

Treball Final de Grau

Grau de Farmàcia

Colors i espectacle. Composició i impacte ambiental i en la salut de la pirotècnia



Roc Ajenjo Fernandez

Sanitat i Gestió Ambientals

Química Inorgànica, Toxicologia i Salut Pública

Departament de Biologia, Sanitat i Medi Ambient

Facultat de Farmàcia i Ciències de l'Alimentació

Universitat de Barcelona

Barcelona, abril de 2026



Les flames del foc, la nit tornen dia. Si arribés l'amor, que dolç que seria [...]
Imitem el sol amb grans fogates. Llevem-nos el calçat damunt les brases [...]
Si mireu les flames del foc de Sant Joan li veureu les banyes, el barret i els guants.
"Nit de Sant Joan", Jaume Sisa, 1981

Es poden fer meravelles amb l'espurneig i la combustió del foc i els horrors del so,
i fer-los arribar prou lluny perquè no pugui protegir-se'n ni suportar-ho ningú.
Roger Bacon (1214-1292)

*Al meu pare, la meva mare, la Bet, la Berta, i a tots els amics i familiars que,
havent participat directament o indirectament al treball, han fet més
agradables les estones lliures d'aquests darrers mesos.*

Resum

Aquest treball busca contribuir a la comprensió de molts aspectes relacionats amb la pirotècnia. Els objectius són conèixer l'origen dels colors, la química i el funcionament bàsic dels focs artificials; així com fer una anàlisi del seu impacte ambiental i en la salut pública, i una revisió de les possibilitats de desenvolupar una pirotècnia més sostenible pel medi. Addicionalment, també s'ha dedicat una part experimental enfocada a la formació dels colors dels focs artificials i s'ha dut a terme una anàlisi de la física que hi ha darrere del fenomen que els produeix.

Per assolir els objectius, s'ha realitzat una revisió bibliogràfica de llibres, webs i revistes científiques intentant, sempre que la literatura ho ha permès, prendre dades publicades en la darrera dècada. Per a la part experimental, s'han adquirit sals metàl·liques que han permès observar els efectes visuals dels espectacles pirotècnics. A més a més, per comprendre els fenòmens físics que els generen, s'ha completat l'experiment descomponent la llum emesa per les sals observant el seu espectre d'emissió.

Els resultats mostren que els espectacles pirotècnics provoquen un augment de la concentració de molts tipus de contaminants i tenen un impacte en la salut pública. A més, es comprova que una legislació restrictiva de l'ús públic de la pirotècnia modera l'impacte negatiu en la qualitat de l'aire. També s'estudien possibles modificacions dels components dels artificis pirotècnics en disminuirien l'impacte ambiental. Finalment, el treball destaca la necessitat de realitzar més estudis sobre les emissions de contaminants i, sobretot, les conseqüències sanitàries dels focs artificials.

Paraules clau: Pirotècnia; Focs artificials; Contaminació atmosfèrica; Contaminants, Impacte ambiental i en la salut.

Abstract

This work aims to contribute to the understanding of many aspects related to pyrotechnics. The objectives are to learn about the origin of colors, the chemistry, and the basic operation of fireworks; as well as to analyze their environmental and public health impact, and to review the possibilities for developing more environmentally sustainable pyrotechnics. Additionally, an experimental section is included focusing on the formation of fireworks colors and an analysis of the physics behind the phenomenon that produces them.

To achieve the objectives, a literature review of books, websites, and scientific journals was conducted, attempting, whenever the literature allowed, to use data published in the last decade. For the experimental part, metallic salts were acquired that allowed for observing the visual effects of pyrotechnic displays. Also, to understand the physical phenomena that generate them, the experiment was completed by decomposing the light emitted by the salts and observing its emission spectrum.

The results show that pyrotechnic displays cause an increase in the concentration of many types of pollutants and have an impact on public health. In addition, it is observed that restrictive legislation on the public use of pyrotechnics moderates the negative impact on air quality. Possible modifications to the components of pyrotechnic devices that would reduce their environmental impact are also studied. Finally, the work highlights the need to carry out more studies on pollutant emissions and, above all, the sanitary consequences of fireworks.

Key words: Pyrotechnics; Fireworks; Air pollution; Pollutants; Environmental and Health impact.

Integració d'àmbits

Alguns dels àmbits que toca aquest treball són la Química Inorgànica, la Sanitat i Gestió Ambiental, la Toxicologia i la Salut Pública

Per entendre la composició química dels focs artificials i què és el que forma els seus colors i els espetecs, s'apliquen coneixements de **Química Inorgànica**. Els coneixements de l'assignatura sobre reaccions d'oxidació-reducció, sals metàl·liques i altres elements químics ajuden a elaborar el marc teòrics del treball i a comprendre'n els resultats.

Tanmateix, el principal àmbit és la **Sanitat i Gestió Ambiental**, ja que una part fonamental del treball és l'estudi de l'impacte ambiental i els contaminants que es produeixen amb l'ús de la pirotècnia. S'hi aborden aspectes molt lligats al temari de l'assignatura com la legislació ambiental, la contaminació acústica, i els tipus de contaminants atmosfèrics i les seves característiques. Encara en relació amb els contaminants també s'hi pot incloure l'àmbit de **Toxicologia**, ja que s'estudien els components que s'alliberen a l'ambient i de quina manera poden afectar la salut humana tant directament com indirectament. Pel mateix motiu es pot considerar que la **Salut Pública** és un àmbit que també aborda el treball ja que aquest permet adquirir coneixements que es poden destinar a protegir i promoure la salut de les persones.

Objectius de Desenvolupament Sostenible (ODS)

Els ODS són molt importants tant en la societat actual com en la del futur. És per això que en aquest treball s'ha contribuït a l'assoliment d'aquests objectius. Sobretot, s'alinea amb els objectius tres i tretze però també amb l'onze.

L'objectiu 3 (Salut i benestar) es basa en garantir una vida sana i promoure el benestar a totes les persones de totes les edats. En aquest sentit, el treball vol proporcionar coneixements sobre els impactes a la salut que té la contaminació general i, concretament, la generada pels espectacles pirotècnics. Amb aquesta informació els lectors poden adquirir coneixements, per tal que puguin prendre alguna mesura, especialment en cas de patir alguna afectació respiratòria.

Pel que fa l'objectiu 13 (Acció climàtica), que busca adoptar mesures urgents per combatre el canvi climàtic i els seus efectes, està també molt lligat amb el treball ja que pretén conscienciar als lectors de les conseqüències ambientals de l'ús indiscriminat de la pirotècnia. A més, concretament, té una part enfocada a possibles solucions més sostenibles que es podrien anar incorporant poc a poc per mitigar l'impacte negatiu dels focs artificials pel que fa a la contaminació.

Indirectament, també es pot considerar la relació del treball amb l'objectiu 11 (Ciutats i comunitats sostenibles) que aborda aconseguir que les ciutats i els assentaments humans siguin inclusius, segurs, resilients i sostenibles. Per aconseguir que les nostres metròpolis siguin entorns realment segurs, cal conèixer l'impacte en la qualitat de l'aire i en la integritat física dels ciutadans, buscant l'equilibri entre la cultura i l'oci, i la protecció de la salut.

Índex

1. Introducció	1
2. Marc teòric	1
2.1. Constituents dels focs d'artifici	1
2.2 Contaminació i contaminants atmosfèrics	7
3. Marc normatiu: Regulació de la pirotècnia	10
4. Objectius	11
5. Materials i mètodes	12
5.1 Part teòrica	12
5.2 Part experimental	12
6. Resultats i discussió	13
6.1 Conseqüències de la legislació	13
6.2 Presència de contaminants posterior als focs artificials	14
6.3 La contaminació acústica provocada pels focs artificials	18
6.4 La inversió tèrmica com a potenciadora de la contaminació provocada pels focs artificials	19
6.5 Impactes sobre la salut	20
6.5.1 Sistema respiratori	20
6.5.2 Sistema cardiovascular	21
6.5.3 Càncer	21
6.5.4 Lesions als sentits	21
6.6 Pirotècnia sostenible	22
6.6.1 Canvis en la pólvora	23
6.6.2 Canvis en altres components	23
6.7. Experimentació	24
7. Conclusions	28
8. Bibliografia	30
9. Annexos	

Índex de figures

Figura 1. Colors corresponents a cada longitud d'ona.	2
Figura 2. Els diferents metalls o compostos químics que produeixen els diferents colors dels focs artificials.	3
Figura 3. Exemples de composicions de pólvora.	4
Figura 4. Els components essencials d'un motor de coet de focs artificials.	6
Figura 5. Estructura bàsica d'un coet.	7
Figura 6. Exemples de l'estructura dels PAHs.	9
Figura 7. Quan hi ha inversió tèrmica, les capes d'aire queden invertides, d'aquí el seu nom, i fa més fred a baix que a dalt.	10
Figura 8. Concentracions massives mitjanes diàries de PM _{2,5} i PM ₁₀ a l'estació ARSO 3 de l'1 de desembre de 2016 al 31 de gener de 2017.	14

Figura 9. Les concentracions ambientals totals de partícules en suspensió (TSP) de cinc metalls seleccionats el 2021, per a bari (a), crom (b), coure (c), plom (d) i estronci (e).	15
Figura 10. Concentracions horàries totals de $\text{PM}_{2,5}$, HNO_2 i K^+ , Cl^- , NO_3^- , NH_4^+ i SO_4^{2-} en $\text{PM}_{2,5}$ durant els episodis de focs artificials de Nadal i Cap d'Any.	16
Figura 11. Concentracions horàries de K^+ , SO_4^{2-} i NO_3^- en $\text{PM}_{2,5}$ durant el període de crema de focs artificials.	16
Figura 12. Concentracions atmosfèriques mesurades (barres) de PCDDs i PCDFs.	17
Figura 13. Emissions atmosfèriques modelades d'HCb i CPs durant els focs artificials a la ciutat de Zúric.	18
Figura 14. Concentracions en massai fraccions de contaminants relacionats amb els focs artificials d'hidrocarburs aromàtics policíclics en $\text{PM}_{2,5}$.	18
Figura 15. Nivell mitjà de pressió sonora [dB(A)] en funció del temps, corresponent a la celebració de Cap d'Any del 2020.	19
Figura 16. Concentracions de CO_2 abans, durant i després dels focs artificials.	19
Figura 17. Focs artificials i qualitat de l'aire ambient del 3 al 5 de juliol. a CO ppm.	20
Figura 18. Causes de les presentacions d'emergència associades a la nit de Cap d'Any del 2006 al 2022 (En total $n = 69$).	22
Figura 19. A Liuyang, la "capital mundial dels focs artificials", hi va haver un espectacle on 15.947 drons van ser controlats alhora amb Intel·ligència Artificial.	24

Índex de fotografies

Fotografia 1. Colors de les flames produïdes al cremar metanol (esquerra) i etanol (dreta).	24
Fotografia 2. Flama produïda pel bicarbonat sòdic (esquerra) i el seu espectre d'emissió observat (dreta).	25
Fotografia 3. Flama produïda per l'àcid bòric (esquerra) i el seu espectre d'emissió observat (dreta).	25
Fotografia 4. Flama produïda pel clorur de coure (esquerra) i el seu espectre d'emissió observat (dreta).	26
Fotografia 5. Flama produïda pel clorur de liti (esquerra) i el seu espectre d'emissió observat (dreta).	26
Fotografia 6. Flama produïda pel clorur d'estronci (esquerra) i el seu espectre d'emissió observat (dreta).	27
Fotografia 7. Flama produïda pel clorur de potassi (esquerra) i el seu espectre d'emissió observat (dreta).	27
Fotografia 8. Flama produïda pel carbonat de calci.	27
Fotografia 9. Espurnes produïdes al cremar pólvora, llimadures de ferro i alumini.	28

1. Introducció

Els focs artificials són espectacles molt presents a les festivitats més assenyalades de la nostra societat. Es basen en una combinació de coets enlairats que emeten llums i sons provocant una gran exhibició visual. La seva producció és força complexa i ha evolucionant constantment per permetre espectacles cada vegada més segurs i sofisticats. El seu origen es remunta als voltants del segle IX dC. a la Xina a partir del descobriment de la pólvora (també anomenada pólvora negra), que va ser inventada accidentalment quan alquimistes buscaven “l’elixir de la vida” i, de seguida, fou utilitzada en armes i focs artificials. A Europa va arribar a través dels àrabs al voltant del 1200 i un dels primers europeus a escriure’n va ser Roger Bacon (1214). Al nostre continent, no se’n va fer un ús bèl·lic fins aproximadament el 1480, sis cents anys després de la seva invenció.^{1,2} Amb el descobriment de la pólvora, es va donar lloc a les primeres exhibicions pirotècniques amb finalitats més aviat cerimonials i militars i no tant com a oci i espectacle recreatiu.

La producció d’una gran exhibició visual i sonora requereix una combinació de constituents químics que tenen conseqüències significatives a nivell ambiental. L’impacte es genera principalment a partir de l’alliberament a l’atmosfera d’elevades quantitats de partícules en suspensió com ara sals metàl·liques, components de la pólvora i els subproductes gasosos generats durant la seva combustió. Aquests contaminants no només degraden la qualitat de l’aire, sinó que també poden persistir a l’ambient i deteriorar l’aigua i el sòl.

En aquest treball es realitza una recerca dels components que formen els focs artificials i del marc normatiu que els regula; així com una revisió a fons de la literatura científica. Aquesta té un doble objectiu: en primer lloc comprendre millor l’impacte dels espectacles pirotècnics tant en el medi ambient com en la salut humana i, en segon lloc, aprofundir en les possibles modificacions per tal d’aconseguir que aquests siguin més segurs i sostenibles.

2. Marc teòric

La contaminació provocada pels focs artificials s’analitza identificant els seus constituents i els contaminants que alliberen. La producció dels focs artificials és força complexa i en aquesta part es fa una aproximació dels components més importants.

2.1. Constituents dels focs d’artifici

Les sals metàl·liques: els colors

Per entendre com es formen els focs d’artifici cal una explicació bàsica de què són els colors i com es formen en aquests espectacles. La llum és la responsable dels colors que veiem al nostre dia a dia i aquesta es comporta com una ona electromagnètica. En concret, les ones que tenen una longitud de 380-780 nm pertanyen a la llum visible i cadascun dels colors correspon a un rang de longitud (vegeu Figura 1).

Colour	Wavelength [nm]
Red	~ 635-770
Orange	~ 590-635
Yellow	~ 565-590
Green	~ 520-565
Cyan	~ 500-520
Blue	~ 450-500
Purple	~ 380-450

Figura 1. Colors corresponents a cada longitud d'ona.³

El color dels objectes no és degut a l'emissió de llum pròpia, sinó al fet que absorbeixen longituds d'ona determinades i reflecteixen les altres, de manera que el nostre ull detecta el color corresponent a aquestes últimes.³

El que dona color als focs artificials són les sals metàl·liques. En aquest cas i, a diferència dels objectes, ho fan pels fenòmens de luminescència i incandescència.

- Incandescència. És la llum que es produeix per calor. Al proporcionar una certa temperatura a un material, aquest comença a emetre ones de longitud pertanyent al vermell-taronja i, a mesura que la temperatura augmenta, emet longituds d'ona més petites i energètiques (fins arribar al blau). Metalls com l'alumini, el magnesi, el ferro o el titani, cremen emetent molta brillantor i són utilitzats per incrementar la temperatura d'un foc artificial.⁴
- Luminescència. És el color en forma de llum que no és produïda a partir d'un augment de temperatura, sinó per altres fonts d'energia. Sovint se l'anomena llum freda perquè es pot produir a temperatura ambient.

Per tal que aquesta llum es produeixi cal que un electró absorbeixi energia i passi del seu estat fonamental (més estable o de menys energia) a un estat excitat, amb més energia. Aquesta correspondrà a la suma de l'energia del seu estat fonamental més la que ha absorbit. Aquest fet, produeix una inestabilitat en l'àtom, de manera que l'electró tornarà al seu estat inicial emetent l'energia que li sobra en forma de fotó (llum). En funció de l'energia, el fotó tindrà una longitud d'ona concreta que determinarà el color que emet (vegeu Annex I).⁴

De luminescència n'hi ha de molts tipus en funció d'on provingui l'energia per excitar l'electró: per exemple, la quimioluminescència (una reacció química produeix l'energia necessària) o l'electroluminescència (la produeix el corrent elèctric). En el cas de les sals metàl·liques es tracta de termoluminescència, que es produeix quan l'emissió de llum es dona per escalfament d'un sòlid però independent de la provocada per la incandescència.⁵

En resum, és la presència de diferents sals inorgàniques presents en els focs artificials les que, en escalfar-se, produeixen llum i colors pels dos mecanismes esmentats en funció del metall. D'aquesta manera, les pols d'alguns metalls com el ferro o l'alumini, creen l'efecte d'espurnes brillants per incandescència, mentre que altres metalls com el coure o el liti, al administrar-los calor, emeten altres colors per luminescència.⁶

Sals metàl·liques. Les sals metàl·liques més utilitzades en la pirotècnia per donar color són les següents (vegeu Figura 2):

- Sals d'estranci (nitrat, carbonat o sulfat d'estranci): proporcionen el color vermell.
- Sals de calci (carbonat, sulfat o clorur de calci): donen el color taronja.
- Sals de sodi (nitrat o oxalat de sodi): emprades per al groc.
- Sals de bari (carbonat, nitrat o clorur de bari): produeixen el verd
- Sals de coure (clorur, òxid o carbonat de coure): són les causants del blau.

A partir de les combinacions d'aquestes sals es poden obtenir altres colors. Per exemple, el lila, combinant el coure i l'estranci, o les tonalitats platejades a partir de l'alumini, el magnesi i el ferro. Encara que no generen colors, són de gran importància per als focs artificials les sals d'alumini (i també les de magnesi i titani), responsables del color blanc i imprescindibles per aconseguir les espurnes blanques tan característiques dels focs artificials.⁷

Estrelles de colors. Per produir els efectes visuals lluminosos i sonors dels focs d'artifici calen unes petites estructures sòlides d'uns 5 cm anomenades estrelles. Contenen pólvora, sals metàl·liques que donen color, i un aglutinant com la dextrina. La seva composició i mida determinen el color i la intensitat amb què es produeix l'efecte. Per fabricar-les, els components es pesen acuradament i es passen per tamisos per eliminar possibles grumolls. Després es barreja amb aigua per formar una massa i se li dona la forma desitjada, es talla i s'hi escampa la pólvora.⁸



Figura 2. Els diferents metalls o compostos químics que produeixen els diferents colors dels focs artificials.⁹

La pólvora

La pólvora clàssica és una mescla de tres elements:

- Nitrat de potassi. És un comburent i, al descompondre's a altes temperatures, subministra oxigen a la reacció, produeix la combustió i la manté. D'aquesta manera, la pólvora no necessita estar en contacte amb l'oxigen de l'aire per encendre's.^{10,11}
- Carbó. És el combustible principal de la fórmula, és a dir, la font d'energia per a la reacció. És una substància orgànica que conté humitat, carboni, hidrogen i oxigen, entre altres

components. És essencial en els focs artificials.^{10,11}

- Sofre. És l'encarregat de facilitar la inflamació de la mescla. Accelera la combustió aproximant els elements entre ells. En ser inflamable fa que augmenti la temperatura de la reacció més fàcilment. Tot i això, és prescindible perquè sense ell també es produiria la combustió, però seria de forma molt més lenta i no tan eficient.^{2,10}

Per formar la pólvora amb el màxim de rendiment les proporcions òptimes són: 74'64% de nitrat de potassi, 13'51% de carbó vegetal i 11'85% de sofre. Els components s'han de moldre, humitejar i barrejar adequadament per produir una mescla reactiva i de bona qualitat. Tot i això, en l'àmbit de la pirotècnia es simplifica, des de 1781, a 75% nitrat de potassi, 15% carbó vegetal i 10% de sofre.^{12,13} La proporció de cada component no ha estat, però, sempre la mateixa. En un repàs ràpid a la història de la pólvora s'observa que la mescla de 75:15:10 antigament havia estat molt diferent.¹ (vegeu Figura 3)

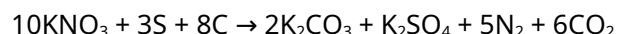
Date	ca. 1252	ca. 1350	ca. 1560	ca. 1635	ca. 1781
Saltpetre	37.50	66.6	50.0	75.0	75.0
Charcoal	31.25	22.2	33.3	12.5	15.0
Sulfur	31.25	11.1	16.6	12.5	10.0

"Compositions given in parts by weight."

Figura 3. Exemples de composicions de pólvora.¹

L'explosió Tot i que la química implícita en l'explosió de la pólvora és molt extensa i complexa, en aquesta recerca es fa una breu explicació per comprendre els aspectes bàsics més importants.

La reacció general simplificada que es produeix en encendre la pólvora és la següent:



Perquè es pugui dur a terme l'explosió és necessària una font de energia. En els focs d'artifici, l'energia necessària per a iniciar la combustió la proporciona el foc d'una metxa, el qual provoca que els elements de la pólvora reaccionin entre ells iniciant reaccions d'oxidació i reducció.

Degut a la temperatura elevada proporcionada per la font de calor, es produeix una descomposició de l'estructura del nitrat de potassi sòlid, formant gasos que s'oxidaran, tal com mostra la següent expressió:¹⁴



D'aquesta manera, els àtoms de combustible (reductors com el carbó i en certa mesura el sofre que també pot reduir el nitrat) cedeixen electrons als àtoms del nitrat de potassi i aquest, com que actua com a oxidant, allibera oxigen. Així, es formen enllaços entre el combustible i l'oxigen alliberat i originen un producte més estable tot produint una alliberació d'energia en forma de llum i calor.

Aquests subproductes formats a la reacció d'oxidació-reducció, són gasos que estan a alta temperatura com el CO_2 i el SO_2 formats segons aquestes reaccions i amb les entalpies (energia alliberada) corresponents:



Per cada gram de pólvora cremat es produeixen uns 1.300 J en forma de calor. La velocitat de combustió pot ser modificada en funció de la uniformitat i la mida dels grànuls que formen la pólvora. Com més petits i fins, més ràpida serà la combustió ja que la superfície de contacte entre els components és més gran.^{14,15}

En resum, la pólvora necessita energia, per exemple, calor. Quan se n'hi subministra, el nitrat es descompon i cedeix oxigen als combustibles, els quals li cedeixen electrons, de manera que s'encén i es manté mentre hi ha combustible. En la reacció es formen gasos que arriben als 3.000°C. I si la pólvora està comprimida en un recipient hermètic els gasos exerciran una pressió molt elevada i produiran una explosió.¹⁵

Canvis en la composició de la pólvora: La pólvora clàssica amb els tres components és la que s'anomena pólvora negra. Actualment, però, la pólvora més emprada és l'anomenada pólvora flaix, una modificació de l'anterior consistent en una millora i adaptació a l'ús pirotècnic.

Com que el nitrat de potassi és bastant higroscòpic, és a dir, absorbeix l'aigua i es pot degradar, es va anar modificant aquest component substituint-lo per altres sals més oxidades. Algunes són el nitrat de bari (presenta poca higroscopicitat), el clorat potàssic (en sec i en contacte amb components fàcilment inflamables detona enèrgicament; per això, tot i haver-se utilitzat, actualment està en desús) o el perclorat potàssic (tot i que els seus efectes són menors, en ser molt menys perillós, és dels més utilitzats).

Actualment, trobem també pólvores sense fum que, a banda d'aquest canvis en el comburent, utilitza nitrocel·lulosa en comptes de carbó (vegeu punt 6.6).^{11,14}

Altres components

Per fer un foc d'artifici no n'hi ha prou en barrejar pólvora i una sal metàl·lica que doni color. Cal una serie de materials addicionals que són molt importants per fer un espectacle pirotècnic de qualitat. N'hi ha molts, i la majoria compleixen diverses funcions.

Els aglutinants s'encarreguen de compactar les mescles que es formen i quan estan basats en materials orgànics, com és habitual, també actuen com a component combustible.¹ Els més habituals són la dextrina, la goma aràbiga i altres resines, i es barregen humitejant-les amb aigua o alcohol segons l'aglutinant. També es pot utilitzar algun midó -com el d'arròs- per aconseguir l'aglutinació. Altres tipus de midó, com el de patata o el de blat, poden ajudar a moderar la temperatura de combustió, la qual cosa pot protegir certs colorants sensibles. Tot i això, un dels que disminueix més la temperatura de combustió per aconseguir colors més purs és la lactosa, caracteritzada per tenir certes propietats aglutinants i combustibles.^{11,16}

També hi ha estabilitzants més recents que s'encarreguen de prevenir pèrdues d'energia i oxidacions incontrolades. Els més convencionals són derivats de la urea o d'amines aromàtiques. Aquests també s'usen per alentir la reacció de degradació entre els components químics i així

allargar la seva vida útil. Tot i això, actualment estan sent substituïts pel seu alt risc ja que, en algun moment de la combustió, produeixen espècies tòxiques i/o potencialment cancerígenes.¹⁷

En resum, a banda de la pólvora, els focs artificials tenen agents que donen color, aglutinants per barrejar adequadament i altres productes que retarden la reacció o fan que es produeixi a temperatures més baixes.

Un exemple de focs d'artifici: el coet

Tot i que hi ha molts tipus de focs artificials, aquí se'n descriu un dels més comuns, el coet. Altres com les bateries o les fonts, encara que no es propulsen com el coet sinó amb altres sistemes com els morters, tenen un funcionament bastant similar. Cal deixar clar que l'estructura dels coets pot variar molt en funció del fabricant i que aquí només s'explica un exemple senzill per entendre el funcionament més bàsic.

L'empenta. La reacció química entre combustibles i oxidants genera gasos que són expulsats per un orifici. Segons la 3a llei de Newton, les forces d'acció i reacció són iguals i oposades. És a dir, la força cap avall que fa el gas quan surt és igual a la força cap amunt que rep el coet. Es pot pensar com si fos un motor que actua com un generador de gas el qual la seva força és suficient per superar la de la gravetat.

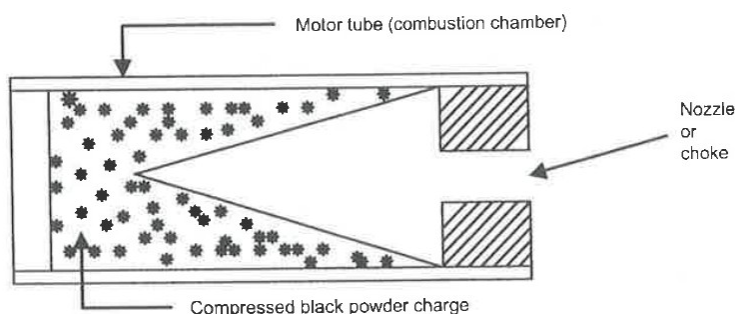


Figura 4. Els components essencials d'un motor de coet de focs artificials.¹

La pólvora està comprimida dins una cambra amb aglutinants tal com es mostra a la imatge (vegeu Figura 4) que permet augmentar la superfície de combustió i genera més empenta. A mesura que es consumeix la pólvora, la massa del coet disminueix i aquest augmenta la seva velocitat. Per tal d'evitar una pèrdua del control de la combustió, aquesta compressió no pot ser porosa. Cal també el control de molts altres factors com la pressió que exerciran els gasos alliberats per la pólvora i l'àrea de l'orifici per on sortiran; la densitat del propulsor (és a dir la pólvora); i la massa, la forma i la mida del coet. Tot això permet controlar la velocitat de combustió i l'empenta del coet.¹

Explosió, llum i so. Els coets més complexos, a banda d'enlairar-se també tenen components que permeten que, a una certa alçada, es produeixin efectes de llum i so. A sobre de la zona on hi ha la pólvora que produeix l'enlairament, hi ha un compartiment on hi ha la composició necessària per aconseguir els efectes desitjats.¹¹

Quan la combustió de tota la pólvora s'ha completat, a dins el coet s'inicia una segona etapa de combustió més lenta fins a arribar a la zona de la càrrega explosiva. Aquesta és la que farà augmentar la temperatura i la pressió interna que, al no tenir cap obertura per on sortir els gasos,

es produirà una explosió del compartiment. Així, dispersarà les estrelles de colors brillants cap a totes direccions. D'aquí la importància que el segon procés d'explosió sigui més lent que el primer ja que es vol que el coet s'enlairi i, un cop a l'alçada desitjada, exploti alliberant els elements del seu interior. Aquesta segona combustió se sol aconseguir mitjançant l'addició de components que la retarden o, en alguns dissenys, a partir de la incorporació d'una segona metxa que s'encén un cop es consumeix tota la pólvora que ha produït l'enlairament.¹⁸

L'estructura: Tot i que hi ha molts tipus de coet, els que tenen múltiples efectes de llum i so solen tenir compartiments separats entre ells (vegeu Figura 5).

1) Vareta: Tot i que la seva principal funció és aconseguir que el vol del coet sigui el més rectilini possible, també s'utilitza per col·locar el coet en un suport i controlar la direcció del vol.¹

2) Metxa: En molts coets s'encenen dues metxes simultàniament, una que encén la pólvora del compartiment on s'emmagatzema la pólvora i l'altra, de combustió lenta, que encendrà la zona on es troben les estrelles de colors. Actualment moltes metxes s'encenen a distància a partir d'un corrent elèctric, aconseguint augmentar la seguretat.¹⁹

3) Pólvora: Es troba en un compartiment que conté un petit orifici o embocadura que farà sortir els gasos alliberats al consumir-se.

4) Estrelles de colors: Son el material que produeix l'exhibició visual i sonora un cop el coet arriba a l'alçada desitjada. S'omple de moltes estrelles i, quan s'encén la pólvora i gràcies a la pressió que exerceixen els gasos alliberats, es trenquen les parets del compartiment i les estrelles enceses s'alliberen a l'exterior.

5) Cap: Part superior del coet per afavorir-ne l'aerodinàmica i que el vol sigui el més rectilini possible.^{9,20}

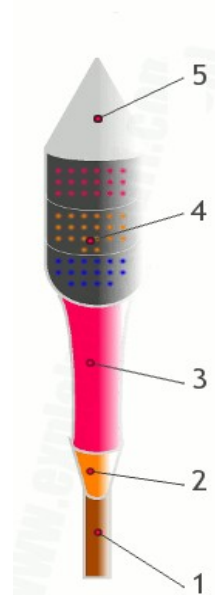


Figura 5. Estructura bàsica d'un coet.²⁰

2.2. Contaminació i contaminants atmosfèrics

La contaminació atmosfèrica es defineix com la presència de materials o substàncies que provoquen un risc, una molèstia greu o un dany cap a les persones o l'ambient. Tot i que aquestes substàncies poden ser emeses per fonts naturals o antropogèniques (provocades pels humans)²¹ quan es parla de contaminació atmosfèrica es fa referència només a aquestes últimes. Per tal d'evitar minimitzar o corregir els efectes perjudicials que puguin provocar els contaminants, cal una regulació i control de les emissions.

Certament, la pirotècnia pot generar molts tipus de contaminants atmosfèrics, però aquí es fa una breu explicació d'alguns dels més importants. D'aquesta manera, posteriorment es podran analitzar recerques centrades en la possible alliberació d'aquests contaminants per part dels focs artificials, que provoquen una disminució de la qualitat de l'aire (vegeu punt 6.2).

Material Particulat (PM₁₀, PM_{2,5}, ultrafines). El material particulat (PM) és una barreja de partícules sòlides i líquides formada per una única substància o una barreja de substàncies diferents –ja siguin orgàniques o inorgàniques– que es troben a l'aire. Provenen de múltiples fonts tant naturals com antropogèniques (com la indústria, el trànsit o la mineria) i es classifiquen segons el seu diàmetre. Les PM₁₀ són de diàmetre inferior a 10 micres i les PM_{2,5} inferior a 2,5 micres. Aquestes inclouen les partícules ultrafines de menys de 0,1 micra de diàmetre. Al ser tan petites penetren amb molta facilitat als pulmons i poden arribar fins als alvèols i a la circulació sanguínia tot augmentant el risc –en casos d'exposició crònica– de patir malalties respiratòries, càncer i malalties cardiovasculars.²²

Metalls. Es tracta d'un grup molt ampli que habitualment té orígens en la indústria, els combustibles fòssils i la producció d'energia. Tot i que hi ha metalls com el plom i el mercuri més perillosos que altres, tots tenen efectes negatius quan superen unes concentracions determinades. Els focs artificials tenen una important càrrega metàl·lica provinent de les sals inorgàniques necessàries per donar el color característic. Els problemes més greus d'aquests metalls són que no es degraden fàcilment, que tenen tendència a bioacumular-se a llarg de la xarxa tròfica i que acostumen a ser tòxics. Per exemple, s'han observat efectes físics i psíquics en els humans al produir-se una exposició elevada.^{23,24}

Òxids acidificants (o no metàl·lics). Entre els més habituals hi ha els de sofre, els de nitrogen i els de carboni:

- Òxids de sofre (SO_x). Per exemple el SO₂. Poden provenir de la crema de combustibles i centrals tèrmiques si tenen origen antropogènic o bé, com a origen natural, de l'erupció de volcans.²⁵
- Òxids de nitrogen (NO_x). Normalment s'emet òxid nítric (NO) per crema de combustibles, incineradores o el trànsit. Tot i això, a partir de la seva oxidació a l'aire es produeix l'NO₂. Aquests òxids participen a la formació de l'ozó troposfèric. Tant el SO₂ com els òxids de nitrogen són responsables de la pluja àcida quan s'oxiden a àcid sulfúric i àcid nítric i són arrossegats per la pluja. Aquesta pot causar greus conseqüències pel sòl i la vegetació.^{23,26}
- Òxids de carboni. Per exemple, el monòxid de carboni (CO) i el CO₂. Són alliberats habitualment pel transport, centrals tèrmiques, combustió de carburants –com el gas natural– i les incineradores.²³

Es tracta de gasos molt presents en la contaminació produïda pel trànsit i, al estar present pràcticament en tot moment del dia, és difícil atribuir un origen concret a les concentracions d'aquests contaminants.

Compostos orgànics volàtils (COVs). Aquests compostos són hidrocarburs de normalment menys de 12 carbonis, que es troben en estat gasós o que són molt volàtils a temperatura ambient, de manera que tendeixen a evaporar-se fàcilment. A part de carboni i hidrogen poden contenir oxigen, fluor, clor, sofre i nitrogen entre d'altres elements. Normalment s'alliberen al cremar combustibles fòssils o a partir de dissolvents orgànics que utilitzen les indústries, entre elles la farmacèutica. Els més abundants són el metà, l'età, el propà, el toluè, el benzè i l'etilè.²³

Oxidants fotoquímics: O₃. L'ozó és un gas que es troba de forma natural a l'estratosfera i ens protegeix de les radiacions de raigs ultraviolats. Tot i això, també es pot trobar a la troposfera¹ com a contaminant secundari. Quan es troba en concentracions molt elevades a la troposfera, pot tenir efectes adversos per la salut ja que és un irritant pulmonar.²⁷

Tot i que es pot formar per altres processos, el principal mecanisme de formació d'ozó troposfèric són les reaccions químiques entre òxids de nitrogen i compostos orgànics volàtils, amb la participació de la radiació solar.²⁷ D'aquesta manera qualsevol font que alliberi COVs i òxids de nitrogen (NO_x) podrà participar també en la formació d'aquest ozó troposfèric.

Compostos Orgànics Persistentes (COPs). Els COPs són substàncies tòxiques i resistents a la degradació. Són fàcilment transportables a gran distància de la font d'emissió i poden acumular-se en els teixits dels éssers vius. Aquestes característiques provoquen que siguin un perill global per a la salut i l'ambient.

Estan classificats en el «Conveni d'Estocolm de COPs» i, alguns exemples són: els PCBs (Bifenils Policlorats o Policlorobifenils), les dioxines i els furans policlorats. Poden provenir de l'ús de pesticides, de la indústria química o ser produïts involuntàriament com a subproductes. Els seus efectes són molt nocius per a la salut, podent provocar tumors i, afectacions immunitàries o del sistema nerviós entre d'altres.^{23,28,29}

Hidrocarburs Policíclics Aromàtics (PAHs). Es tracta d'un grup de substàncies químiques caracteritzades per tenir dos o més anells aromàtics formats exclusivament per carboni i hidrogen (vegeu Figura 6). Els més volàtils són més susceptibles de dispersar-se a l'atmosfera. Les fonts principals d'emissió són la crema de combustibles fòssils, el trànsit i la indústria. La seva presència a l'aire després dels focs artificials, acostuma a donar-se a partir de la formació d'altres compostos generats durant la combustió del carbó i el sofre.²⁵

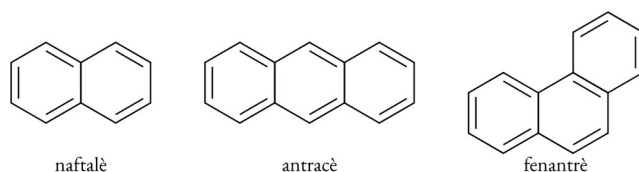


Figura 6. Exemples de l'estructura dels PAHs.³⁰

Contaminació acústica. Consisteix en l'increment significatiu dels nivells acústics del medi i és un factor important de deteriorament de la qualitat ambiental d'un territori.³¹

Tot i que òbviament no és un contaminant, no es pot deixar de parlar dels **factors ambientals** i el seu efecte en la detecció de les concentracions de contaminants. Per exemple la baixa velocitat del vent (<4 km/h) sovint s'associa a nivells més alts de contaminació de l'aire ja que redueix la dispersió dels contaminants.

Un punt i a part mereix la **inversió tèrmica**, un fenomen que també dificulta, en gran mesura, la dispersió dels contaminants.³² La inversió tèrmica és un fenomen natural que afecta a la circulació de l'aire a les capes més baixes de l'atmosfera. En una situació normal l'aire es mou constantment i es distribueix seguint un gradient de temperatura: a la superfície hi ha l'aire més calent i, a mesura

I: la que està en contacte amb la superfície terrestre fins als 10 km d'alçada.

que augmenta l'alçada, la temperatura de l'aire disminueix. L'aire calent, en ser menys dens que el fred, tendeix a ascendir i, mentre ho fa, es va refredant progressivament. Amb el refredament es torna més dens i, per tant, torna cap a la superfície on s'escalfarà de nou. La repetició d'aquest procés s'anomena convecció. Durant les nits, sobretot d'hivern i amb poc vent, el sòl es refreda ràpidament i transmet el fred a la capa d'aire més baixa. Aquesta, en ser més freda i, per tant més densa que la superior, queda retinguda a la part baixa de la troposfera dificultant la convecció (vegeu Figura 7).

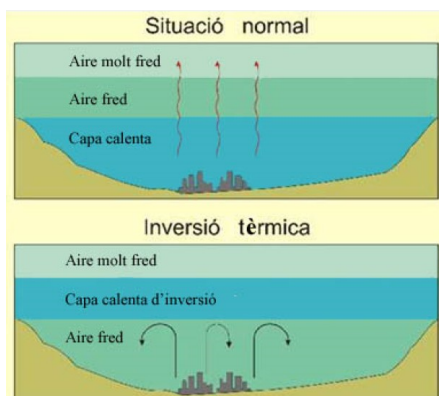


Figura 7. Quan hi ha inversió tèrmica, les capes d'aire queden invertides, d'aquí el seu nom, i fa més fred a baix que a dalt.³³

Aquest fet produeix que les capes d'aire no es moguin ni es barregin, de manera que la contaminació queda concentrada sobre la població provocant el boirum característic de les ciutats amb contaminació. Aquesta situació es reverteix quan el sol escalfa la superfície terrestre o quan hi ha força vent tornant així a la circulació normal de l'aire.^{34,35}

3. Marc normatiu: regulació de la pirotècnia

Actualment, els aspectes relacionats amb els focs artificials estan regulats pel "Reial decret 989/2015, de 30 d'octubre, pel qual s'aprova el Reglament d'articles pirotècnics i cartutxeria" i adapta la Directiva 2013/29/UE del Parlament Europeu i del Consell, de 12 de juny de 2013. Aquest regula tota la normativa que s'ha de seguir en relació amb el transport, la comercialització, les instal·lacions de fabricació, els envasats, els magatzems i la classificació de productes, entre molts altres aspectes.³⁶

La classificació i els assajos i controls de qualitat estan regulats per la norma europea EN15947. Aquesta és d'aplicació en artificis pirotècnics d'ús per part del públic^{II} i inclou requisits i condicions de substàncies químiques que no es poden fer servir per fabricar-los. Entre aquestes substàncies, les més conegudes serien l'arsènic, l'hexaclorobenzè, el plom, els clorats a més del 80% o mesclats amb sulfurs o metalls, el mercuri, i el sofre amb una acidesa superior al 0,002%, entre moltes altres. Algunes d'aquestes substàncies també apareixen en normes d'articles pirotècnics d'ús

II: Els d'ús públic són els de categoria F1, F2 i F3 que es poden adquirir a partir de 12, 16 i 18 anys, respectivament.

professional.^{III} Per tant, els artificis d'aquestes categories no podran contenir cap d'aquestes substàncies.³⁷ Tot i que no s'especifica, és probable que la prohibició respongui a qüestions de salut humana o ambiental.

Pel que fa als residus, els articles pirotècnics s'han de dissenyar i fabricar de manera que es puguin eliminar en condicions segures amb un impacte mínim per al medi ambient i se'ls aplica la Llei 21/2013, de 9 de desembre, *d'avaluació ambiental*.

La gestió dels residus sense restes d'explosius o substàncies actives que poden generar els productes, els tallers o els espectacles pirotècnics, es regeixen per la Llei 22/2011, de 28 de juliol, *de residus i sòls contaminats*, i pel Reial decret 833/1988, de 20 de juliol, del *Reglament de residus perillosos i les restants disposicions de desplegament*.³⁶

El cos dels artificis pirotècnics no pot ser de metall, sinó que s'ha de fabricar amb paper, cartró o plàstic. En les darreres regulacions, també hi ha una línia d'actuació per reduir els components plàstics que es fan servir en la fabricació dels artificis pirotècnics. No es permet, per exemple, que els efectes de xiulet estiguin continguts dins d'un receptacle de plàstic, sinó que ha de ser de paper o cartró.

Alguns governs també legislen restringint l'ús públic de la pirotècnia de manera que es prohibeix a la ciutadania l'adquisició de focs artificials i només se'n permet l'ús en espectacles organitzats per l'administració.

4. Objectius

Els dos objectius principals d'aquest treball són:

- Estudiar la composició dels principis químics alliberats pels focs artificials.
- Investigar l'impacte ambiental i sanitari que pugui provocar el seu ús.

També es plantegen objectius més específics amb la intenció de facilitar-ne la comprensió dels principals. Alguns són analitzar la química responsable dels colors i tots els components dels focs artificials, la seva síntesi i els processos bàsics de fabricació. A més a més, analitzar tant la contaminació atmosfèrica com l'acústica relacionada amb la pirotècnia i les conseqüències per la salut. Finalment, considerar les possibilitats reals de desenvolupament d'una pirotècnia més sostenible i respectuosa amb l'ambient i la salut pública.

També s'ha inclòs una petita part experimental que té l'objectiu d'observar els fenòmens de luminescència i incandescència i descriure els efectes visuals que tenen alguns compostos presents en els focs artificials explicats prèviament en el marc teòric del treball.

III: Són els de categoria F4. Es tracta d'artificis de pirotècnia d'alta perillositat destinats a ús exclusiu per part d'experts.

5. Materials i mètodes

5.1. Part teòrica

El treball s'ha elaborat mitjançant una recerca bibliogràfica d'articles, estudis, apunts de classes de *Sanitat i Gestió Ambientals*, llibres i webs científiques. S'ha realitzat a través de la base de dades PubMed i Scopus, llibres sobre pirotècnia de diferents biblioteques i alguns del Cercabib de la UB.

D'una banda, tot i que en el marc teòric s'han consultat webs científiques i llibres, la perillositat de la temàtica (pólvora, pirotècnia...) n'ha dificultat en gran mesura la recerca, ja que la informació en alguns aspectes és limitada. D'altra banda, per aprofundir en la comprensió teòrica dels contaminants, s'han consultat apunts de classe, i webs de la Generalitat i del Ministeri de Transició Ecològica i Repte Demogràfic, entre d'altres. Pel que fa a la legislació, s'ha contactat amb una empresa de pirotècnia que ha facilitat informació important sobre aquesta qüestió, ja que no s'ha trobat informació suficient sobre alguns aspectes legislatius com l'existència d'elements o composicions prohibides en la fabricació.

En la recerca dels resultats del treball, s'han consultat les bases de dades facilitades per la universitat utilitzant termes genèrics com «fireworks», «pyrotechnics» o «black powder». També, s'han afegit operadors booleans com «Fireworks» AND «VOCs» o «Fireworks» AND «Hearing loss», entre d'altres.

Alguns dels estudis que s'han consultat contenien una forta càrrega de mètodes estadístics i instruments de mesura que en complicaven la comprensió. L'ús de la intel·ligència artificial ha estat molt limitat en el desenvolupament del treball, ja que només s'ha consultat per plantejar una primera idea d'estructura i índex, així com per solucionar errors que es van produir al programa de bibliografia Zotero.

5.2. Part experimental

S'ha desenvolupat la part experimental amb l'objectiu d'observar els efectes pirotècnics que tenen alguns dels compostos químics explicats a la primera part del treball (luminescència i incandescència). S'han volgut comprovar empíricament els diferents colors que emeten les sals inorgàniques basant l'experiment en un material audiovisual trobat a internet.^{38,39} El procediment ha consistit a cremar determinades sals amb metanol com a combustible per escalfar-les a prou temperatura i observar els fenòmens de luminescència i incandescència en funció del compost. S'ha utilitzat metanol (CH_3OH) i no etanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$), perquè aquest darrer produeix una flama groga que pot falsejar els colors que es volen observar. S'ha procurat trobar totes les sals explicades al marc teòric, però no sempre ha estat possible. Tot i que la major part de les sals s'han adquirit a un laboratori químic, altres provenen de material casolà:

- Bicarbonat sòdic (present en usos culinaris)
- Àcid bòric (substitut de les sals de bari habituals en la pirotècnia)
- Clorur de coure
- Clorur de liti

- Clorur d'estronci
- Clorur de potassi
- Carbonat càlcic (obtingut a partir de la trituració de guixos)
- Llimadures d'alumini i ferro

La formació de la flama es realitza en un recipient d'alumini (per la resistència a la temperatura), s'afegeix la sal inorgànica i, seguidament, el metanol. S'encén, s'espera uns segons que la flama agafi temperatura i es fotografia el color que ha adquirit la flama.

En l'experiment, també s'utilitza un prisma de Newton, ja que, mitjançant el fenomen de difracció, és capaç de descompondre la llum en tots els colors que la formen com si fossin les gotes d'aigua que, quan plou i fa sol, formen l'Arc de Sant Martí. D'aquesta manera es pot descompondre la llum alliberada per cada flama i, comprovar l'espectre dels colors i comparar-los amb l'espectre real de cada element (vegeu Annex I). Per aconseguir-ho, s'ha fet passar la llum de la flama per una petita escletxa i s'ha col·locat el prisma a l'altra banda. Quan li arriba la llum de la flama, la descompon en els seus colors i s'observa l'espectre a través del prisma. Així, s'ha fotografiat l'espectre en els casos que la flama es mantenia suficient temps encesa.

6. Resultats i discussió

6.1. Conseqüències de la legislació

Un parell d'exemples dels efectes que pot tenir una regulació restrictiva en la millora de la contaminació atmosfèrica són Shanghai i San Diego:

- A Shanghai s'ha observat que la regulació restrictiva dels focs artificials per millorar la qualitat de l'aire és efectiva, ja que alguns marcadors de la contaminació com els nivells de K^+ i les concentracions de $PM_{2,5}$ així com el nombre de morts prematures, presenten una tendència a la baixa en els Festivals des del 2013 al 2017. Per exemple en el cas de les $PM_{2,5}$ la reducció va ser de $13,8 \mu g/m^3$ per any.⁴⁰
- A San Diego, on la venda i l'ús a nivell de carrer de pirotècnia estan prohibits, durant la festivitat del 4 de juliol (Dia de la Independència dels EUA) es va observar una menor concentració de $PM_{2,5}$ en comparació amb altres ciutats de l'estat de Califòrnia on sí que estan permesos. La diferència entre San Diego i aquestes altres ciutats va ser d'aproximadament un 50%.⁴¹

En termes generals, els focs artificials organitzats per les autoritats tendeixen a ser més segurs. Tot i que també provoquen contaminació atmosfèrica i acústica, redueixen la quantitat i gravetat d'accidents com les cremades. A més, en localitzar-se en un lloc i temps determinat, les persones més sensibles al soroll o als contaminants poden prendre mesures per minimitzar la seva exposició més fàcilment.⁴²

6.2. Presència de contaminants posterior als focs artificials

PM₁₀ i PM_{2,5}. En un estudi publicat el 2021 es va analitzar la concentració de PM_{2,5} i PM₁₀ en l'aire durant la Nit de Cap d'Any a Eslovènia. Concretament es van comparar les concentracions mitjanes d'aquestes partícules els dies previs i posteriors a l'última nit de l'any. Es va observar que tant el PM₁₀ com el PM_{2,5} de l'1 de gener van superar de llarg els valors dels dies previs així com el valor màxim que determina el govern eslovè i el recomanat per l'OMS.

La Figura 8 presenta les concentracions mitjanes diàries de PM_{2,5} i PM₁₀ en una estació de mostreig des de l'1 de desembre de 2016 fins el 31 de gener de 2017. La vertical discontinua representa l'1 de gener i l'horitzontal vermella marca el valor màxim diari de PM₁₀ (50 µg/m³) que, tal i com determina el govern eslovè, no pot superar-se més de 35 vegades en un any. L'1 de gener, la concentració mitjana de PM_{2,5} mesurada va ser de 114 µg/m³, que és el valor més elevat de tots els registrats entre el 2016 i el 2017.⁴³

En altres estudis també s'observa que durant els esdeveniments més intensos de focs artificials els nivells de PM_{2,5} i PM₁₀ augmenten fins a tres vegades més que els nivells habituals.⁴⁴

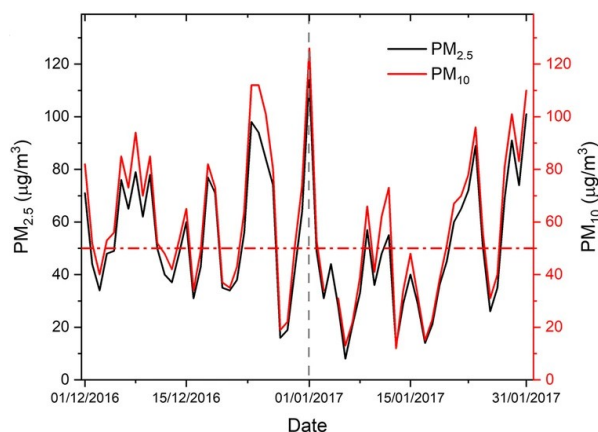


Figura 8. Concentracions massives mitjanes diàries de PM_{2,5} i PM₁₀ a l'estació ARSO 3 de l'1 de desembre de 2016 al 31 de gener de 2017.⁴³

Metalls. En una recerca duta a terme a Califòrnia el 2021, es van quantificar les concentracions de partícules ambientals de bari (Ba), crom (Cr), coure (Cu), plom (Pb) i estronci (Sr), durant el Dia de la Independència. Les concentracions de Ba, Cu i Sr van augmentar considerablement durant l'activitat dels focs artificials, mentre que el Cr i el Pb es van mantenir en nivells més moderats (vegeu Figura 9). Malgrat això, aquests dos últims van incrementar molt passades unes hores, durant la tarda del 5 de juliol. Tot i que no se sap exactament el motiu pel qual les concentracions de crom i plom assoleixen el seu punt màxim al cap d'unes hores, en termes generals l'estudi confirma un augment de la concentració de metalls pesants tant durant com després d'un elevat ús pirotècnic.⁴⁵

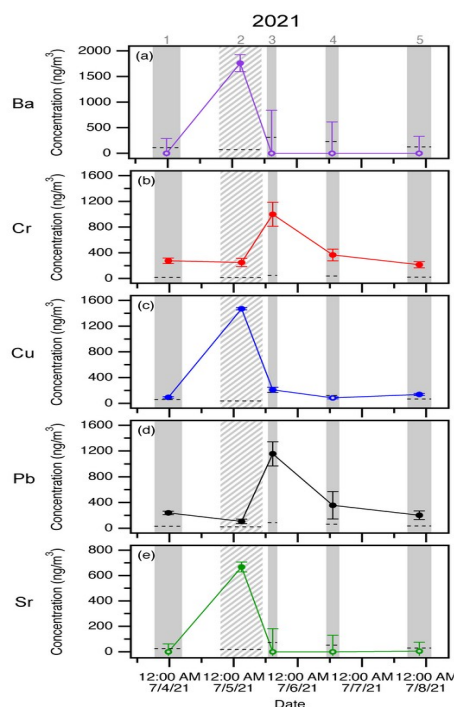


Figura 9. Les concentracions ambientals totals de partícules en suspensió (TSP) de cinc metalls seleccionats el 2021, per a bari (a), crom (b), coure (c), plom (d) i estronci (e).⁴⁵ L'àrea gris amb ratlles obliques representa el mostreig durant l'ús intensiu de focs artificials.

Després dels esdeveniments on s'utilitzen focs artificials, els contaminants no només es troben a l'aire, sinó que també poden contaminar les aigües fluvials. Als EUA s'han analitzat mostres d'aigua superficial de l'*East River* després del 4 de juliol i s'ha observat un augment de les concentracions de calci, de potassi i de ferro, les quals van constituir la major part dels elements de les mostres d'aigua. Després dels focs, els nivells de bari, crom, coure, níquel, titani i zinc van augmentar 1,5 vegades mentre que els nivells d'antimoni ho van fer aproximadament 5 vegades. A més, tot i estar prohibit en la fabricació dels focs artificials^{IV}, les concentracions de plom després de l'esdeveniment es van més que duplicar en comparació amb els nivells dels dies previs.⁴⁶

Òxids acidificants i ions inorgànics. En els cas dels òxids, com que són presents en la contaminació produïda pel trànsit i, per tant, present en tot moment del dia, és molt complicat establir-ne la procedència real quan la concentració és elevada. Tot i això, en una anàlisi del 4 de juliol a Minnesota on estudiaven els contaminants generats pels espectacles pirotècnics, la concentració mitjana de CO₂ en el període dels focs va acabar produint una concentració màxima un 15% superior que en dies anteriors. A més, encara que les concentracions de CO van ser molt baixes durant tota la nit, sí que van augmentar de 0,4 ppm a uns 0,5-0,6 ppm.³²

S'ha observat que aquests períodes es caracteritzen per una elevada concentració d'ions inorgànics com K⁺, Cl⁻, Mg²⁺, Na⁺ i SO₄²⁻ els quals són emesos directament pels aparells pirotècnics. La detecció de NO₃⁻ es produeix més tard, fet que suggereix que es forma principalment a partir de la hidròlisi d'altres compostos nitrogenats (no es tracta d'un contaminant primari). Durant els períodes de més activitat, els ions NH₄⁺, NO₃⁻ i SO₄²⁻ són els que representen més massa de PM_{2,5} (vegeu Figura 10, on

IV: Si més no a la Unió Europea

el període amb elevada activitat pirotècnica s'ha indicat com a FW-N i les hores posteriors com a P-FW).⁴⁷

És important ressaltar que tant els sulfats (SO_4^{2-}) com els nitrats (NO_3^-) observats són derivats de les emissions pirotècniques riques en SO_2 i NO_x .⁴⁸

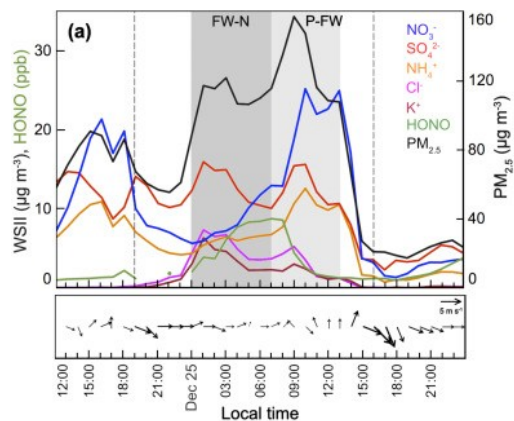


Figura 10. Concentracions horàries totals de $\text{PM}_{2.5}$, HONO i K^+ , Cl^- , NO_3^- , NH_4^+ i SO_4^{2-} en $\text{PM}_{2.5}$ durant els episodis de focs artificials de Nadal.⁴⁷

En una anàlisi de la qualitat de l'aire a Nanchang (Xina) durant el Festival de Primavera de 2021, es va observar un augment en les concentracions de SO_4^{2-} i NO_3^- en alguns casos de fins a cinc vegades. Aquests, assolien ràpidament el pic i posteriorment, al dispersar-se per l'atmosfera, tornaven, de manera relativament ràpida, als nivells de fons (vegeu Figura 11).⁴⁴

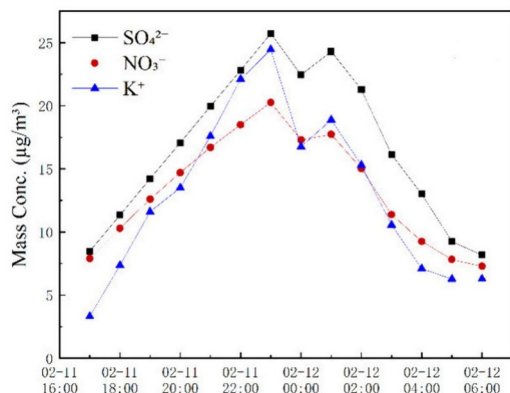


Figura 11. Concentracions horàries de K^+ , SO_4^{2-} i NO_3^- en $\text{PM}_{2.5}$ durant el període de crema de focs artificials.⁴⁴

COVs. S'ha observat que alguns participen en la destrucció de la capa d'ozó i són responsables, juntament amb els òxids de nitrogen i la llum solar, de la formació de l'ozó troposfèric.^{23,49} També s'ha comprovat que els focs artificials contribueixen a la formació d'aquests compostos, provocant l'impacte ambiental que tenen. De tots ells, els alcans, formats en processos de combustió, i els aromàtics són els majoritaris.⁵⁰

O₃. Tal com descriuen estudis recents, la concentració i les taxes de formació de O₃ en festivals amb espectacles pirotècnics són aproximadament un 13% superiors respecte a períodes on no n'hi ha. Aquest augment és produït per l'alliberament de grans quantitats d'òxids de nitrogen i compostos orgànics volàtils (VOCs) que, en presència de la radiació solar, reaccionen químicament per formar ozó.⁵⁰⁻⁵²

Tot i la multitud d'estudis que conclouen que els focs artificials afavoreixen la producció indirecta de O₃, altres recerques suggereixen que aquests augments poden ser deguts a interferències en els aparells i instruments de mesura generades possiblement pel benzè i el fenol també alliberats en la combustió de la pirotècnia. Aquest fet demostra la importància de la revisió dels mètodes de mesura quan es realitza una anàlisi.⁵³

COPs. En una anàlisi realitzada durant la celebració del Dia Nacional de Suïssa el primer d'agost de 2011, es van observar augments de les concentracions de dioxines (com dibenzodioxines policlorades o PCDDs) i furans (PCDFs) (vegeu barres 6-9 de la Figura 12). Aquests augments són de fins a 10 vegades més grans respecte de les concentracions una setmana abans i dues després de l'esdeveniment (vegeu *Background* de la Figura 12).⁵⁴

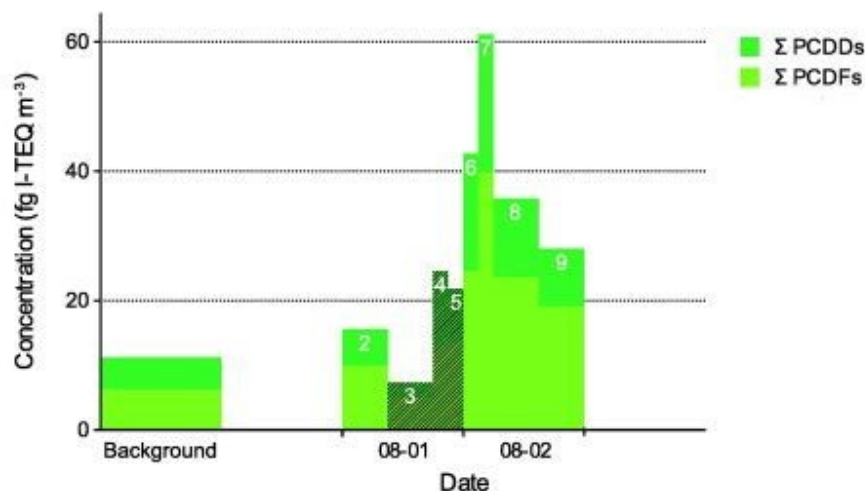


Figura 12. Concentracions atmosfèriques mesurades (barres) de PCDDs i PCDFs. El *background* indica les concentracions mitjanes durant 24 hores, una setmana abans de l'1 d'agost.⁵⁴

En la mateixa recerca es va observar que, a partir d'un cert moment, les emissions de clorobenzens (com l'hexaclorobenzé o HCB) i clorofenols (CP) també augmentaven i, en aquest cas, descendien ràpidament. Ara bé, al matí següent, es tornava a detectar un pic que es creu causat per la volatilització dels residus d'aquests compostos que es van quedar al sòl i van actuar com a fonts d'emissió secundàries (vegeu Figura 13).⁵⁴

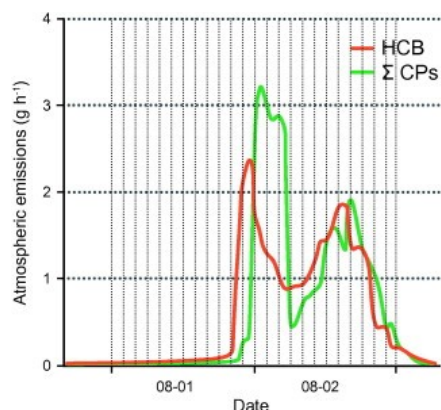


Figura 13. Emissions atmosfèriques modelades d'HCB i CPs durant els focs artificials a la ciutat de Zúric.⁵⁴

PAHs. En un estudi on s'analitzava la composició de l'aire abans, durant i després del Festival de Primavera a Nanquín (Xina) el 2014, es va detectar la presència de fins a 14 PAHs diferents. Els que van assolir concentracions més elevades eren el benzo(a)pirè (BaP), que a més és classificat com a carcinogen del grup I, i el benz[e]acefenantrilè (BbF). Aquests van assolir concentracions 26,7 i 13,5 vegades més elevades en comparació amb les anàlisis fetes abans del festival (vegeu Figura 14).⁵⁵ Anys abans, en les mateixes festivitats, també es va observar un augment en les concentracions de PAHs més cancerígens provinents de la combustió.⁵⁶

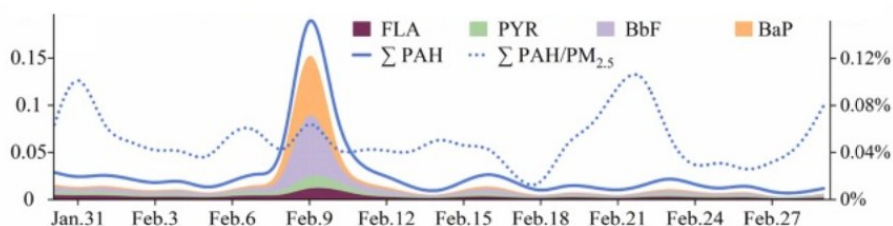


Figura 14. Concentracions en massa i fraccions de contaminants relacionats amb els focs artificials d'hidrocarburs aromàtics policíclics en PM_{2,5}.⁵⁵

Tot i aquests resultats, anàlisis d'altres autors posen en dubte que la crema de focs artificials sigui una font directa tan significativa de PAH. També qüestionen que tinguin un impacte significatiu en els PAH atmosfèrics a gran escala i afirmen que és poc probable que provoquin riscos per a la salut.^{57,58}

6.3. La contaminació acústica provocada pels focs artificials

Segons la literatura, la nit de Cap d'Any de 2020, a l'Argentina, es va produir un augment del soroll ambiental a causa dels focs artificials que superava de llarg els límits establerts per la normativa ambiental (vegeu Figura 15). Aquest fet tant pot afectar grups vulnerables com ho són les persones amb trastorn de l'espectre autista, com animals, especialment els gossos.⁴²

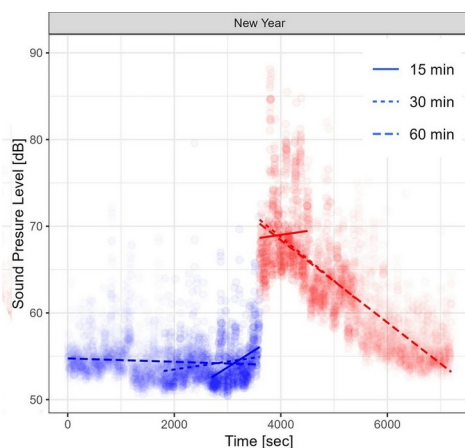


Figura 15. Nivell mitjà de pressió sonora [dB(A)] en funció del temps, corresponent a la celebració de Cap d'Any del 2020.⁴² Els punts en color blau representen la condició sense focs artificials i en vermell la condició amb focs artificials. Els 15, 30 i 60 min són els intervals de temps durant el qual es va fer el mostreig.

6.4. La inversió tèrmica com a potenciadora de la contaminació provocada pels focs artificials

Els efectes de la inversió sobre la contaminació produïda per focs artificials han estat descrit en multitud d'estudis sobre la qualitat de l'aire després dels focs artificials. Per exemple, en la festivitat del 4 de juliol a Minnesota, en un primer moment no s'observa un impacte immediat en la concentració de CO_2 . Tal com s'observa a la Figura 16, la concentració mitjana al voltant de la mitjanit és només un 2% més elevada que a la mitjanit del dia anterior (les dues línies vermelles marquen aquests dos moments). Amb tot, la concentració de CO_2 no va assolir el punt més alt fins a unes sis hores després de l'espectacle (vegeu línia verda de la Figura 16).³²

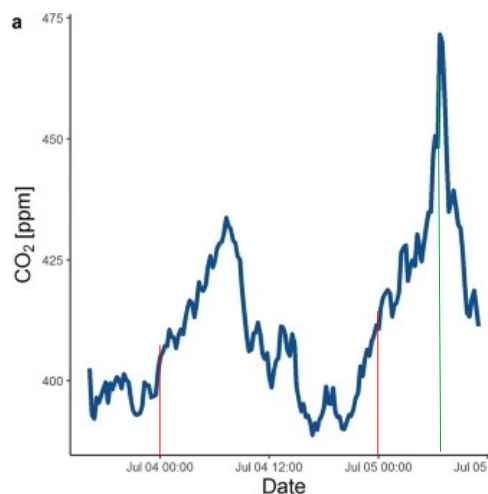


Figura 16. Concentracions de CO_2 abans, durant i després dels focs artificials.³² Les línies de colors s'han afegit posteriorment.

El mateix estudi mostra uns efectes similars pel monòxid de carboni (CO). Un pic es va donar entre les 10 de la nit i la mitjanit del 4 de juliol, a continuació va disminuir, i va tornar a augmentar assolint un màxim cap a les 6 de la matinada (vegeu les línies carbassa i blava de la Figura 17).

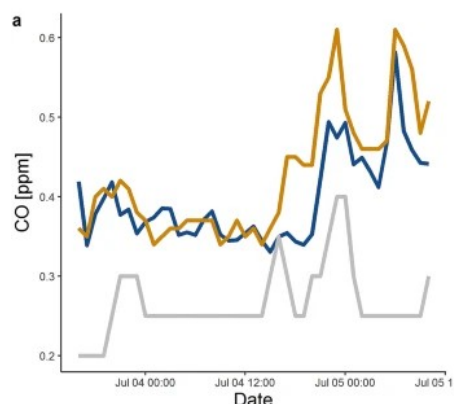


Figura 17. Focs artificials i qualitat de l'aire ambiental del 3 al 5 de juliol. a CO ppm. Les línies blava i carbassa representen les mesures de dues estacions de mostreig. La línia gris és la mitjana dels 2 anys anteriors.³²

Per tant, tots els contaminants analitzats a l'estudi mostraven un pic secundari amb concentracions tant o més altes que en els pics primaris. Aquests pics probablement són causa de la captura de contaminants deguts a la baixa velocitat del vent i a una inversió tèrmica, essent aquest, un fenomen molt més pronunciat a l'hivern.³²

6.5. Impactes sobre la salut

Els contaminants que s'alliberen a l'atmosfera tenen conseqüències a nivell de salut. Tot i que principalment es manifesten en alteracions respiratòries, s'ha de tenir en compte que els casos d'afectacions cardiovasculars, lesions, visites a urgències i accidents laborals també tenen un impacte en la salut pública.

6.5.1. Sistema respiratori

Les partícules emeses pels focs artificials es mantenen suspeses a l'aire durant unes hores fins que es dispersen per l'atmosfera. Tot i que aquest període de temps pot ser curt, la inhalació del fum durant els espectacles i festivals pot ser suficient per perjudicar la salut humana. Encara que sigui de curta durada, s'ha vist que l'exposició a nivells elevats de $PM_{2,5}$, compostos tòxics, SO_2 , NO_2 i precursors de l'ozó durant els focs artificials, contribueix a l'aparició d'inflamació i dificultat respiratòria, asma i estrès oxidatiu. També s'ha observat que, quan es produeix una activitat pirotècnica incontrolada i excessiva, es genera una contaminació molt elevada que pot provocar, en pacients amb patologies pulmonars, un augment de la seva medicació. És per això que es recomana que restin en interiors.^{48,59}

Entre les possibles conseqüències de la inhalació de fums durant els focs artificials a nivell respiratori, s'han descrit casos d'exacerbació de l'asma i de disminució de la funció pulmonar en pacients amb antecedents de malaltia respiratòria. Fins i tot, es va descriure un cas de pneumònia eosinofílica aguda després de la inhalació de fum de focs artificials durant tres nits consecutives.⁶⁰ Concretament el Cap d'Any del 2018, a Islàndia, quinze persones van necessitar ajuda mèdica d'urgència a causa de dificultats respiratòries, cinc de les quals van ser greus. A més, els pneumòlegs van notar que els seus pacients tenien més símptomes durant tot el mes de gener següent.⁵⁹

Les conseqüències respiratòries dels espectacles pirotècnics són especialment rellevants en infants. En aquests, després d'un espectacle, la taxa de deposició de partícules en el sistema respiratori pot augmentar fins a 4 vegades. Així mateix, la taxa de deposició a la tràquea també pot incrementar considerablement. El motiu és que tenen les defenses contra aquests contaminants poc desenvolupades, a més d'un epitel·li de les vies respiratòries més permeable i una activitat física més intensa; cosa que augmenta l'arribada d'aire als pulmons.⁶¹

6.5.2. Sistema cardiovascular

L'exposició general ambiental a les PM_{2,5} també s'associa a la mortalitat general per malalties cardiovasculars. Tot i que els riscos per la salut són més elevats en persones amb exposicions prolongades, s'ha vist que no hi ha evidència d'un llindar mínim de seguretat.⁶²

Concretament, en estudis d'exposició als focs artificials al festival Diwali, a l'Índia, es van observar riscos aguts per a la salut relacionats amb malalties cardiovasculars quan els nivells de PM₁₀, PM_{2,5} i altres contaminants augmentaven significativament. Aquest risc és particularment elevat en zones urbanes i industrials amb molta població, ja que, a més d'estar exposada a espectacles pirotècnics de major abast, també està exposada a altres fonts de contaminació com el trànsit i la indústria.^{63,64}

L'evidència científica mostra que, quan es redueixen els contaminants atmosfèrics –especialment els PM_{2,5}– mitjançant la regulació dels focs artificials, també es redueixen significativament el nombre d'ingressos hospitalaris per problemes cardiovasculars.⁶⁵

6.5.3. Càncer

Alguns dels estabilitzants utilitzats en fabricació –amines aromàtiques o derivats d'urees aromàtiques (vegeu punt 2.1)– poden produir espècies molt tòxiques i potencialment cancerígenes durant el procés de crema de l'artifici.¹⁷

Recentment, s'han estudiat les concentracions de PAHs després d'extingir el foc d'un incendi i s'ha comprovat que es mantenen elevades fins i tot una setmana després, assolint concentracions entre 15 i 20 vegades superiors als nivells de fons. De manera similar, el període posterior als focs artificials pot provocar una exposició elevada a PAHs de pesos moleculars més elevats, que són els més carcinogènics.⁶⁶

En un estudi a Bengala Occidental, a l'Índia, s'ha comprovat que les emissions relacionades amb els festivals de focs artificials provoquen pics de contaminants que perduren més enllà de les festivitats. Concretament, els valors de benzè en aquest festival van superar el límit que l'Agència de protecció ambiental dels EUA considera acceptable pel que fa al risc de càncer incremental durant la vida,^V cosa que pot suggerir un cert risc carcinogènic.⁶⁴

6.5.4. Lesions als sentits

Els focs artificials també tenen impacte en la **salut auditiva**. En espectacles pirotècnics normalment es detecten nivells sonors tan elevats que poden suposar un risc de pèrdua auditiva permanent.⁶⁷

V: El risc de càncer incremental durant la vida és una mesura o estimació de la probabilitat de desenvolupar càncer a partir d'una exposició a llarg termini.

En un estudi retrospectiu que abraça el període 2006-2022, es van enregistrar tots els pacients que acudien al servei d'urgències d'hospitals vinculats a una universitat d'otorrinolaringologia alemanya durant la nit de Cap d'Any. Les consultes es van classificar segons tres possibles causes: els focs artificials, esdeveniments amb violència i altres traumatismes associats al Cap d'Any. El total de pacients que hi va acudir per algun d'aquests tres motius va ser de 69. Tal com s'observa a la Figura 18, pràcticament cada any la major part de les consultes estaven relacionades amb els focs artificials i els principals diagnòstics van ser tinnitus (percepció de soroll quan no n'hi ha) i pèrdua d'audició.⁶⁸

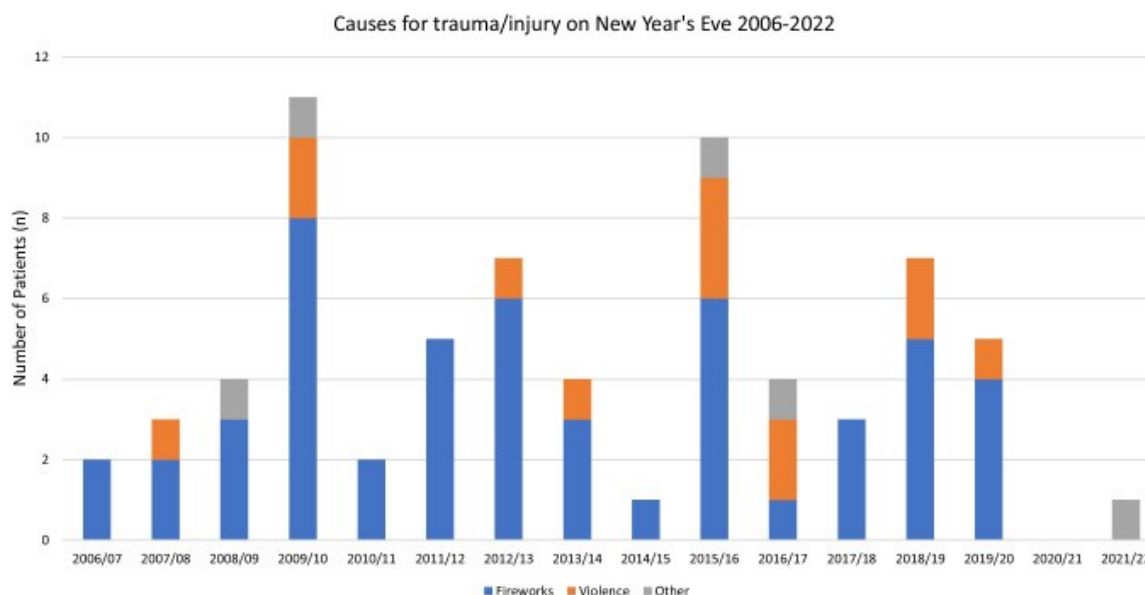


Figura 18. Causes de les presentacions d'emergència associades a la nit de Cap d'Any del 2006 al 2022 (en total n = 69).⁶⁸

Recentment, el 2025, s'ha fet una revisió sistemàtica de les **lesions facials i a les mans** causades pels focs artificials. Els més afectats són els homes joves amb lesions greus que impliquen fractures facials i traumatismes oculars. Per altra banda, i encara que l'afectació és menor, aquesta també s'ha observat en infants sobretot a mans i teixits tous.⁶⁹

Pel què fa a les **lesions oculars** produïdes pels focs artificials, aquestes solen ser greus, provocant sovint ceguesa, cremades importants i, fins i tot, desfiguració permanent. Un estudi observacional prospectiu va identificar i analitzar les lesions oculars provocades per l'ús de petards durant un mes al voltant del festival de tardor a l'Índia. D'un total de 49 pacients, gairebé la meitat es van haver de sotmetre a intervenció quirúrgica i el 36,7% van sortir amb una visió final inferior. Els principals afectats van ser nens i homes joves usuaris dels focs artificials, encara que també simples espectadors.⁷⁰

6.6. Pirotècnia sostenible

Les situacions de deteriorament de la qualitat de l'aire i de la salut humana provocades pels contaminants alliberats pels focs artificials es poden atenuar si s'estudien alternatives de la seva composició.

6.6.1. Canvis en la pólvora

La «pólvora flaix» és la causant principal de les emissions alliberades a l'atmosfera i de les molèsties provocades pels nivells de soroll durant l'ús de focs artificials.

Una opció que s'ha proposat és substituir-la per la nitrocel·lulosa o afegir-li compostos inerts com el bicarbonat de sodi (NaHCO_3) i el vidre reciclat. Quan es comparen aquestes alternatives amb la pirotècnia convencional, per una banda es redueixen significativament les emissions de CO_2 , mentre que per l'altre es produeixen més emissions de monòxid de carboni (CO). Respecte el canvi climàtic, un increment de CO no és tan perjudicial com el CO_2 . Això passa perquè el primer té un efecte indirecte i el seu temps de residència a l'atmosfera és molt menor, mentre que l'efecte perjudicial directe del CO_2 és molt més significatiu. La substitució de la nitrocel·lulosa per la pólvora no pot ser total, ja que no allibera prou energia per aconseguir l'obertura del projectil i, aleshores, no es produeix ni un bon funcionament del petard ni s'aconsegueixen els efectes visuals desitjats. Sí que és viable, però, la seva substitució parcial, ja que així es poden assolir temperatures i pressions d'explosió més altes. A més, en l'afegir compostos inerts com el bicarbonat, es produeix una reducció de les emissions de monòxid de carboni i s'evita l'alliberament de derivats de perclorat i de partícules metàl·liques, dos dels contaminants més nocius dels focs artificials. El bicarbonat, a més, té un altre avantatge, i és que en concentracions adequades produeix una reducció dels nivells de pressió sonora d'aproximadament un 50% sense comprometre la pressió d'explosió.⁷¹

També s'ha analitzat la possible substitució del sofre de la pólvora. A dia d'avui, ja existeixen propulsants sense sofre ni fum elaborats a partir de pols metàl·lica i pólvora militar. Tot i això, són poc estables i molt poc segurs. Hi ha alguna formulació alternativa sense sofre^{VI} que ha demostrat un rendiment satisfactori en l'alçada del llançament, una relativa estabilitat a altes temperatures, i una producció i emmagatzematge més segurs. A més, i tot i formular-se usant perclorat, s'ha vist que aquest, a diferència de la pólvora clàssica, es consumeix totalment durant la combustió, de manera que s'aconsegueix que no s'alliberi a l'ambient. Per tant, aquestes alternatives sense sofre tenen el potencial suficient de substituir la pólvora negra en la indústria pirotècnica.⁷²

6.6.2. Canvis en altres components

Altres formes de controlar les emissions dels focs artificials són la reducció de la quantitat de nitrat de bari i l'ús d'additius com la zeolita i l'òxid de ferro. Amb aquestes modificacions s'observen nivells significativament inferiors de PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ i de bari d'entre un 30% i un 60% en comparació amb els convencionals, amb l'avantatge que no afecta el seu rendiment.⁷³

Per aconseguir eliminar els metalls i el sofre, també s'han estudiat composicions emprant el 5-aminotetrazole. Amb aquesta modificació s'ha aconseguit reduir la quantitat de residus i de $\text{PM}_{2,5}$; a més d'un augment en el perfil de seguretat, tant en la preparació, com en el transport i en l'emmagatzematge. El gas produït per aquesta nova composició és, en més d'un 93%, N_2 , H_2O i CO_2 , i lliure de vapors amb SO_2 o NO_x , i per tant, són més respectuosos amb el medi ambient i més segurs. Fins i tot, en alguns aspectes, pot superar la pólvora basada en nitrocel·lulosa. Tot i això, per

VI: Composta de perclorat de potassi (70 %), tereftalat de potassi (10 %), carboni (11 %), ferrocè (1 %), resina fenòlica (7 %), estearat de calci (2 %).

valorar completament la seva viabilitat, encara són necessàries investigacions acústiques i lumíniques, entre d'altres.⁷⁴

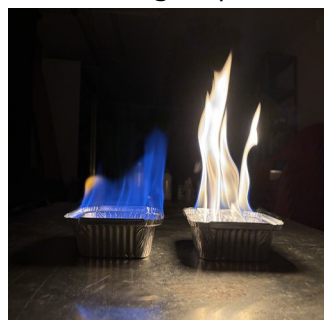
L'espectacle visual mitjançant drons també és una bona alternativa per la seva versatilitat i ecologisme. L'any 2015, l'empresa Intel va aconseguir fer volar 100 drons de forma coordinada en un experiment i, un any més tard, ja va aconseguir fer-ho amb uns 500. Més endavant, a la Xina, es van enlairar 1.000 drons formant diverses formes i figures per celebrar l'Any Nou. A partir d'aquí, s'ha anat estenent en diferents espectacles sobretot en ciutats xineses on, darrerament, s'han anat prohibint els focs artificials convencionals per a controlar la contaminació atmosfèrica. Gràcies a la Intel·ligència Artificial, s'han millorat aquests espectacles fins al punt que, a Liuyang, se'n va fer un amb quasi 16.000 drons que il·luminaven el cel controlats per la IA (vegeu Figura 19).^{75,76}



Figura 19. A Liuyang, la “capital mundial dels focs artificials”, hi va haver un espectacle on 15.947 drons van ser controlats alhora amb Intel·ligència Artificial.⁷⁵

6.7. Experimentació

En primer lloc, per determinar el combustible a emprar, s'ha comprovat la diferència de la flama provocada pel metanol i l'etanol. Tal com s'observa a la Fotografia 1, el metanol produeix una flama blava molt menys lluminosa que la de l'etanol. Així, per poder observar els colors de les flames de les sals inorgàniques amb més claredat, la flama del metanol interferirà menys que la de l'etanol.

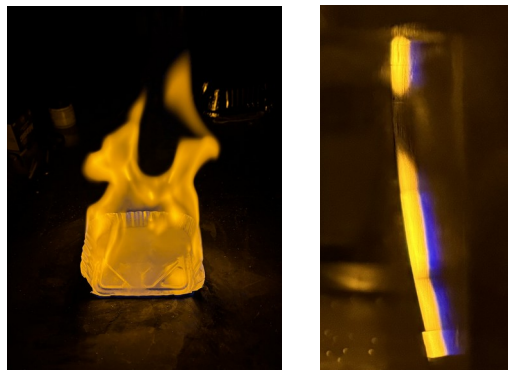


Fotografia 1. Colors de les flames produïdes al cremar metanol (esquerra) i etanol (dreta).

Colors de la fama i espectre observat

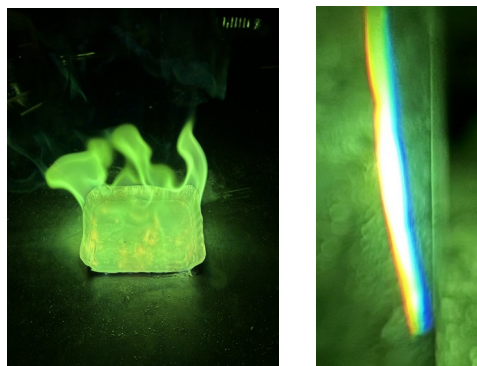
Pel que fa a la observació dels efectes produïts per les diferents sals metàl·liques, els resultats obtinguts per cadascuna han estat els següents:

Bicarbonat sòdic (NaHCO_3). Les sals de sodi s'utilitzen molt en pirotècnia pel seu color groc (vegeu punt 2.1). Quan es crema el bicarbonat s'observa una flama molt groga produïda pel sodi gràcies al fenomen de luminescència (vegeu Fotografia 2). En utilitzar el prisma per observar l'espectre d'emissió del sodi, queden molt ben definides les franges groga i blava coincidint amb l'espectre d'emissió de l'element (vegeu Annex II)



Fotografia 2. Flama produïda pel bicarbonat sòdic (esquerra) i el seu espectre d'emissió observat (dreta).

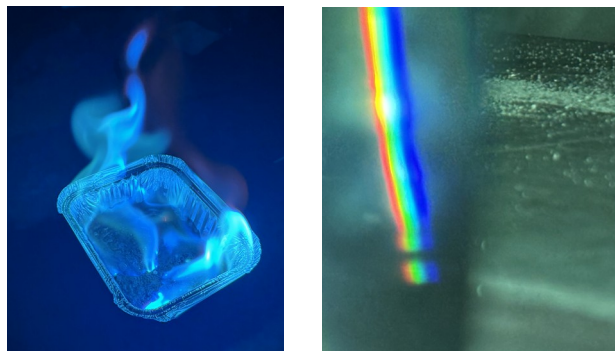
Àcid bòric (H_3BO_3). Tot i que per aconseguir el color verd en els focs artificials s'utilitzen sals de bari, en aquest cas s'ha utilitzat el bor per aconseguir el color verd (vegeu Fotografia 3). Tot i que l'espectre d'emissió no és gaire definit, sí que s'identifiquen clarament franges vermelles, blaves i alguna de verda, fet que el fa coincidir relativament amb l'espectre d'emissió del bor (vegeu Annex II). La franja groga pot ser deguda a la formació d'espècies com òxids de bor que hi haurien interferit i emès longituds d'ona corresponents al groc.



Fotografia 3. Flama produïda per l'àcid bòric (esquerra) i el seu espectre d'emissió observat (dreta).

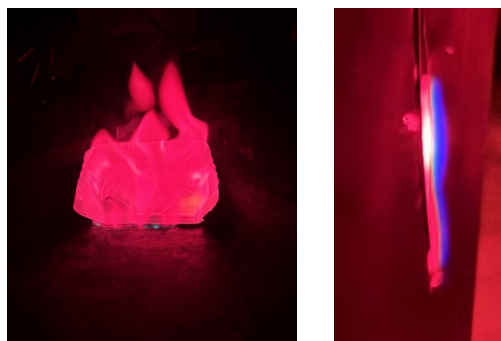
Clorur de coure (CuCl_2) Les sals de coure tenen un ús habitual en pirotècnia per aconseguir el color blau. Quan una sal com el clorur de coure es crema, la flama esdevé blava pel fenomen de la luminescència produït pels àtoms de coure (vegeu Fotografia 4). Inicialment el color que emet és blau turquesa i no és fins que arriba a una temperatura suficientment elevada que apareix el color blau. Si es descompon la llum observant-la a través del prisma s'aprecien molt clarament franges vermelles, grogues, verdes i blaves. Aquest espectre no coincideix massa amb el del coure, que no

conté cap franja vermella, i això pot ser degut a la interferència del clor que sí que presenta aquestes franges en el seu espectre d'emissió (vegeu Annex II).



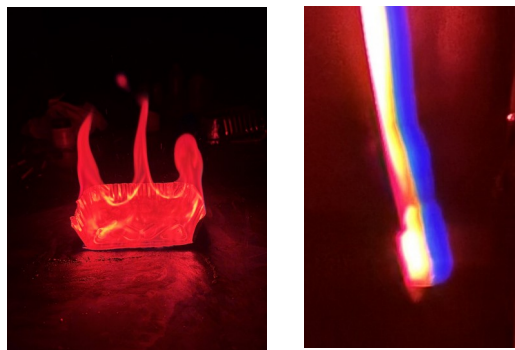
Fotografia 4. Flama produïda pel clorur de coure (esquerra) i el seu espectre d'emissió observat (dreta).

Clorur de liti (LiCl). Encara que el liti no és dels elements més emprats en la indústria pirotècnica, és un clar exemple del fenomen de luminescència pel color que emet la llum de la seva flama. Quan el clorur de liti es crema i adquireix una elevada temperatura, es produeix una flama magenta molt característica d'aquest element (vegeu Fotografia 5). Al prisma s'aprecien unes franges vermella i blava molt marcades que coincideixen amb l'espectre d'emissió del liti (vegeu Annex II).



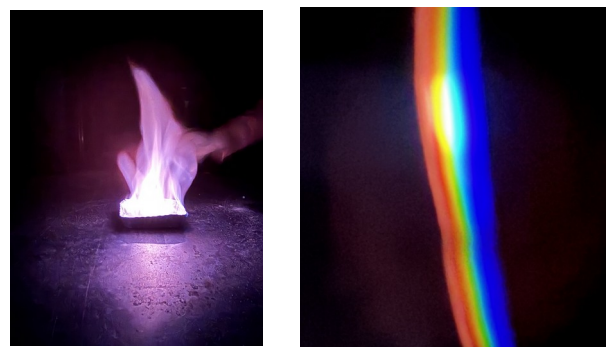
Fotografia 5. Flama produïda pel clorur de liti (esquerra) i el seu espectre d'emissió observat (dreta).

Clorur d'estronci (SrCl_2). L'estronci, molt utilitzat en els focs artificials, produeix luminescència generant un color vermell intens quan els seus electrons tornen al seu estat fonamental (vegeu Fotografia 6). Quan s'observa la llum a través del prisma, es descompon formant franges vermelles, grogues, taronges i blaves no massa coincidents amb l'espectre de l'element. Aquest fet, tal com passava amb el coure, pot ser degut al clor present en la sal que interfereix en l'espectre de l'estronci (vegeu annex II).



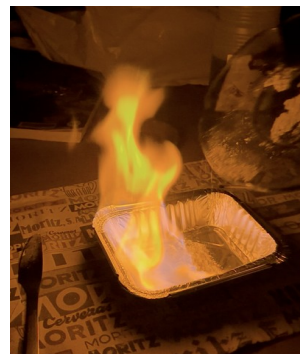
Fotografia 6. Flama produïda pel clorur d'estranci (esquerra) i el seu espectre d'emissió observat (dreta).

Clorur de potassi (KCl). Tal com passa amb el liti, el potassi tampoc és dels elements més emprats en pirotècnia. El color violeta dels focs artificials s'acostuma a aconseguir amb mescles de coure i estranci. Tot i això, quan es crema potassi, gràcies a la luminescència, també es forma un color violeta molt marcat (vegeu Fotografia 7). A través del prisma, s'observa una forta coincidència amb l'espectre del potassi (vegeu Annex II).



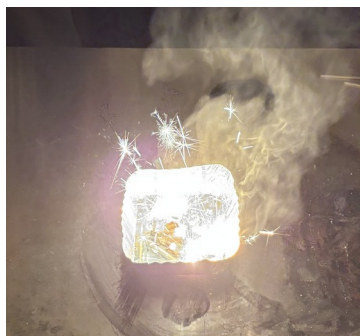
Fotografia 7. Flama produïda pel clorur de potassi (esquerra) i el seu espectre d'emissió observat (dreta).

Carbonat de calci (CaCO_3). El color taronja en els focs artificials s'assoleix, pràcticament sempre, amb el calci. En aquest cas, en no haver-se pogut adquirir cap sal de calci, s'ha aconseguit triturant guixos blancs, que contenen carbonat càlcic. Encara que no s'ha pogut observar la llum de la flama a través del prisma perquè el color es mantenia poc temps, els resultats del color de la flama han estat els esperats (vegeu Fotografia 8).



Fotografia 8. Flama produïda pel carbonat de calci.

Alumini: En pirotècnia s'utilitza l'alumini (així com el ferro i el titani) per aconseguir espurnes blanques i brillants (vegeu punt 2.1). Per exemple, les bengales, a banda d'aglutinants i pólvora, contenen llimadures de ferro i alumini que, gràcies al fenomen d'incandescència, formen les espurnes blanques (vegeu Fotografia 9).



Fotografia 9. Espurnes produïdes al cremar pólvora, llimadures de ferro i alumini.

7. Conclusions

Aquest treball és una aproximació al funcionament bàsic dels focs artificials i les seves conseqüències a nivell ambiental i sanitari.

Mitjançant la recerca bibliogràfica s'ha observat que els espectacles pirotècnics provoquen una contaminació de l'ambient augmentant els nivells de contaminants com PM, COVs, metalls, PAHs i òxids, entre d'altres. Tot i això, en alguns aspectes, com en el cas de el O_3 i els PAHs, la literatura presenta conclusions divergents. Mentre que en algunes recerques sembla evident l'augment d'aquests contaminants, en altres es planteja la possibilitat que, o bé la presència de contaminants sigui deguda a interferències en els aparells de mesura, o bé no es considera que els focs artificials siguin una font significativa d'emissió dels mateixos. Aquesta manca d'homogeneïtat demostra una necessitat d'incrementar el nombre d'estudis realitzats en la matèria.

També s'ha observat que la inhalació d'aquestes substàncies pot provocar i exacerbar problemes respiratoris, cardiovascular i en alguns casos, fins i tot, s'ha relacionat amb el càncer i la mortalitat prematura. També produeixen un augment del soroll ambiental i afecten la salut auditiva, els animals domèstics i, en especial, les persones afectades per alguna neurodivergència.

En estudis recents, s'han valorat alternatives en la formulació de la pirotècnia per fer-la més sostenible i segura com, per exemple, l'ús de drons que permetin una simulació força acurada als espectacles pirotècnics.

Per acabar, cal destacar la necessitat de realitzar més estudis que valorin millor les emissions i les conseqüències dels usos excessius dels focs artificials, així com d'augmentar les investigacions relacionades amb la producció i la transició cap a una pirotècnia més sostenible. Tot i que és evident que cal controlar les emissions de contaminants que es donen a causa de la producció d'electricitat, del transport i de l'agricultura, aquestes activitats estan relacionades amb la satisfacció de les necessitats bàsiques; mentre que, els espectacles pirotècnics s'organitzen només

per plaer i entreteniment. Per tant, correspon a les autoritats decidir quin control i regulació necessita cada tipus d'emissió.

Finalment, comentar algunes limitacions d'aquest treball. Pel que fa a la part teòrica, en alguns aspectes s'ha trobat poca informació accessible, per exemple la relacionada amb la pólvora. Això ha comportat que s'hagin hagut d'utilitzar llibres com a font d'informació que, en molts casos, eren bastant antics. En referència a la revisió de la literatura dels contaminants alliberats pels focs artificials s'han donat dues situacions. En alguns casos hi havia molts estudis rellevants sobre el tema i ha resultat complicat fer una tria dels més rellevants a risc de perdre informació significativa. En altres casos, la literatura era limitada fins al punt d'haver de consultar algun article de fa una més de 10 anys. Pel que fa a la part experimental, les limitacions han vingut donades pel fet que eren experiments fets des de casa i no en les condicions òptimes de laboratori. Aquest fet ha pogut provocar que alguns dels resultats –sobretot en l'observació dels espectres d'emissió– no hagin estat del tot exactes.

8. Bibliografia

- (1) Russell, M. S. *The Chemistry of Fireworks*, 2a Edició.; RSC Publishing, 2009.
- (2) Andrade, T. *The Gunpowder Age: China, Military Innovation, and the Rise of the West in World History*, 1st ed.; University Press: Princeton, 2016. <https://doi.org/10.1515/9781400874446>.
- (3) ¿Cómo se crean los colores y por qué los vemos? Modelos de color y métodos de su descripción. PCC Group Product Portal. <https://www.products.pcc.eu/es/blog/como-se-crean-los-colores-y-por-que-los-vemos-modelos-de-color-y-metodos-de-su-descripcion/> (Data de consulta: 15-10-2025).
- (4) Cámara, O. *La química de los colores de los fuegos artificiales*. Plaza Cielo Tierra. <https://plazacielotierra.org/la-quimica-de-los-colores-de-los-fuegos-artificiales/> (Data de consulta: 15-10-2025).
- (5) García, C. *En la Semana de la Ciencia, un taller sobre química forense y fenómenos luminiscentes*. <https://portalcomunicacion.uah.es/diario-digital/actualidad/6571-en-la-semana-de-la-ciencia-un-taller-sobre-quimica-forense-y-fenomenos-luminiscentes.html/> (Data de consulta: 15-10-2025).
- (6) Vieta, P. A. Focs artificials, Química pura. PepQuímic. <https://pepquimic.wordpress.com/2009/07/30/focs-artificials-quimica-pura/> (Data de consulta: 15-10-2025).
- (7) Universitat de València. *El color de los fuegos artificiales, explicado gracias a la química*. https://www.uv.es/uvweb/master-quimica/ca/blog/color-los-fuegos-artificiales-explicado-gracias-quimica-1285949128883/GasetaRecerca.html?id=1285960925955&plantilla=MU_Quimica/Page/TPGDetaill (Data de consulta: 19-10-2025).
- (8) Sutherland, S. *The science behind spectacular Canada Day firework displays*. The Weather Network. <https://www.theweathernetwork.com/en/news/science/explainers/science-behind-fireworks-colours-patterns-and-displays> (Data de consulta: 26-02-2026).
- (9) Kuhn, O. *Science Break: Fireworks*. CSEG RECORDER Magazine. <https://www.csegrecorder.com/columns/view/science-break-201712> (Data de consulta: 06-11-2025).
- (10) Universitat de València. *La química de la pólvora*. https://www.uv.es/uvweb/master-quimica/es/blog/quimica-polvora-1285949128883/GasetaRecerca.html?id=1285960614806&plantilla=MU_Quimica/Page/TPGDetaill (Data de consulta: 19-10-2025).
- (11) Un Passeig Pel Món de La Pirotècnia. <https://www.urv.cat/html/consellsocial/PSecundaria/DVD%20Premis%202007-09/material/08cap02/08cap02.pdf> (Data de consulta: 19-10-2025).
- (12) *PyroData*. <https://pyrodata.com/definitions/Black-Powder> (Data de consulta: 22-10-2025).
- (13) Brunning, A. *The Chemistry of Gunpowder*. Compound Interest. <https://www.compoundchem.com/2014/07/02/the-chemistry-of-gunpowder/> (Data de consulta: 22-10-2025).
- (14) Pérez de Azpeitia, F. I. de P. El fuego: química y espectáculo. *An. Quím. RSEQ* **2006**, No. 2, 54–59.
- (15) Pérez de Azpeitia, F. I. de P. Fundamento científico de los artificios pirotécnicos. *Rev. Eureka Sobre Enseñ. Divulg. Las Cienc.* **2013**, 273–281.

- (16) Shimizu, T. *Fireworks: The Art, Science and Technique*, 3rd ed.; Pyrotechnica Publications: Austin, Tex., U.S.A, 1991.
- (17) Dejeaifve, A. Making Progress Towards «Green» Propellants. **2018**. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/prep.201800026>.
- (18) Foghsgaard, L. *New Year's rocket science*. ScienceNordic. <https://www.sciencenordic.com/art-chemistry-denmark/new-years-rocket-science/1412442> (Data de consulta: 06-11-2025).
- (19) *Anatomy of a Firework*. NOVA Online. https://www.pbs.org/wgbh/nova/fireworks/anat_nf.html#launchtube (Data de consulta: 04-12-2025).
- (20) Woodford, C. *Firework science*. Explain that Stuff. <http://www.explainthatstuff.com/howfireworkwork.html> (Data de consulta: 04-12-2025).
- (21) *Emisiones a la Atmósfera*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/emisiones-a-la-atmosfera.html> (Data de consulta: 07-12-2025).
- (22) US EPA. *Particulate Matter (PM) Basics*. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics> (Data de consulta: 07-12-2025).
- (23) Cortés, A. Unitat 9. Qualitat de l'aire i Gestió de l'ambient Atmosfèric, 2025.
- (24) *Metales pesados*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/emisiones-a-la-atmosfera/emisiones-problematica-ambiental/metales_pesados.html (Data de consulta: 08-12-2025).
- (25) *Principals contaminants*. Medi Ambient i Sostenibilitat. http://mediambient.gencat.cat/ca/05_ambits_dactuacio/atmosfera/qualitat_de_laire/principals_contaminants/index.html (Data de consulta: 11-02-2026).
- (26) *Gases acidificantes*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/emisiones-a-la-atmosfera/emisiones-problematica-ambiental/gases_acidificantes.html (Data de consulta: 10-12-2025).
- (27) *Principals contaminants atmosfèrics*. Agència de Salut Pública de Catalunya (ASPCAT). <http://salutpublica.gencat.cat/ca/ambits/proteccio/aire/principals-contaminants/index.html> (Data de consulta: 17-12-2025).
- (28) *Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (POPs)*. <https://www.pops.int/TheConvention/ThePOPs/AllPOPs/tabid/2509/Default.aspx> (Data de consulta: 11-02-2026).
- (29) *Què i quins són els COP?*. Medi Ambient i Sostenibilitat. http://mediambient.gencat.cat/ca/05_ambits_dactuacio/empresa_i_produccio_sostenible/substancies_quimiques/contaminants-organics-persistents/que-son-cop/ (Data de consulta: 11-02-2026).
- (30) Osa, R. A. de la. *Formulació i nomenclatura de Química Orgànica*. FisiQuímicament. <https://fisiquimicament.com/recursos-fisica-quimica/apunts/formulacio-nomenclatura-quimica/organica/> (Data de consulta: 28-02-2026).

- (31) Què és el soroll?. Medi Ambient i Sostenibilitat. http://mediambient.gencat.cat/ca/05_ambits_dactuacio/atmosfera/contaminacio_acustica/informacio-general-sobre-la-contaminacio-acustica/que_es_el_soroll/ (Data de consulta: 11-12-2025).
- (32) Gonzalez, A.; Boies, A.; Swanson, J.; Kittelson, D. Measuring the Effect of Fireworks on Air Quality in Minneapolis, Minnesota. *SN Appl. Sci.* **2022**, 4 (5), 142. <https://doi.org/10.1007/s42452-022-05023-x>.
- (33) *Inversió tèrmica*. RAC1. <https://www.rac1.cat/info-rac1/20190227/46741292014/inversio-termica.html> (Data de consulta: 28-02-2026).
- (34) *Inversión térmica - Portal de Calidad del aire*. <https://airedemadrid.madrid.es/portales/calidadaire/es/Contaminacion-atmosferica/Inversion-termica/?vgnextfmt=default&vgnextchannel=a26e471c5c503710VgnVCM1000008a4a900aRCRD> (Data de consulta: 10-02-2026).
- (35) *La inversió tèrmica: què és i quin efecte té sobre la qualitat de l'aire?* <https://blogs.amb.cat/educacioambiental/2024/02/01/la-inversio-termica-que-es-i-quin-efecte-te-sobre-la-qualitat-de-laire/> (Data de consulta: 10-02-2026).
- (36) BOE-A-2015-12054 *Real Decreto 989/2015, de 30 de Octubre, Por El Que Se Aprueba El Reglamento de Artículos Pirotécnicos y Cartuchería*. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2015/10/30/989> (Data de consulta: 18-11-2025).
- (37) UNE-EN 15947-5:2023. <https://tienda.aenor.com/norma-une-en-15947-5-2023-n0071146> (Data de consulta: 23-02-2026).
- (38) HRom. *COLOREAMOS EL FUEGO GRACIAS A LOS ESPECTROS DE EMISIÓN*; 2021. <https://www.youtube.com/watch?v=nqeTcagCvZQ> (Data de consulta: 18-10-2025).
- (39) Pep Anton Vieta. *Foc de Colors, La Química Dels Focs Artificials*; 2009. <https://www.youtube.com/watch?v=0xIOl1cvLnM> (Data de consulta: 18-10-2025).
- (40) Yao, L.; Wang, D.; Fu, Q.; Qiao, L.; Wang, H.; Li, L.; Sun, W.; Li, Q.; Wang, L.; Yang, X.; Zhao, Z.; Kan, H.; Xian, A.; Wang, G.; Xiao, H.; Chen, J. The Effects of Firework Regulation on Air Quality and Public Health during the Chinese Spring Festival from 2013 to 2017 in a Chinese Megacity. *Environ. Int.* **2019**, 126, 96–106. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.037>.
- (41) Mousavi, A.; Yuan, Y.; Masri, S.; Barta, G.; Wu, J. Impact of 4th of July Fireworks on Spatiotemporal PM_{2.5} Concentrations in California Based on the PurpleAir Sensor Network: Implications for Policy and Environmental Justice. *Int. J. Environ. Res. Public. Health* **2021**, 18 (11), 5735. <https://doi.org/10.3390/ijerph18115735>.
- (42) Lombera, E. N.; Bori, G.; Vergara, R. O. Assessment of Noise Pollution of Fireworks during Christmas and New Year in the City of Buenos Aires: Comparison with a Different Management Strategy Applied to the City of Santiago de Chile. *Discov. Environ.* **2023**, 1 (1), 19. <https://doi.org/10.1007/s44274-023-00020-2>.
- (43) Pirker, L.; Velkavrh, Ž.; Osīte, A.; Drinovec, L.; Močnik, G.; Remškar, M. Fireworks—a Source of Nanoparticles, PM_{2.5}, PM₁₀, and Carbonaceous Aerosols. *Air Qual. Atmosphere Health* **2022**, 15 (7), 1275–1286. <https://doi.org/10.1007/s11869-021-01142-3>.

- (44) Kang, C.; Lyu, R.; Luo, M.; Jia, J.; Liu, M.; Qin, C.; Peng, Y.; Cao, B.; Zou, C.; Ma, Y. Analysis of Pollution Characteristics and Contributions of Firework Burnings in Nanchang during the Spring Festival. *ACS Omega* **2024**, 9 (36), 37754–37762. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c03237>.
- (45) Rocco, D.; Morales, E.; Deflin, T.; Truong, J.; Ju, J.; Curtis, D. B. The Impact of Fireworks on Selected Ambient Particulate Metal Concentrations Associated with the Independence Day Holiday. *Atmosphere* **2025**, 16 (1), 17. <https://doi.org/10.3390/atmos16010017>.
- (46) Saporito, A. F.; Gordon, T.; Kim, B.; Huynh, T.; Khan, R.; Raja, A.; Terez, K.; Camacho-Rivera, N.; Gordon, R.; Gardella, J.; Katsigeorgis, M.; Graham, R.; Kluz, T.; Costa, M.; Luglio, D. Skyrocketing Pollution: Assessing the Environmental Fate of July 4th Fireworks in New York City. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.* **2025**, 35 (2), 214–222. <https://doi.org/10.1038/s41370-024-00701-x>.
- (47) *Fireworks: A major source of inorganic and organic aerosols during Christmas and New Year in Mexico city* - ScienceDirect. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590162119300164?pes=vor&utm_source=acs&getft_integrator=acs (Data de consulta: 10-02-2026).
- (48) Panjikkaran, A. J.; Middey, A.; Majumdar, D. Fingerprints of Festive Emissions on PM_{2.5} in an Urban Metropolis: Carbonaceous Species, Metals, and Aerosol Acidity. *Urban Clim.* **2025**, 64, 102635. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2025.102635>.
- (49) *De compuestos orgánicos volátiles*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/emisiones-a-la-atmosfera/emisiones-actividades-emisoras/compuestos_organicos_volatiles.html (Data de consulta: 10-12-2025).
- (50) Liu, Y.; Ma, W.; Yin, S.; Li, C.; Xu, K.; Zhang, C.; Zhang, W.; Xue, Z.; Sun, Y.; Ji, D.; Li, J.; Chen, J.; Tian, H.; Liu, X. Quantification of Enhanced VOC Emissions from Fireworks. *Environ. Pollut.* **2022**, 315, 120389. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120389>.
- (51) Ambade, B. The Air Pollution during Diwali Festival by the Burning of Fireworks in Jamshedpur City, India. *Urban Clim.* **2018**, 26, 149–160. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.08.009>.
- (52) Zhu, Q.; Yang, B.; Bu, L.; Fan, Z.; Cai, H. Portable Ozone Differential Absorption Lidar System and Applications. *Guangxue XuebaoActa Opt. Sin.* **2025**, 45 (12). <https://doi.org/10.3788/AOS250474>.
- (53) Xu, Z.; Nie, W.; Chi, X.; Huang, X.; Zheng, L.; Xu, Z.; Wang, J.; Xie, Y.; Qi, X.; Wang, X.; Xue, L.; Ding, A. Ozone from Fireworks: Chemical Processes or Measurement Interference? *Sci. Total Environ.* **2018**, 633, 1007–1011. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.203>.
- (54) Schmid, P.; Bogdal, C.; Wang, Z.; Azara, V.; Haag, R.; von Arx, U. Releases of Chlorobenzenes, Chlorophenols and Dioxins during Fireworks. *Chemosphere* **2014**, 114, 158–164. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.03.088>.
- (55) Hu, U.; Sun, Y.; Yang, G.; Liu, M.; Gao, Y.; Lin, L.; Cao, Y.; Liu, W.; Huo, Y.; Liu, J.; Li, Q. Spring Festival Firework Activities Exacerbate Toxic Effects of Aerosol Essential Components. *J. Hazard. Mater.* **2025**, 490, 137874. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.137874>.
- (56) Kong, S.; Li, X.; Li, L.; Yin, Y.; Chen, K.; Yuan, L.; Zhang, Y.; Shan, Y.; Ji, Y. Variació d'hidrocarburs Aromàtics Policíclics En PM_{2.5} atmosfèric 2.5 Durant El Període de Boira Hivernal al Voltant de 2014 Festival de Primavera Xinesa a Nanjing: Informació Sobre Els Canvis d'origen, La Direcció de La

Massa d'aire i La Injecció de Partícules de Focs Artificials. *Sci. Total Environ.* **2015**, 520, 59–72. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.001>.

(57) Jia, C.; Xue, Z.; Fu, X.; Sultana, F.; Smith, L. J.; Zhang, Y.; Li, Y.; Liu, B. Impacts of Independence Day Fireworks on Pollution Levels of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in the U.S. *Sci. Total Environ.* **2020**, 743, 140774. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140774>.

(58) Zhang, J.; Yang, L.; Ledoux, F.; Courcot, D.; Mellouki, A.; Gao, Y.; Jiang, P.; Li, Y.; Wang, W. PM2.5-Bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and Nitrated PAHs (NPAHs) in Rural and Suburban Areas in Shandong and Henan Provinces during the 2016 Chinese New Year's Holiday. *Environ. Pollut.* **2019**, 250, 782–791. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.040>.

(59) Andradottir, H. O.; Thorsteinsson, T. Repeated Extreme Particulate Matter Episodes Due to Fireworks in Iceland and Stakeholders' Response. *J. Clean. Prod.* **2019**, 236, 117511. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.342>.

(60) Greven, F. E.; Vonk, J. M. Air Pollution during New Year's Fireworks and Daily Mortality in the Netherlands. *Sci. Rep.* **2019**, 9 (1), 5735. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42080-6>.

(61) Salma, I.; Farkas, Á.; Weidinger, T.; Balogh, M. Firework Smoke: Impacts on Urban Air Quality and Deposition in the Human Respiratory System. *Environ. Pollut.* **2023**, 328, 121612. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121612>.

(62) Liu, Z.; Wang, F.; Li, W.; Yin, L.; Wang, Y.; Yan, R.; Qian, X. L.; Kan, H.; Tse, L. A. Does Utilizing WHO's Interim Targets Further Reduce the Risk - Meta-Analysis on Ambient Particulate Matter Pollution and Mortality of Cardiovascular Diseases? - ScienceDirect. **2018**, 242 (B), 1299–1307. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.041>.

(63) Kansal, A.; Dhakate, P. M.; Deep, A.; Gautam, A. S.; Gautam, S. Comprehensive Assessment of Air Quality During Diwali Celebrations in Himalayan Foothill Cities. *Aerosol Sci. Eng.* **2025**. <https://doi.org/10.1007/s41810-025-00295-3>.

(64) Karmakar, S.; Koley, A.; Gupta, N.; Kumar, S.; Balachandran, S.; Das, N.; Chakraborty, D. Seasonal Dynamics of Air Pollution and Health Risks during Festive Periods in Metropolitan and Industrial Zones of Eastern India. *Discov. Public Health* **2025**, 22 (1), 534. <https://doi.org/10.1186/s12982-025-00908-9>.

(65) Chen, S.; Jiang, L.; Liu, W.; Song, H. Fireworks Regulation, Air Pollution, and Public Health: Evidence from China. *Reg. Sci. Urban Econ.* **2022**, 92, 103722. <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2021.103722>.

(66) Strandberg, B.; Lovén, K.; Malmborg, V.; Özdemir, J.; Pagels, J.; Hedmer, M.; Hagvall, L. PAH Exposure and Associated Health Risks Can Be High at a Fire Site Both during Fire and Long after the Fire Is Extinguished. *Ann. Work Expo. Health* **2026**, 70 (2), wxag003. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxag003>.

(67) Kukulski, B.; Wszolek, T.; Mleczko, D. The Impact of Fireworks Noise on the Acoustic Climate in Urban Areas. *Arch. Acoust.* **2018**, 43 (4), 697–705. <https://doi.org/10.24425/aoa.2018.125163>.

(68) Werz, J.; Greve, J.; Hoffmann, T. K.; Hahn, J. New Year's Eve in Otorhinolaryngology: A 16-Year Retrospective Evaluation. *Eur. Arch. Otorhinolaryngol.* **2023**, 280 (7), 3453–3459. <https://doi.org/10.1007/s00405-023-07966-2>.

- (69) Heilenman, A.; Kaneb, A.; Kogan, S.; Hinson, M.; Runyan, C. The Impact of Fireworks on Facial Trauma: A Literature Review and Case Study. *FACE* **2025**, *6* (4), 685–691. <https://doi.org/10.1177/27325016251362421>.
- (70) Patel, R.; Mukherjee, B. Crash and Burn: Ocular Injuries Due to Fireworks. **2014**, *31* (3), 243–248. <https://doi.org/https://doi.org/10.3109/08820538.2014.962157>.
- (71) León, D.; Amez, I.; Paredes, R.; Pantelakis, D.; Castells, B. Assessment of Sustainable Compositions to Reduce Emissions and Sound Pressure Level of Flash Powder. *Environ. Pollut.* **2025**, *381*, 126660. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126660>.
- (72) Sun, Y.; Han, Z.; Du, Z.; Li, Z.; Cong, X. Preparation and Performance of Environmental Friendly Sulphur-Free Propellant for Fireworks. *Appl. Therm. Eng.* **2017**, *126*, 987–996. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.003>.
- (73) Wankhede, U.; Khaparde, V. V.; Balpande, K.; Shinde, V. M.; Rayalu, S. 'Green Firecrackers' with Reduced Barium Emissions in Particulate Matter. *Environ. Pollut.* **2023**, *317*, 120739. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120739>.
- (74) Zheng, D.; Wang, J.; Duo, Y.; Liu, J. Performance Study of Eco-Friendly and Safe Pyrotechnics for Fireworks. *Propellants Explos. Pyrotech.* **2024**, *49* (10–11), e202400024. <https://doi.org/10.1002/prep.202400024>.
- (75) Redacción Clarín. China Hizo El Mayor Show de Drones de La Historia: Casi 16.000 Controlados al Mismo Tiempo Con IA. Clarín 2025. https://www.clarin.com/internacional/china-hizo-mayor-show-drones-historia-16000-controlados-mismo-tiempo-ia_0_Zljvdx2E5y.html (Data de consulta: 21-02-2026).
- (76) Bejerano, P. G. *El vuelo coordinado de drones: una alternativa a los fuegos artificiales*. Blogthinkbig.com. <https://blogthinkbig.com/vuelo-coordinado-drones-alternativa-fuegos-artificiales> (Data de consulta: 21-02-2026).
- (77) educaplus.org. *Propiedades de los elementos*. Educaplus.org. <http://www.educaplus.org/elementos-quimicos/index.html> (Data de consulta: 03-01-2026).

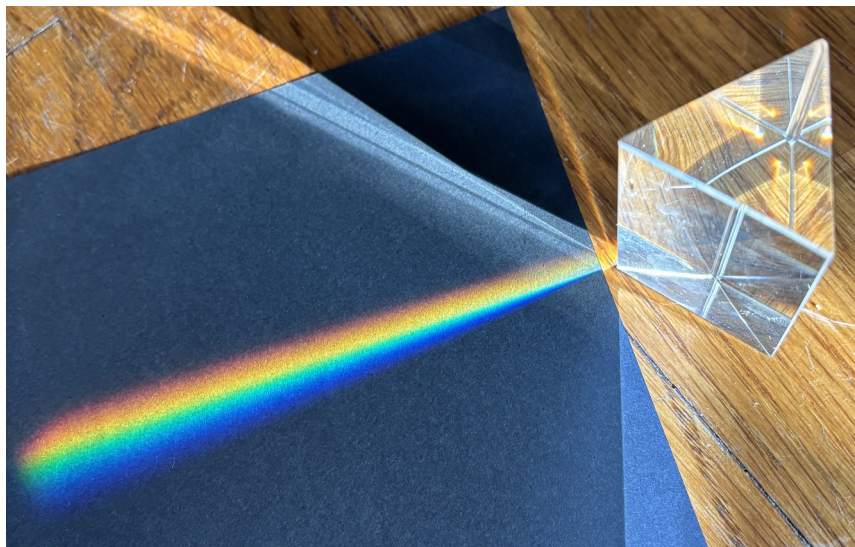
9. Annexos

Annex I: Què són els espectres d'emissió?

Degut al fenomen de luminescència, un àtom pot absorbir diferents tipus d'energia i que els seus electrons passin a estats excitats amb una energia determinada. Quan els electrons tornen al seu estat fonamental emeten aquesta energia en forma de radiació electromagnètica. L'energia d'aquestes radiacions depèn de la diferència d'energia entre l'estat excitat de l'electró i el seu estat fonamental. Com que l'energia dels diferents estats excitats és particular per a cada element també ho seran les radiacions emeses. L'energia d'aquestes radiacions s'allibera en forma d'una o varies ones de diferents longituds i la suma d'aquestes ones forma l'espectre d'emissió de l'element. En ser diferents per a cada element, es reconeixen observant el seu patró d'emissió (com si fos l'empremta dactilar de cada element). A tall de curiositat, aquesta és la manera que ens permet conèixer quins elements formen les estrelles de l'univers: analitzant la llum i l'espectre que ens arriba.

En resum, l'espectre d'emissió es produeix perquè se li subministra energia a un àtom. Aquest, s'excita i promociona els seus electrons a estats excitats (inestable). Quan torna al seu estat fonamental emet radiació electromagnètica en la llum visible en forma de longituds d'ona que corresponen al seu espectre d'emissió.

En la part experimental, en el moment que es produeix el color de les flames per la combustió de diferents sals metàl·liques, s'ha fet passar per un prisma la llum emesa i, d'aquesta manera, s'aconsegueix la dispersió la llum. Això passa perquè dins el prisma, la llum es desvia en un angle diferent en funció de la seva longitud d'ona permetent-ne la seva descomposició. Així, observant a través del prisma, es poden conèixer els colors que formen la llum de la flama. Aquests coincideixen amb l'espectre d'emissió de l'element que produeix la llum. Per exemple, la llum que ens arriba del sol és llum blanca i està formada per totes les longituds d'ona de l'espectre visible, és a dir, ones de longitud entre uns 350 nm i uns 750 nm (vegeu Fotografia A1).



Fotografia A1. Espectre d'emissió produït en descompondre la llum del sol.

Annex II: Espectres d'emissió reals

Sodi



Figura A1. Espectre d'emissió del sodi.⁷⁷

Bor



Figura A2. Espectre d'emissió del bor.⁷⁷

Coure

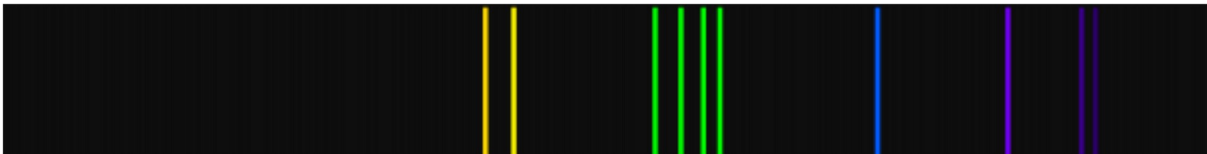


Figura A3. Espectre d'emissió del coure.

Liti



Figura A4. Espectre d'emissió del liti.⁷⁷

Estronci

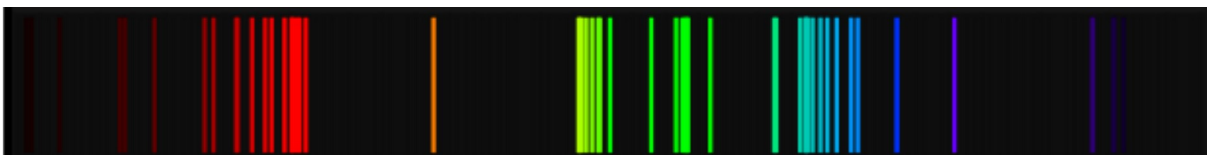


Figura A5. Espectre d'emissió de l'estronci.⁷⁷

Potassi

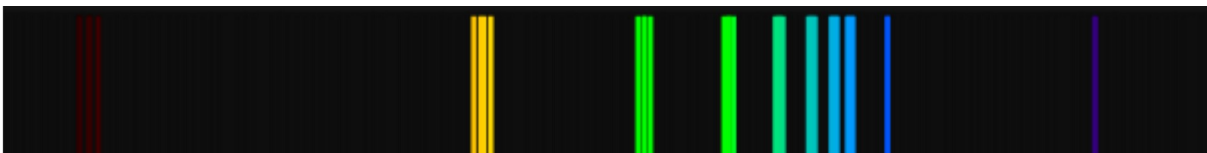


Figura A6. Espectre d'emissió del potassi.⁷⁷

Clor



Figura A7. Espectre d'emissió del clor.⁷⁷

Oxigen

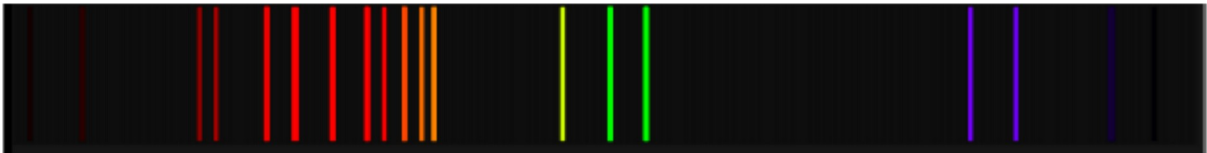


Figura A8. Espectre d'emissió de l'oxigen.⁷⁷

Flama estronci i coure

En la fabricació habitual dels focs artificials el color lila s'assoleix amb mescles d'estronci i coure. Tot i això quan s'han mesclat durant l'experiment, al no tenir cap control de la mida del pols ni sobre la homogeneïtat de la mescla, s'han observat els dos colors barrejats produïts per cadascuna.



Fotografia A2. Flama produïda al cremar una mescla d'estronci i coure.