se rapidamente e podem proliferar pelo corpo, invadindo tecidos vizinhos.

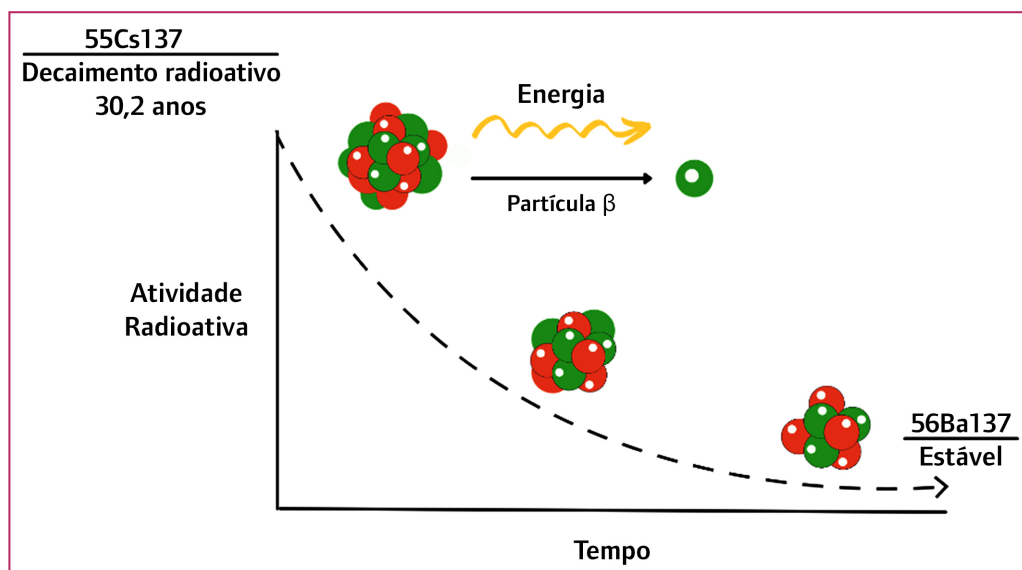


Figura 2. Decaimento radioativo do Césio-137. A meia vida deste radioisótopo é de 30,2, que é o intervalo de tempo necessário para que o número inicial de núclídeos seja reduzido à metade do valor inicial. O decaimento radioativo do césio-137 ocorre pela diminuição gradual de massa e atividade e se torna um elemento estável quando decai para Ba-137.

O que é radiação e quais as consequências no organismo exposto?

As radiações ionizantes existem no planeta Terra desde a sua origem, sendo, portanto, um fenômeno natural. No final do século XIX, com a aplicação das radiações ionizantes em benefício da humanidade, os efeitos para a saúde humana tornaram-se evidentes. A radiação tem aplicação ampla na medicina do diagnóstico para o tratamento de doenças, na indústria e para fins bélicos. Diversos equipamentos médicos empregam radionuclídeos para variadas utilidades como radiografia, mamografia, tomografia computadorizada, entre outras. Devido às diversas aplicabilidades da radiação, a população fica sujeita a riscos de exposição acidental, ambiental e ocupacional.

A radiação é uma forma de energia que se propaga em **ondas eletromagnéticas e/ou partículas**. Quando a energia radioativa atinge as células ou os tecidos, inicia-se uma série de processos que ocorrem em nanossegundos. O primeiro evento é a interação entre radiação e células. Quando há colisão da energia radioativa sobre átomos nas células viáveis, ocorre a **ejeção dos elétrons**. Este fenômeno é chamado de ionização e, a radiação que o provoca, de radiação ionizante.

Nos seres humanos, a exposição aguda ao césio-137 conduz, na maioria dos casos, à **aplasia da medula óssea** caracterizada por uma diminuição de células brancas do sangue e deficiência imune, como foi relatado no acidente em Goiânia. A exposição a doses elevadas de césio-137 é caracterizada pela indução da **síndrome de mielossupressão** observada após irradiação aguda com radiação ionizante.

A exposição à radiação ionizante pode causar reações teciduais que resultam em morte ou dano celular, conhecido como efeito determinístico. Nesse contexto, quanto maior a dose, mais severo o efeito (Figura 2). Um exemplo de efeito determinístico é a **radiolesão** da pele, que podem variar de um leve avermelhamento no local irradiado até a formação de grandes bolhas e necrose. Outros efeitos determinísticos observáveis incluem o aparecimento de catarata, doenças vasculares cardíacas e cerebrais. Por outro lado, existem efeitos que podem surgir sem que uma dose limite de radiação tenha sido ultrapassada, sendo conhecidos como efeitos estocásticos (Figura 3). Os efeitos estocásticos são tardios e sua ocorrência é probabilística. Dentre os diversos efeitos estocásticos decorrentes de exposição à radiação, encontram-se o desenvolvimento de células tumorais, o envelhecimento precoce, a diminuição da longevidade, as mutações gênicas e as alterações cromossômicas.

Ondas eletromagnéticas e/ou partículas - A forma como a radiação se propaga, seja em forma de onda, seja em forma de partícula, está relacionada à forma como ela é observada. As ondas de radiação eletromagnética são uma oscilação de campo magnético com campo elétrico que se propagam no vácuo transportando energia como acontece com as ondas eletromagnéticas, raios-x e gama. As partículas são uma estrutura diminuta e atingem somente um local em um dado instante como as partículas α , β , prótons, nêutrons.

Aplasia - A aplasia é uma doença caracterizada pela alteração no funcionamento da medula óssea. A medula óssea é responsável pela produção das células do sangue e a aplasia é caracterizada como a substituição do tecido medular normal por tecido gorduroso e, portanto, leva a concentrações baixas de hemácias, plaquetas e leucócitos pela circulação sanguínea.

Ejeção de elétrons - Evento que acontece quando a ionização expulsa o elétron de um átomo ou de uma molécula, ao qual ele está ligado por força elétrica.

Síndrome de mielossupressão - É uma condição na qual a atividade da medula óssea é diminuída, resultando em menor número de glóbulos vermelhos, glóbulos brancos e plaquetas. A ocorrência da síndrome de mielossupressão é resultante da exposição a doses agudas de radiação ionizante.

Radiolesões - Denominação dada a qualquer tipo de lesão causada por exposição à radiação.

Um **evento mutacional** pode ocorrer em qualquer célula do organismo. Em células somáticas ocorre durante a replicação do DNA que precede uma divisão mitótica, sendo o câncer o efeito estocástico mais comumente associado à exposição individual à energia

radioativa. Na linhagem germinativa as mutações podem ocorrer durante a replicação do DNA que precede a meiose. As mutações fixadas no genoma das células germinativas podem ser transmitidas ao longo das gerações.

Evento mutacional - Processo do mecanismo molecular pelo qual uma molécula de DNA sofre alterações sequenciais de nucleotídeos.

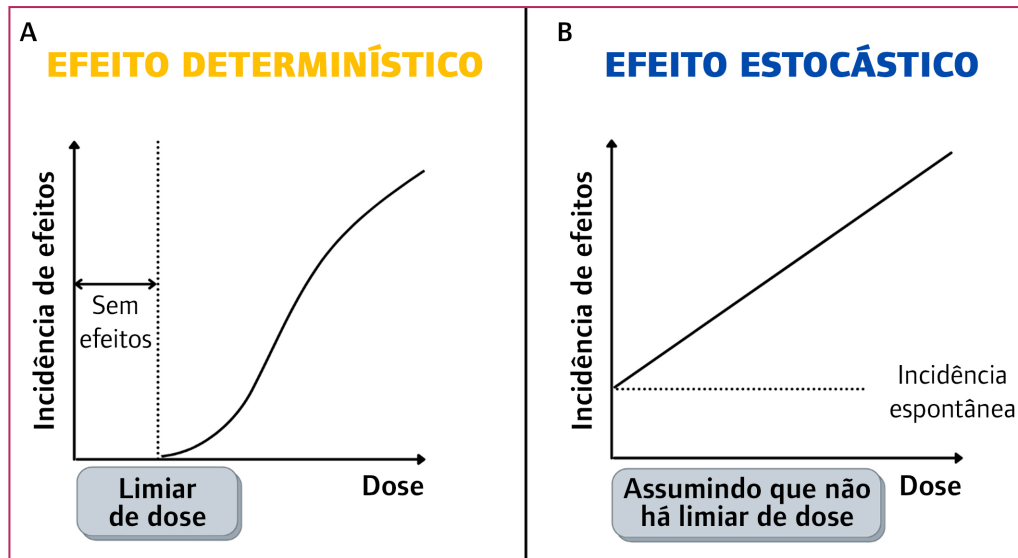


Figura 3. Dose e resposta dos efeitos determinísticos e estocásticos. **A:** Uma das características dos efeitos determinísticos é a existência da dose limite. A exposição à radiação acima desse nível é danosa para o organismo e, quanto mais alta a dose, mais severo o efeito. **B:** Não existe dose limiar para efeitos estocásticos. Nesse tipo de efeito, mesmo em doses extremamente baixas, a exposição à radiação pode causar alguns efeitos.

Como a energia radiativa pode causar dano ao DNA?

A integridade da informação genética é essencial para a manutenção da vida, por isso, algumas pessoas presumem que o DNA está isolado do ambiente celular de modo que o torna inalcançável por agentes endógenos e exógenos. Mas, o que não se deve esquecer, é que a maior biomolécula do nosso organismo, o DNA, evoluiu de modo que é possível haver interações com agentes físicos, químicos e biológicos, podendo contribuir positivamente ou negativamente para a seleção natural.

Os esforços científicos para compreender as interações que ocorrem entre a molécula de DNA e os agentes ambientais resultaram em um importante campo de estudo, denominado mutagênese. O foco da mutagênese é

compreender quais são os mecanismos moleculares envolvidos nos processos pré e pós mutacionais, sejam eles espontâneos ou induzidos e quais as **biomoléculas** envolvidas nos sistemas de reparo do DNA.

As mutações espontâneas são alterações ocasionais na sequência na molécula de DNA produzidas sem estímulo de algum agente mutagênico, indutor de mutações. As mutações espontâneas geralmente ocorrem devido a erros durante a replicação do DNA, como erro na incorporação de base e pareamento incorreto durante a replicação. As mutações induzidas são alterações na sequência do DNA que ocorrem devido à exposição do DNA a agentes mutagênicos, podendo ser físicos, químicos ou biológicos (Figura 4).

A radiação ionizante é um exemplo de agente físico com capacidade de induzir mutações no DNA. Os danos provocados pela radiação ionizante podem ser diretos, quando há depósito da energia radioativa diretamente na molécula de DNA, e/ou indiretos, quando moléculas irradiadas pro-

Biomoléculas - As biomoléculas são compostos químicos que, em geral, são compostas por carbono, além de hidrogênio, oxigênio e nitrogênio. Biomoléculas organizam-se, interagem e configuram as características fundamentais dos seres vivos.

duzem íons que atacam o DNA. O principal processo indireto de dano ao DNA pela radiação ionizante é causado pela **radiólise**, sendo a radiohidrólise o mais eficiente dos ataques nucleofísicos ao DNA. Na radiohidrólise, a energia radioativa depositada sobre moléculas de água produz espécies

reativas de oxigênio que interagem com o DNA causando lesões potencialmente mutagênicas. Os danos na molécula de DNA, induzidas pelas radiações ionizantes, podem ser lesões em um ou poucos nucleotídeos, quebras de fita simples do DNA ou de dupla fita do DNA (Figura 5).

Radiólise - É a quebra de uma ou várias ligações químicas, resultante da exposição à radiação ionizante.

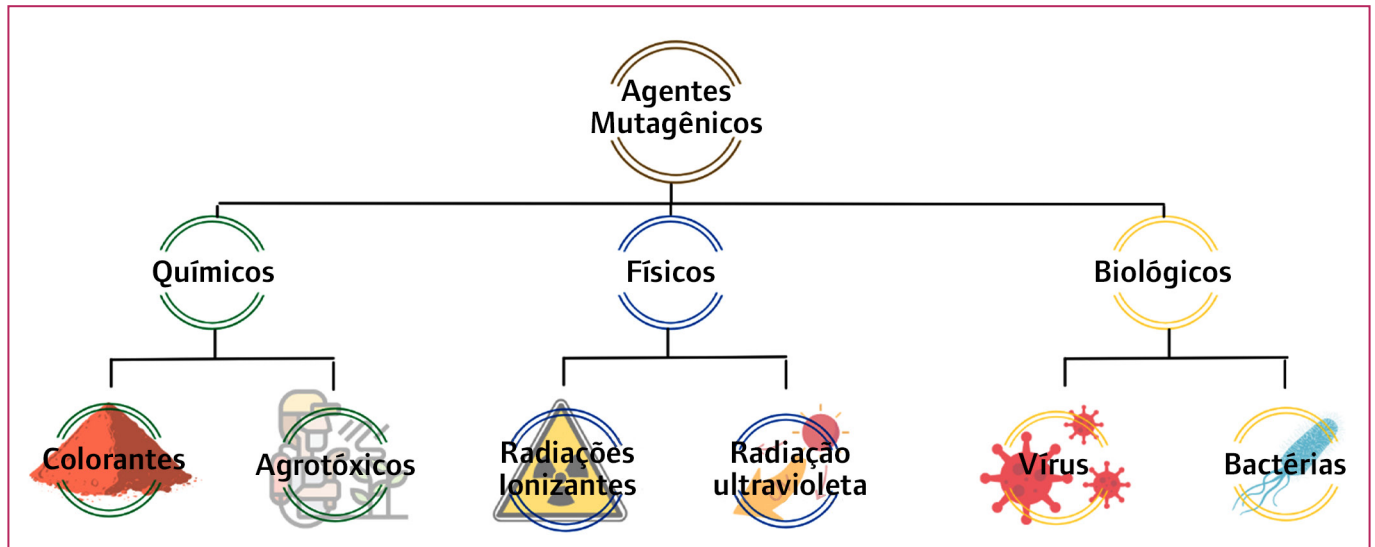


Figura 4. A natureza dos agentes mutagênicos. Os agentes mutagênicos são capazes de induzir mutação no genoma das células expostas.

O monitoramento de exposição do sistema biológico a agentes genotóxicos e mutagênicos consiste em avaliar e interpretar parâmetros biológicos e/ou ambientais com a finalidade de detectar possíveis riscos à saúde. Biomarcadores são parâmetros biológicos

quantificáveis que podem estar alterados devido à interação do sistema biológico com um agente estressor. A quantificação dos biomarcadores gera informações úteis para os estudos de biomonitoramento, proteção e mitigação de riscos.

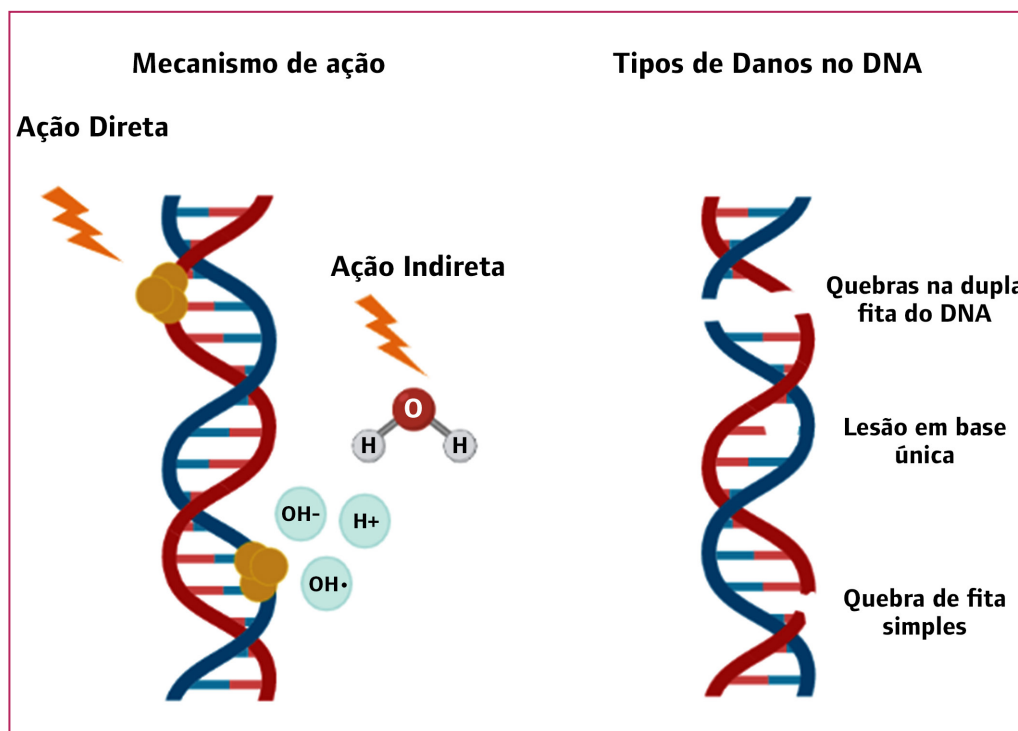


Figura 5. Representação esquemática dos efeitos diretos e indiretos da radiação no DNA e os tipos de danos que essas interações podem causar na molécula. Na ação direta, a radiação danifica o DNA sem intermediários; na ação indireta, a radiação interage com a molécula de água produzindo radiólises da água e assim danificando o DNA.

Em meados de 1970, a natureza das mutações induzidas por radiação foi amplamente inferida de relações dose-efeito com diversos biomarcadores. Os danos na molécula de DNA podem ser quantificados, sendo, portanto, um parâmetro de análise usado como biomarcadores de exposição e/ou de efeito. As lesões provocadas na molécula de DNA são usadas para investigar a genotoxicidade e a mutagenicidade da exposição. Para quantificar os danos genotóxicos, são empregadas metodologias que têm como princípio separar e observar fragmentos da molécula de DNA.

Uma metodologia frequentemente usada para a investigação da genotoxicidade é o teste cometa. O princípio do teste é a visualização direta de danos no DNA em células individuais por meio de uma **corrida eletroforética**. Esta técnica apresenta alta sensibilidade para a detecção de danos genotóxicos e possui a reprodutibilidade simples e rápida. Em

função do tratamento aplicado, durante a eletroforese, o DNA íntegro permanecerá no **nucleoide**, enquanto o DNA fragmentado migrará por força de um campo elétrico uniforme durante a eletroforese, gerando uma imagem que lembra um cometa com uma cabeça e uma cauda, daí o nome do ensaio (Figura 6).

Os biomarcadores mais frequentemente usados para investigar o dano mutagênico induzido pela exposição do DNA à radiação são as aberrações cromossômicas e os micronúcleos. A frequência de aberrações cromossômicas é o marcador de exposição de preferência desde a década de 1960. A metodologia é sensível, permitindo estimar doses absorvidas tão baixas quanto 0,1 **Gray**. Este ensaio é visto como o método mais eficaz para a **dosimetria biológica** na faixa de doses de radiação que ocorre em acidentes em massa.

Corrida eletroforética - É uma técnica que separa moléculas biológicas com base em seu tamanho, quando submetidas a um campo elétrico. Como o DNA possui carga negativa, ele migrará quando sujeito ao dipolo de um campo elétrico uniforme.

Nucleoide - O DNA geralmente é acondicionado em suborganelas chamadas nucleoides, que tornam-se visíveis quando corados com um corante que se liga ao DNA.

Gray - Grandeza física usada para avaliar a quantidade de radiação absorvida pelo tecido.

Dosimetria biológica - Técnica utilizada para determinar a dose de radiação recebida por um indivíduo através de efeitos biológicos induzidos.



Figura 6. Nucleoide submetido ao teste cometa. A imagem mostra um nucleoide celular com quebras de diversos tamanhos de DNA causada por radiação ionizante que possui efeito estocástico. A célula foi submetida à corrida eletroforética em um campo elétrico uniforme, que permite a separação dos fragmentos, fazendo com que os menores migrem com uma velocidade maior formando um arraste. O sentido de migração é para o polo negativo, na imagem caracterizado pelo arraste, que lembra um cometa.

Os números de quebras envolvidas e a forma como os segmentos interagirão entre as extremidades quebradas determinam os tipos de rearranjos que serão formados. As aberrações cromossômicas podem ser classificadas como instáveis e estáveis. As aberrações cromossômicas instáveis caracterizam-se por alterações

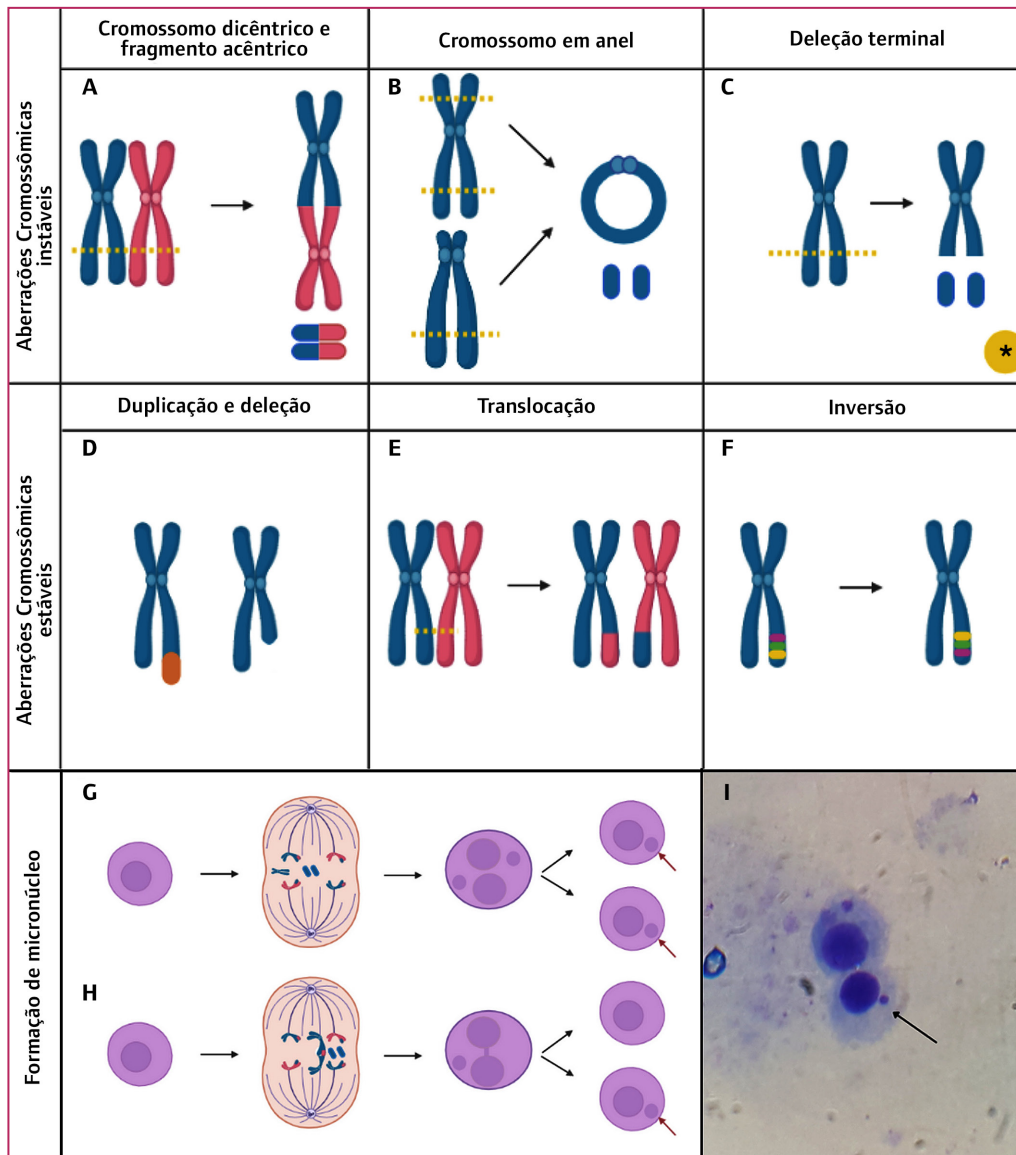
na estrutura dos cromossomos, sendo mais amplamente quantificadas em casos de exposições recentes à radiação ionizante. As aberrações cromossômicas estáveis tendem a permanecer nas células ao longo dos processos de divisão celular. A figura 7 retrata os tipos mais comuns de aberrações cromossômicas.

Os micronúcleos são um subproduto das aberrações cromossômicas instáveis ou de perdas de cromossomos inteiros. A quantidade de micronúcleos presentes nas células é proporcional à dose de RI absorvida. Os micronúcleos consistem de pequena massa nuclear revestida por membrana com aparência de um pequeno núcleo, porém separada do núcleo celular. O diâmetro do micronúcleo é menor que 1/3 do núcleo principal, e, portanto, pode ser facilmente diferenciado em uma célula binucleada. Os micronúcleos são originados durante a divisão celular decorrente da não disjunção cromossômica, geralmente ocasionada por lesões no DNA, que não foram reparadas pelo sistema de reparo (figura 7).

Mais recentemente, diversos estudos têm investigado o papel da variação estrutural do genoma que possui tamanho intermediário, conhecida como Variação do Número de Cópias (do inglês, *Copy Number Variants - CNV*), que envolve rearranjos variáveis de ganhos e/ou perdas do conteúdo de DNA como biomarcadores de efeito de agentes mutagênicos. Evidências demonstram que a exposição à radiação ionizante resulta em um aumento significativo na formação de CNV *de novo* em células irradiadas. As CNVs, contendo perdas genômicas, parecem ser mais comumente induzidas por radiações que causam deleções no DNA. Elas surgem como resultado de reparo ou erro de reparo de DSBs e SSBs na molécula de DNA.

Figura 7.

Representação esquemática dos tipos de aberrações cromossômicas instáveis e estáveis e da formação de micronúcleo. **A.** Os cromossomos dicêntricos são originados a partir de quebras das extremidades teloméricas de dois cromossomos distintos, que se reúnem de forma errada, formando uma estrutura com 2 centrômeros e fragmentos acêntricos. **B.** O cromossomo em anel surge de duas quebras, ambas no mesmo cromossomo, flanqueando o centrômero. As extremidades quebradas são ligadas, formando-se um anel que inclui o centrômero e um fragmento acêntrico. **C.** Nas deleções terminais há rompimento de um segmento terminal e um fragmento acêntrico é originado. (*Os fragmentos acêntricos produzidos pelas quebras são instáveis, ou seja, são perdidos durante o processo de divisão celular.) **D.** As radiações ionizantes podem causar diferentes tipos de ganhos e perdas de fragmentos cromossômicos. **E.** A translocação é a transferência de um segmento de um cromossomo para outro não-homólogo. **F.** As inversões surgem a partir de duas quebras nos cromossomos e cada fragmento reorganiza-se de forma invertida, podendo ou não envolver o centrômero. **G.** Os micronúcleos (indicados pelas setas) são originados durante a divisão celular derivados da não disjunção cromossômica geralmente ocasionadas por lesões no DNA. **H.** Formação de micronúcleos a partir de fragmentos acêntricos e cromossomos inteiros atrasados. **I.** Formação de micronúcleos a partir de fragmentos acêntricos e pontes citoplasmáticas a partir de cromossomos dicêntricos. **I.** Células submetidas ao teste de micronúcleo. A seta indica, na imagem, uma célula com um micronúcleo ao lado de um núcleo principal.



Nos últimos anos, o rápido desenvolvimento de tecnologias de análise genômica tem proporcionado a chance de investigar, com alto nível de precisão, diversos tipos de variantes genéticas. Consequentemente, estimativas mais precisas sobre o risco genético da população exposta à radiação ionizante podem ser obtidas. Inovações nas técnicas de sequenciamento do genoma humano vêm sendo refinadas em um ritmo rápido e está permitindo um progresso fascinante e valioso na compreensão de variantes de DNA induzidos por radiação ionizante em toda a extensão do genoma. Recentemente, a tecnologia do **Sequenciamento de Nova Geração** analisou o genoma dos **liquidators** e seus filhos, confirmando a capacidade revolucionária das metodologias genômicas aplicadas à mutagênese ambiental.

Em Goiás, diversas metodologias de biomonitoramento foram empregadas no acompanhamento do efeito genético da RI nas pessoas expostas e seus familiares durante o acidente com césio-137 (figura 8). O avanço das tecnologias de análise genômica foi proporcionando chances de investigar, com alto nível de precisão, diversos tipos de variantes genômicas. Os resultados destes estudos verificaram danos gênicos e cromossômicos, além de um aumento na incidência de mu-

tações no genoma dos filhos dos indivíduos expostos. Esta população apresenta doenças comuns como diabetes, osteoporose, alergias, gastrites, entre outros, porém são inquestionáveis os inúmeros agravos de cunho psicossocial que as pessoas envolvidas enfrentam. Portanto, é importante a continuidade do monitoramento da saúde dessas pessoas, pois é uma das maneiras de mitigação dos efeitos deletérios da RI.

Para saber mais

NOUAILHETAS, Y. *Radiações Ionizantes e a vida*. Rio de Janeiro: Comissão Nacional de Energia Nuclear. 2005.

OKUNO, E. Efeitos biológicos das radiações ionizantes: acidente radiológico de Goiânia. *Estudos Avançados* v.27, n. 77, p. 185-200, 2013.

ROZENTAL, J. J.; CUNHA, P.; OLIVEIRA, C. A. 1989. *Aspects of the initial and recovery phases of the radiological accident in Goiânia*. In Proc. Int. Symp. Recovery Operations in the Event of a Nuclear Accident or Radiological Emergency, IAEA, Vienna (p. 593-597).

UCHOA, Elza Maria Gonçalves Santos. *Cesium 137: Integrative Review of the genetic biomonitoring of individuals exposed to ionizing radiation in the Goiânia radiological accident in Goiânia, from 1988 to 2021*. Dissertação (Mestrado em Genética) – Pontifícia Universidade Católica de Goiás, 2021.

Sequenciamento de Nova Geração (NGS) - Método de sequenciamento do todo ou de algumas partes do DNA em um curto período. É de fácil acesso a diversos bancos de dados que disponibilizam centenas de mutações genéticas, e tem baixo custo.

Liquidators - Bombeiros, militares, operários e voluntários que ajudaram a reduzir as consequências do acidente nuclear de Chernobyl, foram assim denominados.

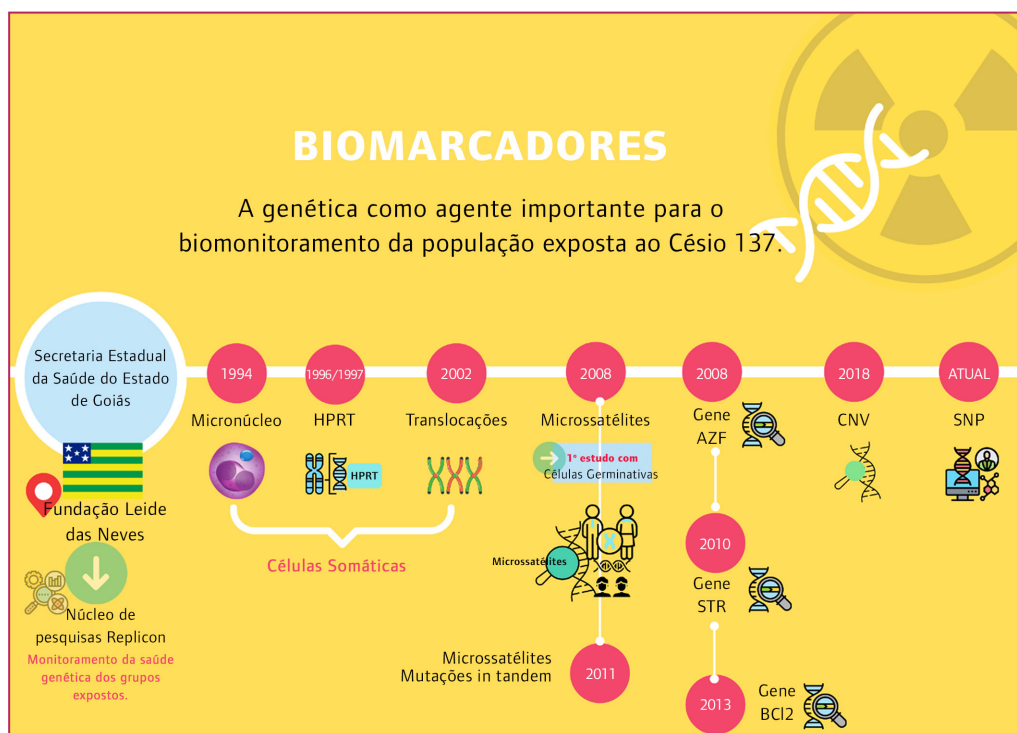


Figura 8. Linha do tempo do biomonitoramento genético da população exposta ao Césio-137 de 1987 até o momento atual.