BIOELECTRICIDAD

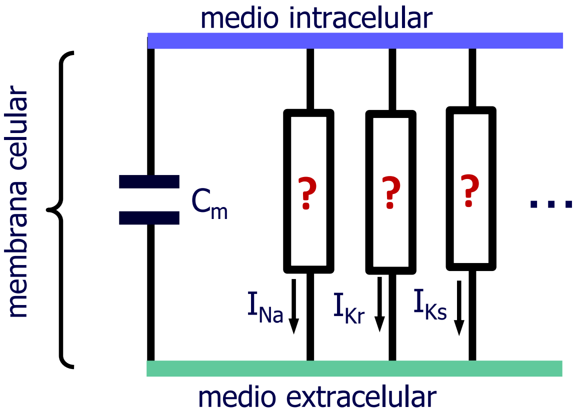
Departamento de Ingeniería Electrónica
Universidad Politécnica de Valencia, España

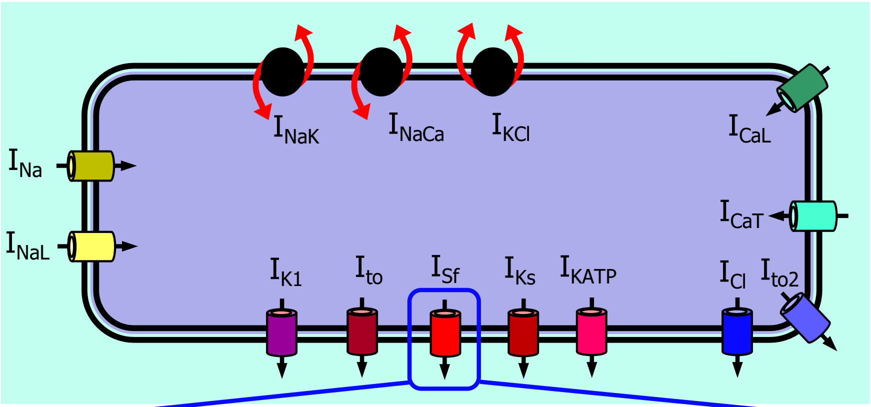
Prof. José M. Ferrero

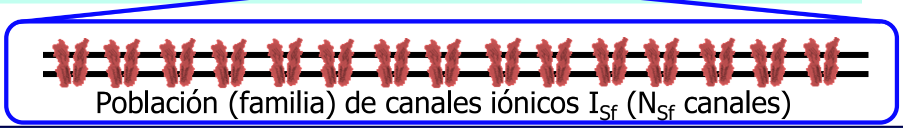
TEMA 3

MODELO ELÉCTRICO-MATEMÁTICO DE UNA CÉLULA EXCITABLE

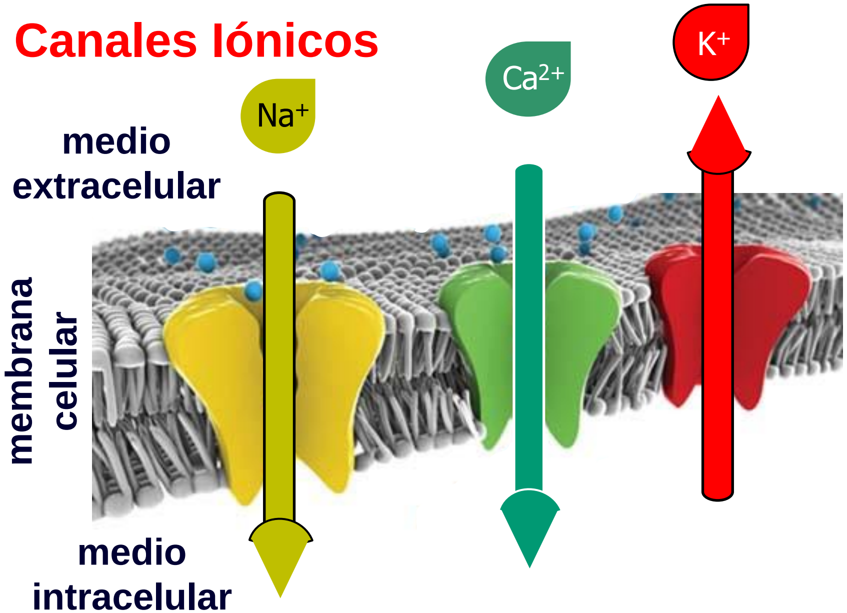
En episodios anteriores…







Canales Iónicos

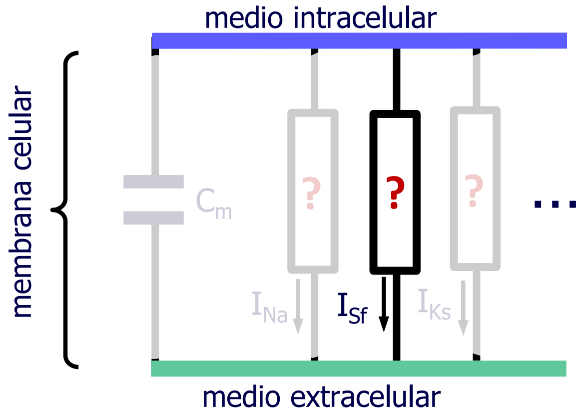


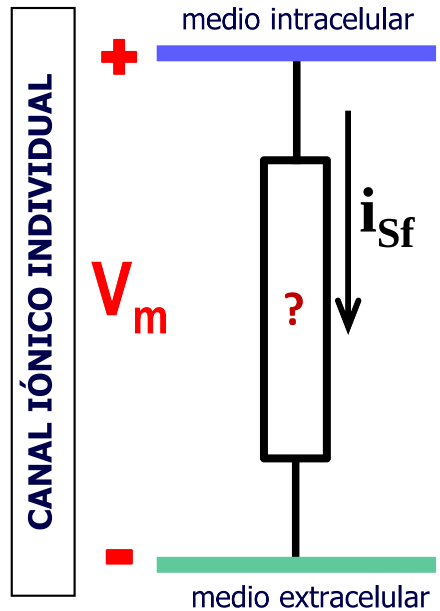
La mayoría de los canales iónicos son ESPECÍFICOS (dejan pasar una sola especie iónica)

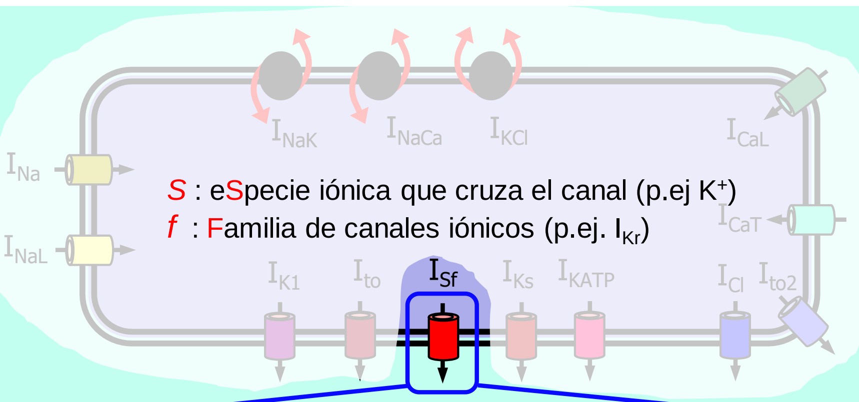
Hay MILES de ellos en cada célula excitable

Modelo eléctrico de un canal iónico individual

(de la familia *f* [p.ej. I_{Kr}] que es específica para el ion *S* [p.ej. K^+])





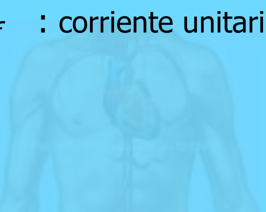


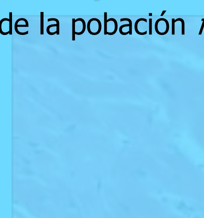
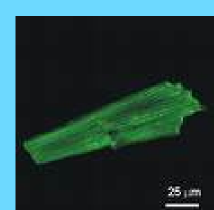

Población (familia) de canales iónicos I_{Sf} (N_{Sf} canales)

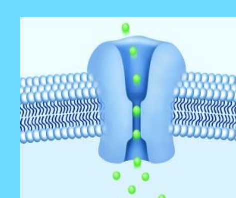
V_m : potencial de membrana [mV]

i_{Sf} : corriente unitaria (a través de 1 canal) [pA] de la pobación *f*

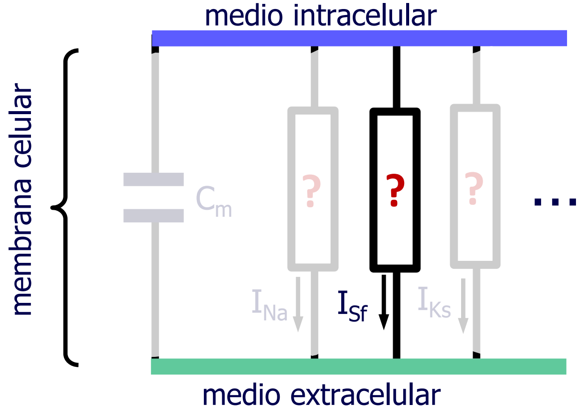
Cuerpo | Órgano | Tejido | Célula | Canal Iónico | Gen

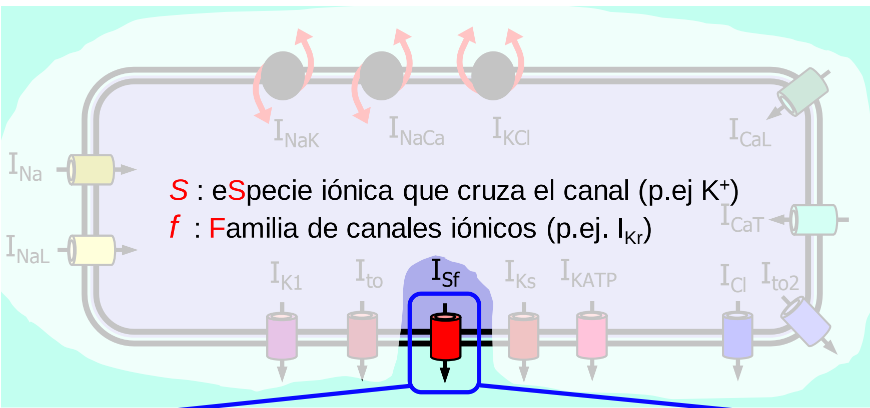


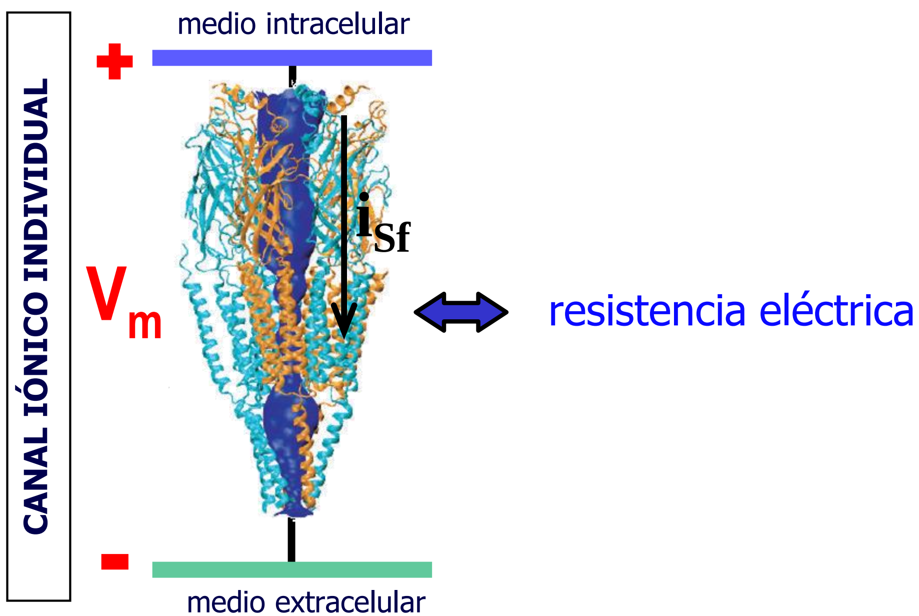



Modelo eléctrico de un canal iónico individual





CAMPO ELÉCTRICO



V_m : potencial de membrana [mV]

i_{Sf} : corriente unitaria (a través de 1 canal) [pA] de la pobación *f*

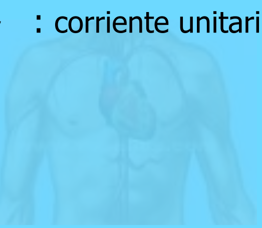
Órgano

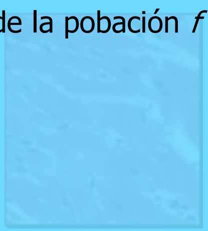
Tejido

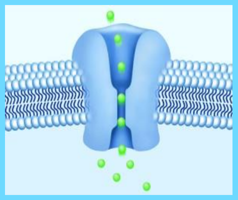
Célula

Canal Iónico

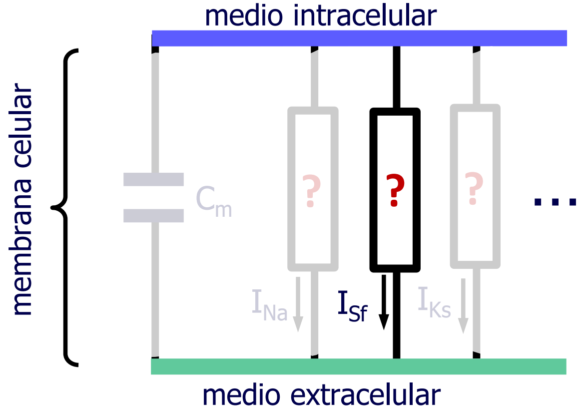
Gen

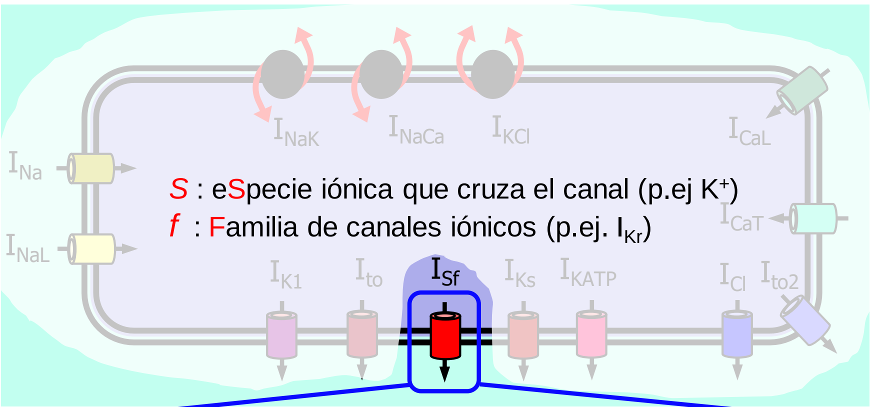






Modelo eléctrico de un canal iónico individual

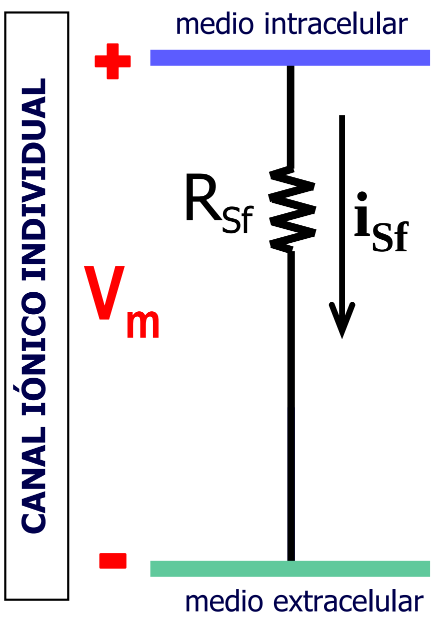




S : eSpecie iónica que cruza el canal (p.ej K^+)

f : Familia de canales iónicos (p.ej. I_{Kr})

CAMPO ELÉCTRICO



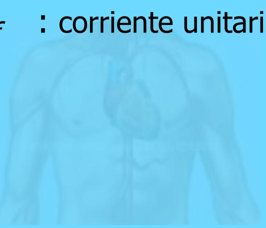
LEY DE OHM

$$V_m = R_{Sf}\, i_{Sf}$$

$$i_{Sf} = \left(1/R_{Sf}\right) V_m$$

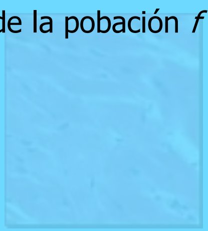
V_m : potencial de membrana [mV]

i_{Sf} : corriente unitaria (a través de 1 canal) [pA] de la pobación *f*



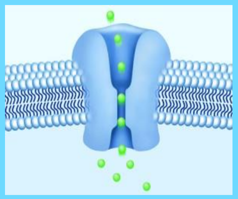
Órgano

Tejido

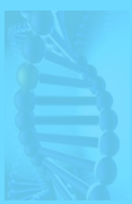


Célula

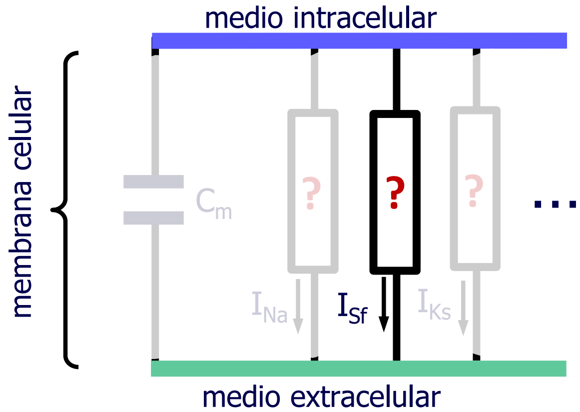
Canal Iónico



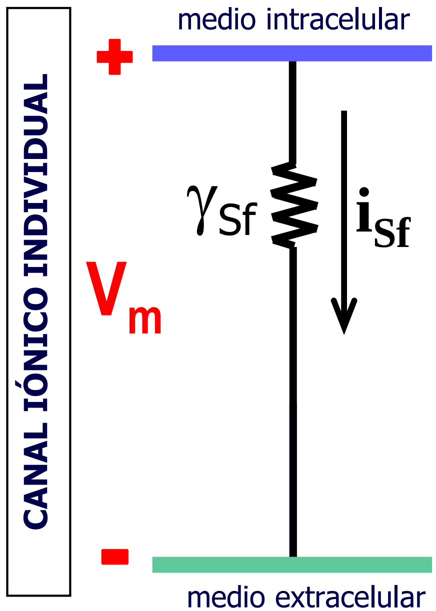
Gen



Modelo eléctrico de un canal iónico individual



CAMPO ELÉCTRICO

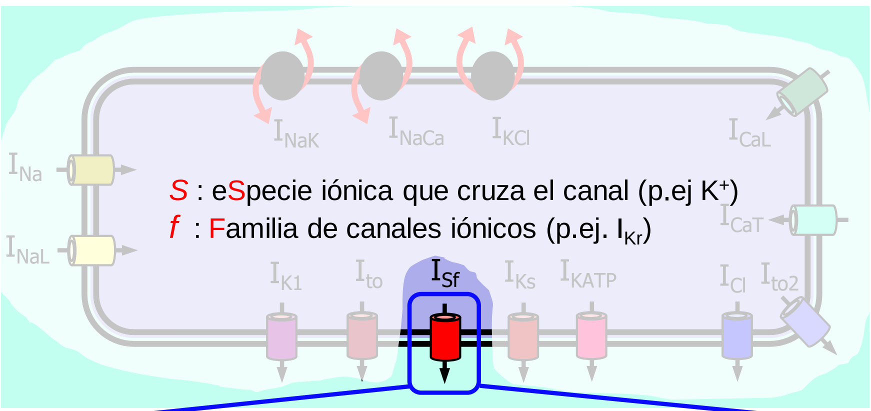


LEY DE OHM

$$V_m = R_{Sf}\, i_{Sf}$$

$$i_{Sf} = \left(1/R_{Sf}\right) V_m$$

$$\boxed{i_{Sf} = \gamma_{Sf}\, V_m}$$



S : eSpecie iónica que cruza el canal (p.ej K^+)

f : Familia de canales iónicos (p.ej. I_{Kr})

Población (familia) de canales iónicos I_{Sf} (N_{Sf} canales)

V_m : potencial de membrana [mV]

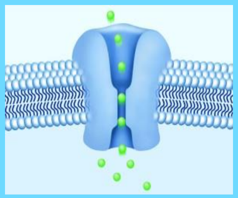
i_{Sf} : corriente unitaria (a través de 1 canal) [pA] de la pobación *f*

γ_{Sf} : conductancia unitaria (1 solo canal) [nS] de la población *f*

Tejido

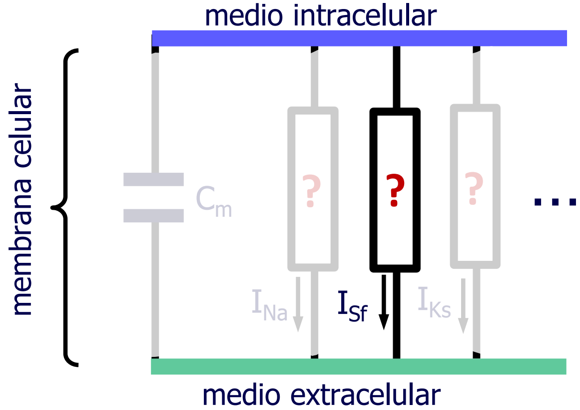
Célula

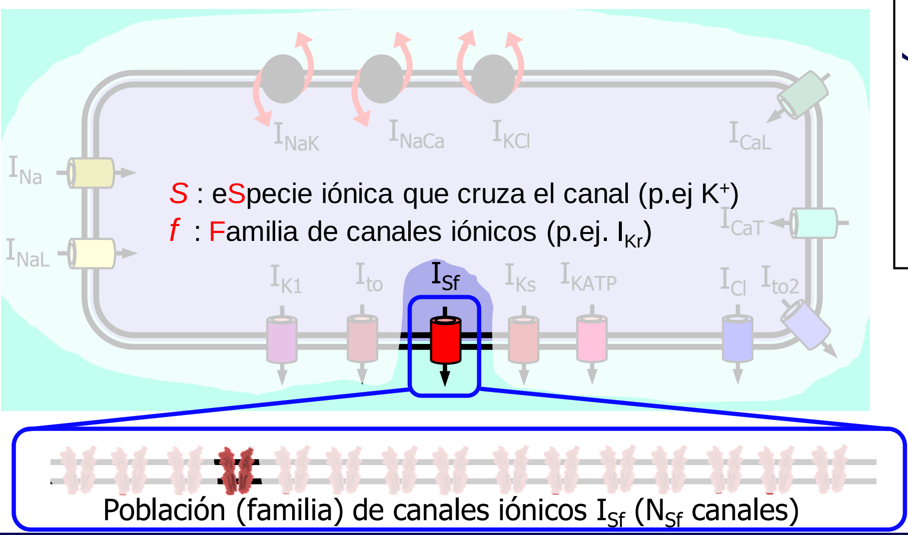
Canal Iónico



Gen

Modelo eléctrico de un canal iónico individual



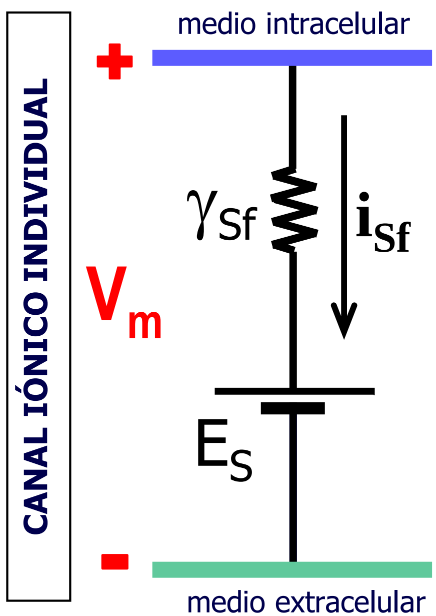


S : eSpecie iónica que cruza el canal (p.ej K^+)

f : Familia de canales iónicos (p.ej. I_{Kr})

Población (familia) de canales iónicos I_{Sf} (N_{Sf} canales)

CAMPO ELÉCTRICO + DIFUSIÓN



$$i_{Sf} = \gamma_{Sf}\left(V_m - E_S\right)$$

$$E_S = \frac{RT}{z_S\,F}\,ln\,\frac{[S]_e}{[S]_i}$$

(Ecuación de Nernst)

En ausencia de campo eléctrico (V_m=0), hay movimiento de cargas por difusión

$E_S = E_S([S]_i,[S]_e)$

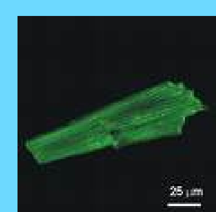
V_m : potencial de membrana [mV]

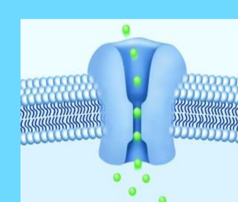
i_{Sf} : corriente unitaria (a través de 1 canal) [pA] de la pobación *f*

γ_{Sf} : conductancia unitaria (1 solo canal) [nS] de la población *f*

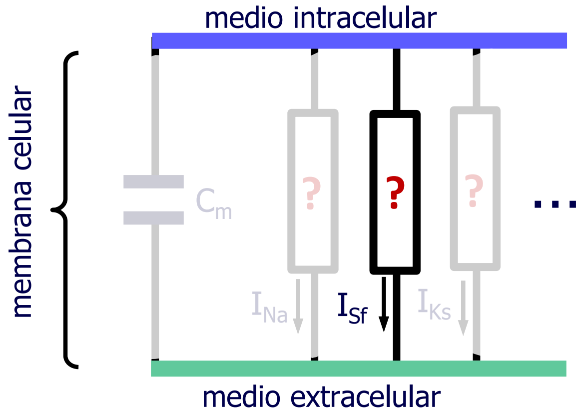
E_S : potencial de equilibrio para el ion *S* [mV]

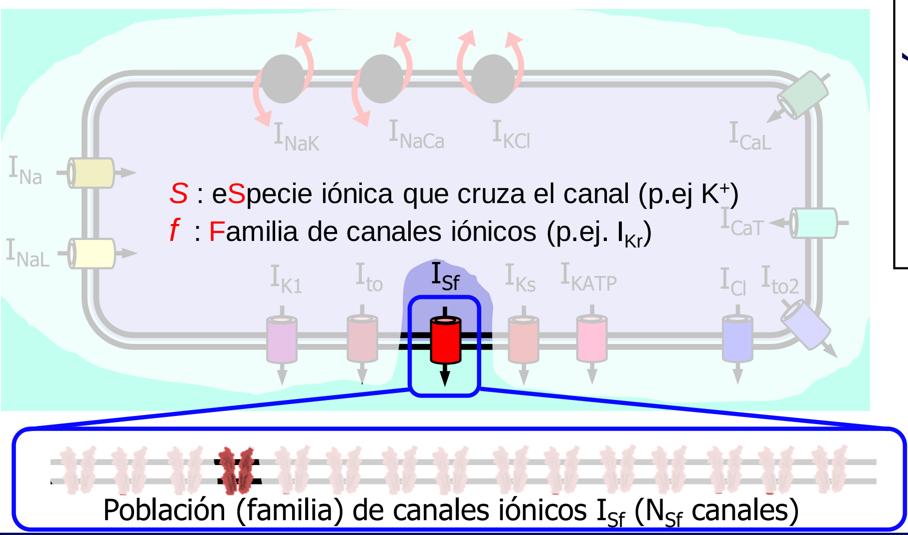
Cuerpo Órgano Tejido Célula Canal Iónico Gen



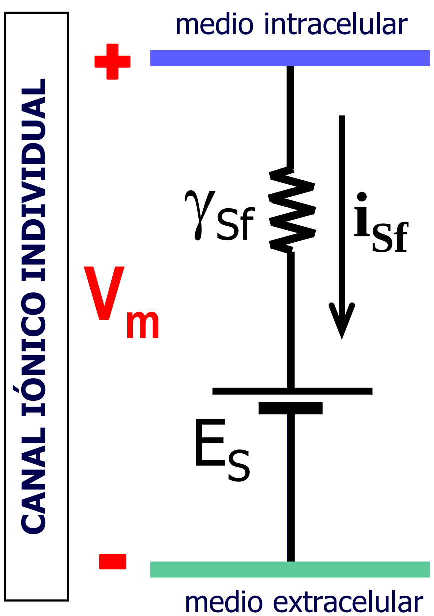


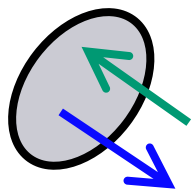
Modelo eléctrico de un canal iónico individual





CAMPO ELÉCTRICO + DIFUSIÓN





$$i_{Sf} = \gamma_{Sf}\left(V_m - E_S\right)$$

$$E_S = \frac{RT}{z_S\, F}\, ln \frac{[S]_e}{[S]_i}$$

$V_m = E_S \Rightarrow i_{Sf} = 0$ (equilibrio)

$V_m > E_S \Rightarrow i_{Sf} > 0$ (saliente)

$V_m < E_S \Rightarrow i_{Sf} < 0$ (entrante)

V_m : potencial de membrana [mV]

i_{Sf} : corriente unitaria (a través de 1 canal) [pA] de la pobación *f*

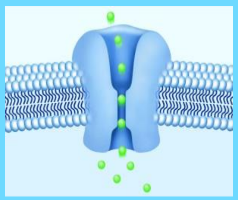
γ_{Sf} : conductancia unitaria (1 solo canal) [nS] de la población *f*

E_S : potencial de equilibrio para el ion *S* [mV]

Tejido

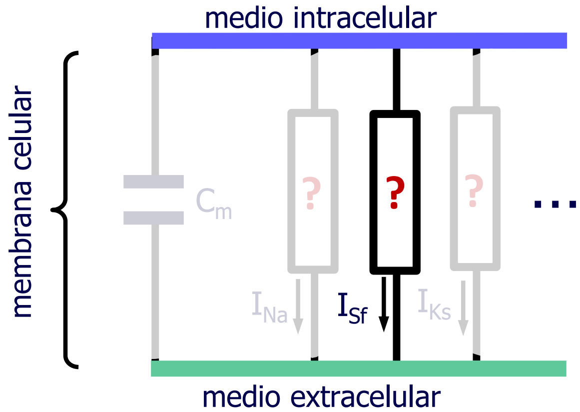
Célula

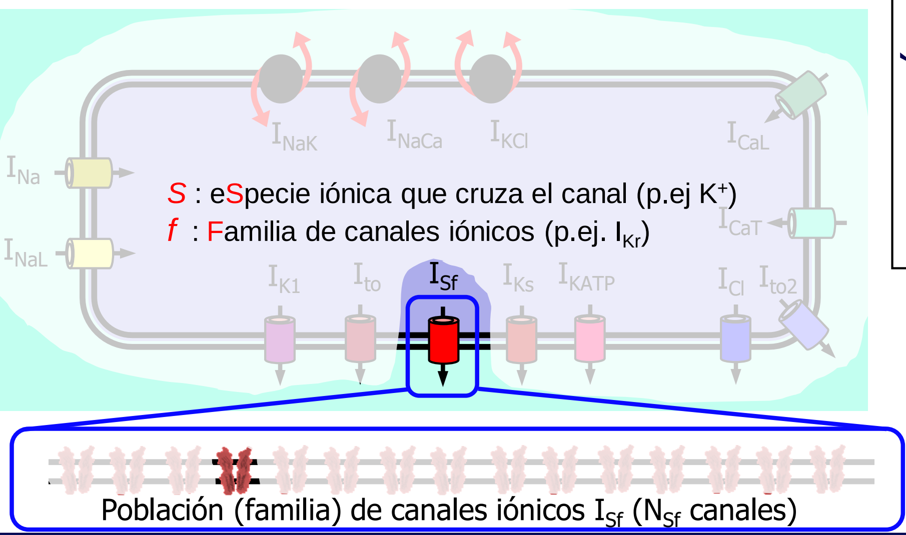
Canal Iónico



Gen

Modelo eléctrico de un canal iónico individual



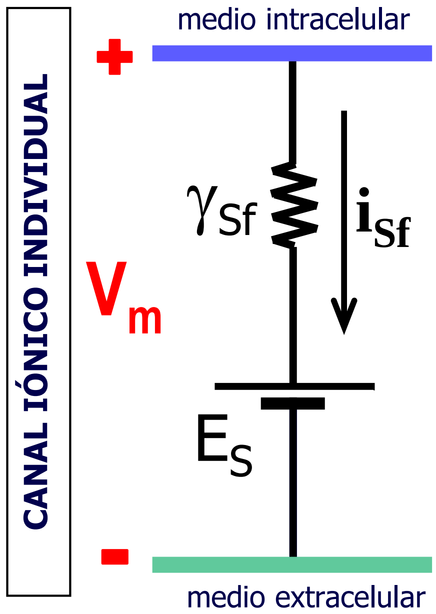


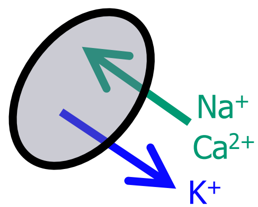
S : eSpecie iónica que cruza el canal (p.ej K^+)

f : Familia de canales iónicos (p.ej. I_{Kr})

Población (familia) de canales iónicos I_{Sf} (N_{Sf} canales)

CAMPO ELÉCTRICO + DIFUSIÓN



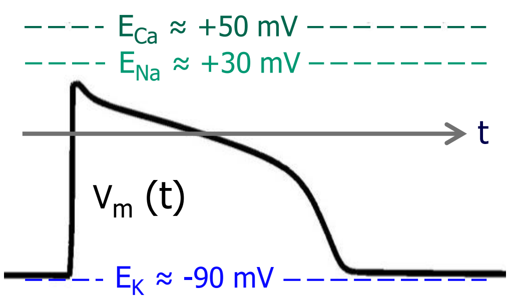


$$\boxed{i_{Sf} = \gamma_{Sf}\left(V_m - E_S\right)}$$

$$E_S = \frac{RT}{z_S F}\, ln \frac{[S]_e}{[S]_i}$$

$E_{Na} \approx +30$ mV $E_{Ca} \approx +50$ mV

$E_K \approx -90$ mV $E_{Cl} \approx -95$ mV

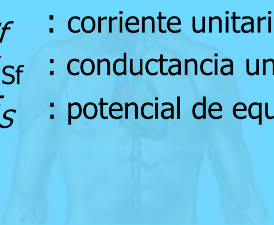


V_m : potencial de membrana [mV]

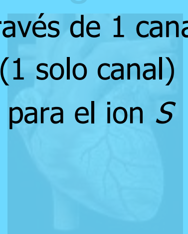
i_{Sf} : corriente unitaria (a través de 1 canal) [pA] de la pobación *f*

γ_{Sf} : conductancia unitaria (1 solo canal) [nS] de la población *f*

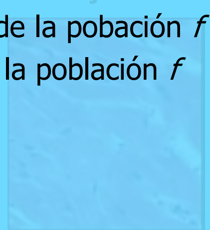
E_S : potencial de equilibrio para el ion *S* [mV]



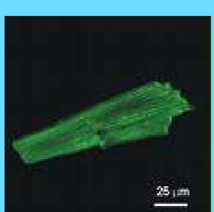
Órgano



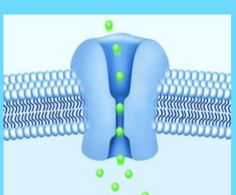
Tejido



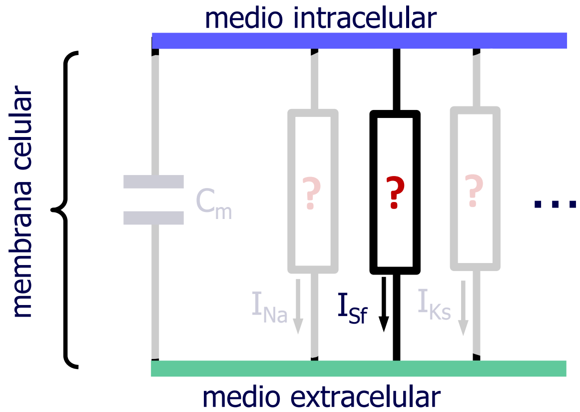
Célula

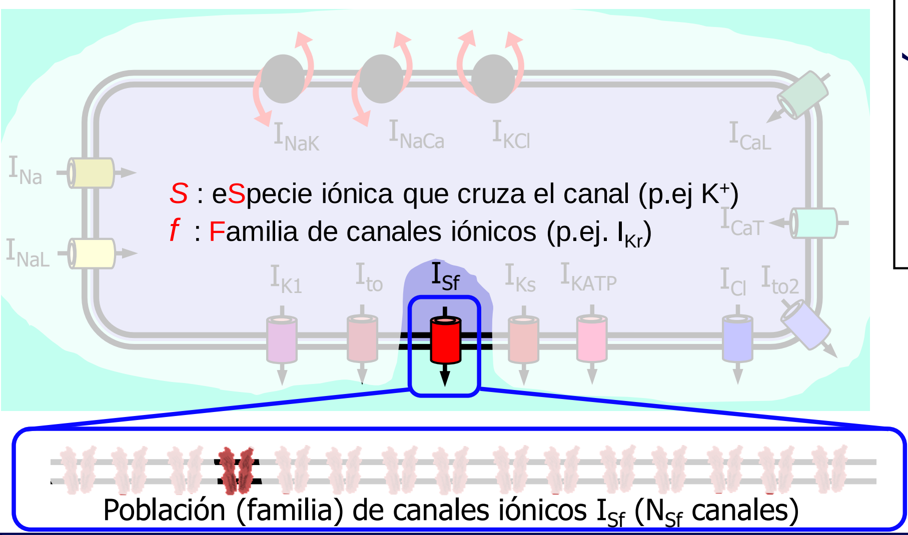


Canal Iónico

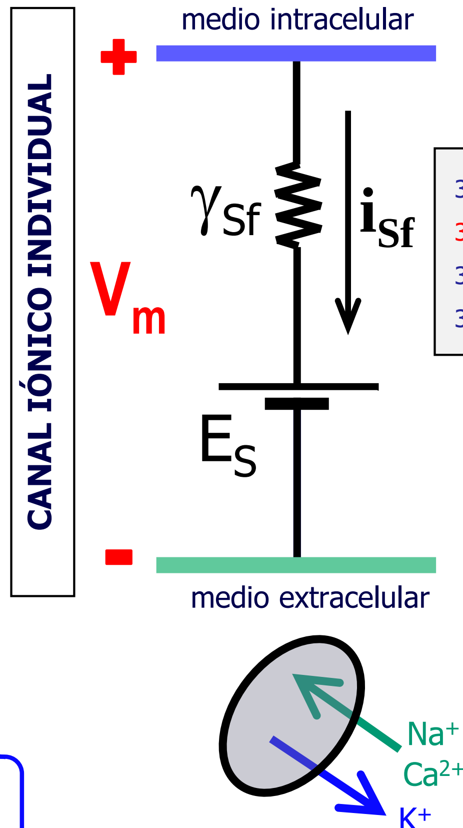


Gen



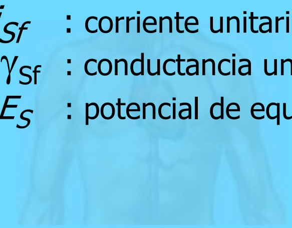


CAMPO ELÉCTRICO + DIFUSIÓN

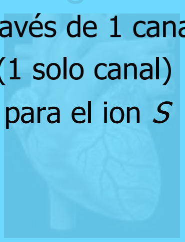


Tema 3

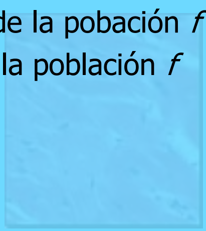
V_m : potencial de membrana [mV]
i_{Sf} : corriente unitaria (a través de 1 canal) [pA] de la pobación f
γ_{Sf} : conductancia unitaria (1 solo canal) [nS] de la población f
E_S : potencial de equilibrio para el ion S [mV]



Órgano

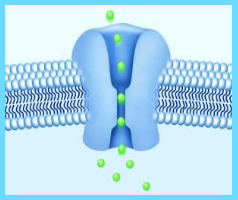


Tejido



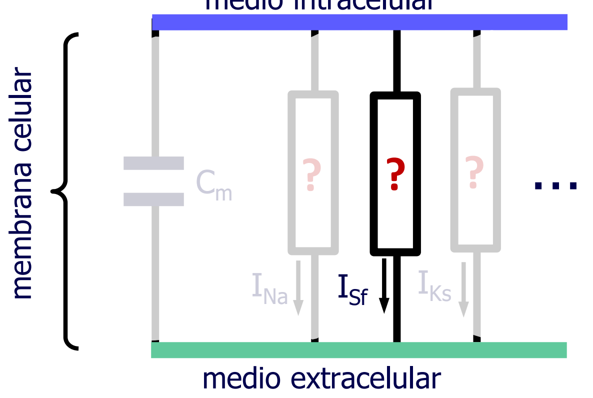
Célula

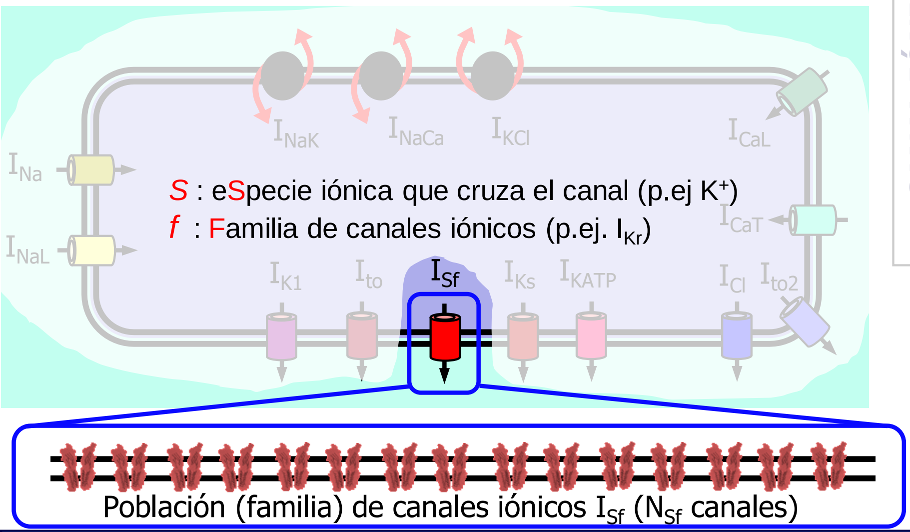
Canal Iónico



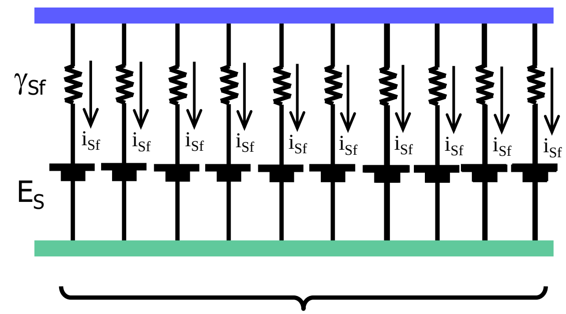
Gen

Modelo eléctrico de una población de canales





$$i_{Sf} = \gamma_{Sf}\left(V_m - E_S\right)$$



canales de la población *f*

N_{Sf}

conductancia máxima de la población (todos los canales abiertos)

$$\overline{G}_{Sf} = N_{Sf}\ \gamma_{Sf}$$

V_m : potencial de membrana [mV]

i_{Sf} : corriente unitaria (a través de 1 canal) [pA] de la pobación *f*

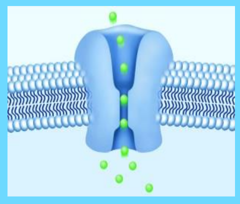
$\overline{G}_{Sf}$: conductancia máxima [μS] de la población *f*

E_S : potencial de equilibrio para el ion *S* [mV]

Tejido

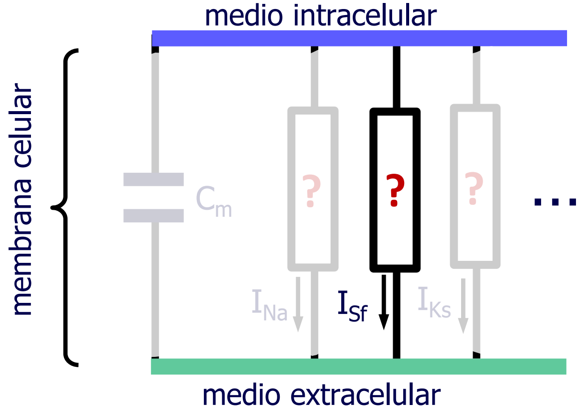
Célula

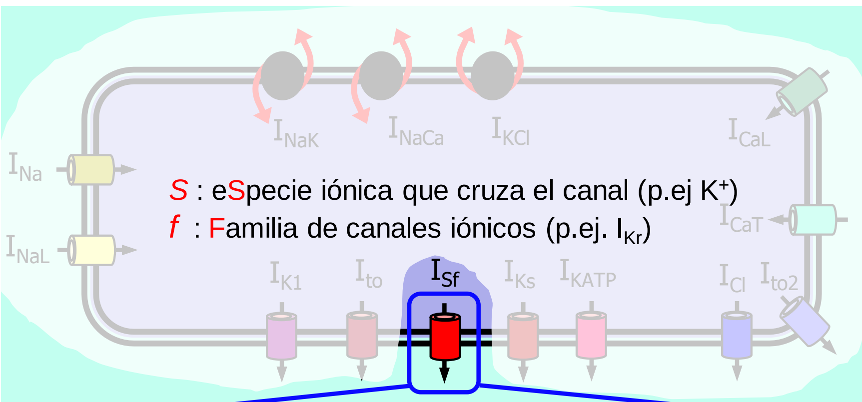
Canal Iónico

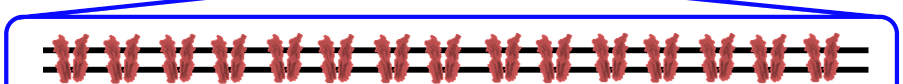


Gen

Modelo eléctrico de una población de canales



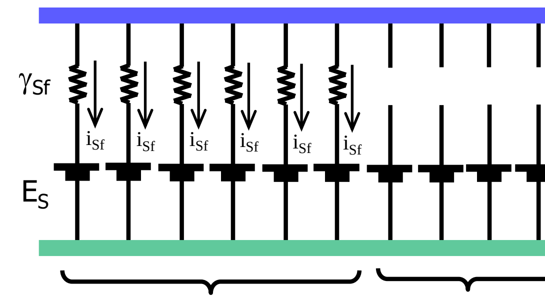




Población (familia) de canales iónicos I_{Sf} (N_{Sf} canales)

$$p_{oSf}(t) = \frac{N_{oSf}(t)}{N_{Sf}}$$

$$i_{Sf} = \gamma_{Sf}\left(V_m - E_S\right)$$



canales abiertos $N_{oSf}(t)$

can. cerrados $N_{Sf} - N_{oSf}(t)$

conductancia máxima de la población (todos los canales abiertos)

$$\overline{G}_{Sf} = N_{Sf}\;\gamma_{Sf}$$

conductancia real de la población

$$G_{Sf}(t) = \overline{G}_{Sf}\;p_{oSf}(t)$$

V_m : potencial de membrana [mV]

i_{Sf} : corriente unitaria (a través de 1 canal) [pA] de la pobación f

$\overline{G}_{Sf}$: conductancia máxima [μS] de la población f

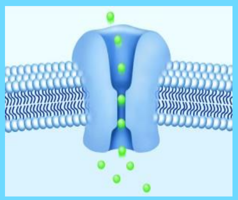
E_S : potencial de equilibrio para el ion S [mV]

p_{oSf} : fracción de canales abiertos de la población f
≈ probabilidad de que un canal de la población f esté abierto

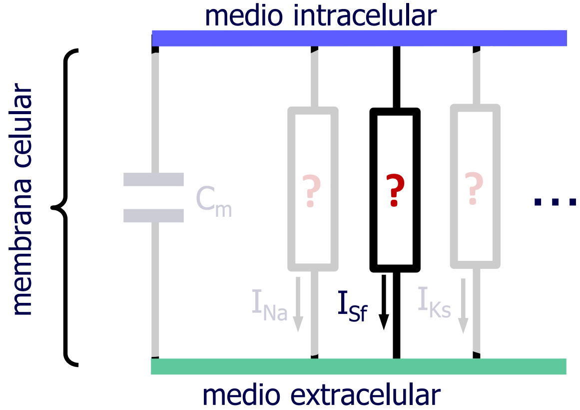
G_{Sf} : conductancia instantánea [μS] de la población f

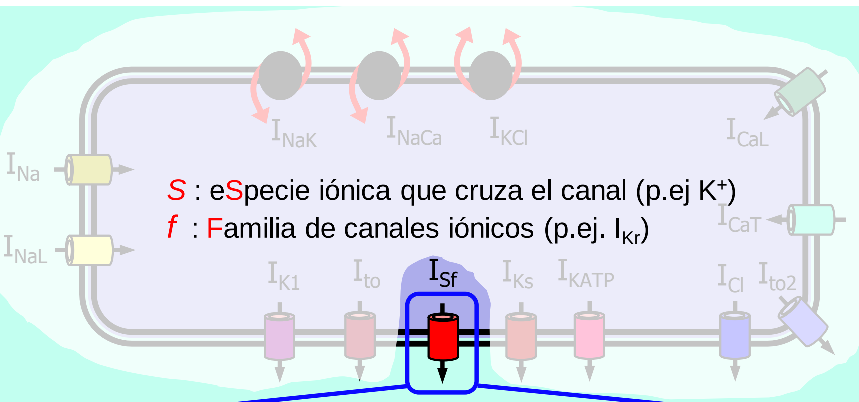
Célula

Canal Iónico



Modelo eléctrico de una población de canales



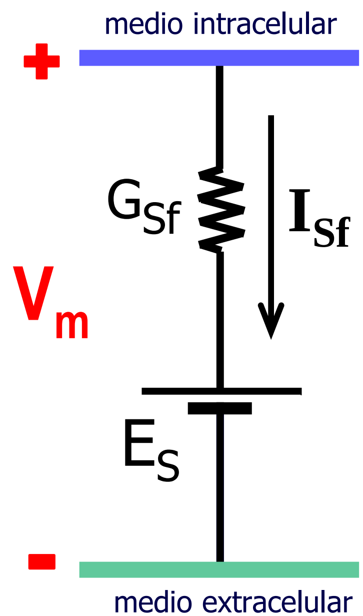


S : eSpecie iónica que cruza el canal (p.ej K^+)

f : Familia de canales iónicos (p.ej. I_{Kr})

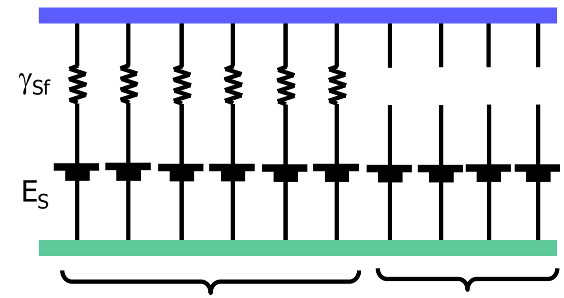
Población (familia) de canales iónicos I_{Sf} (N_{Sf} canales)

POBLACIÓN DE CANALES IÓNICOS



$$p_{oSf}(t) = \frac{N_{oSf}(t)}{N_{Sf}}$$

$$I_{Sf} = G_{Sf}\left(V_m - E_S\right)$$



canales abiertos $N_{oSf}(t)$

can. cerrados $N_{Sf} - N_{oSf}(t)$

conductancia máxima de la población (todos los canales abiertos)

$$\overline{G}_{Sf} = N_{Sf}\ \gamma_{Sf}$$

conductancia real de la población

$$G_{Sf}(t) = \overline{G}_{Sf}\ p_{oSf}(t)$$

V_m : potencial de membrana [mV]

I_{Sf} : corriente [nA] de la pobación *f*

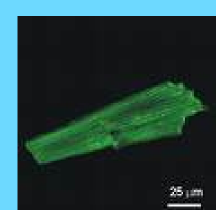
$\overline{G}_{Sf}$: conductancia máxima [μS] de la población *f*

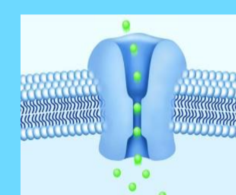
E_S : potencial de equilibrio para el ion *S* [mV]

p_{oSf} : fracción de canales abiertos de la población *f*
≈ probabilidad de que un canal de la población *f* esté abierto

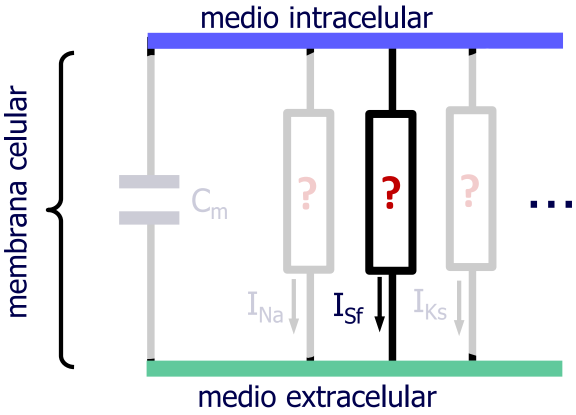
G_{Sf} : conductancia instantánea [μS] de la población *f*

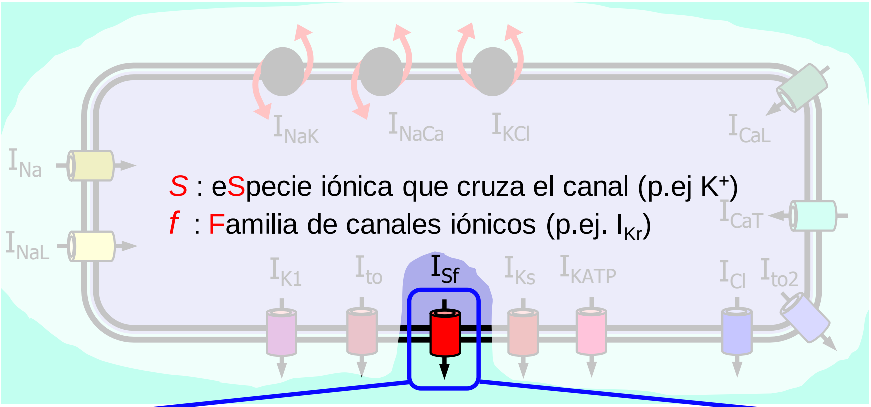
Órgano Tejido Célula Canal Iónico Gen





Modelo eléctrico de una población de canales

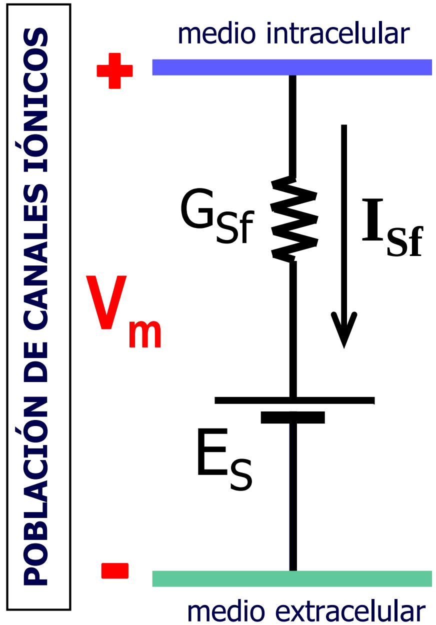




S : eSpecie iónica que cruza el canal (p.ej K^+)

f : Familia de canales iónicos (p.ej. I_{Kr})

Población (familia) de canales iónicos I_{Sf} (N_{Sf} canales)



$$I_{Sf} = G_{Sf}\left(V_m - E_S\right)$$

$$G_{Sf}(t) = \overline{G}_{Sf}\ p_{oSf}(t)$$

$$p_{oSf}(t) = \frac{N_{oSf}(t)}{N_S}$$

$$E_S = \frac{RT}{z_S F}\ ln\frac{[S]_e}{[S]_i}$$

V_m : potencial de membrana [mV]

I_{Sf} : corriente [nA] de la pobación *f*

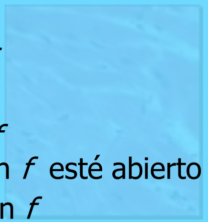
$\overline{G}_{Sf}$: conductancia máxima [μS] de la población *f*

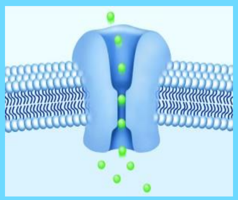
E_S : potencial de equilibrio para el ion *S* [mV]

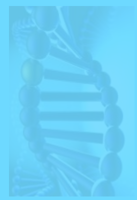
p_{oSf} : fracción de canales abiertos de la población *f*
≈ probabilidad de que un canal de la población *f* esté abierto

G_{Sf} : conductancia instantánea [μS] de la población *f*

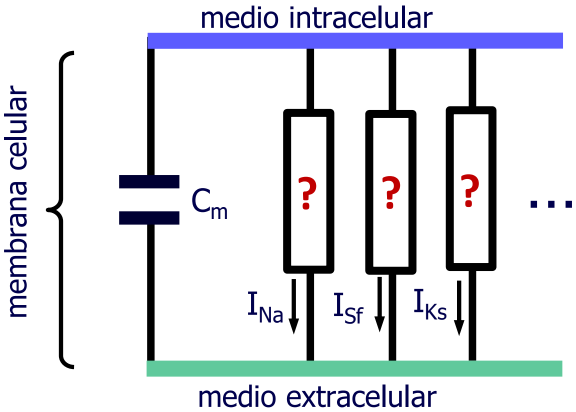
Órgano Tejido Célula Canal Iónico Gen

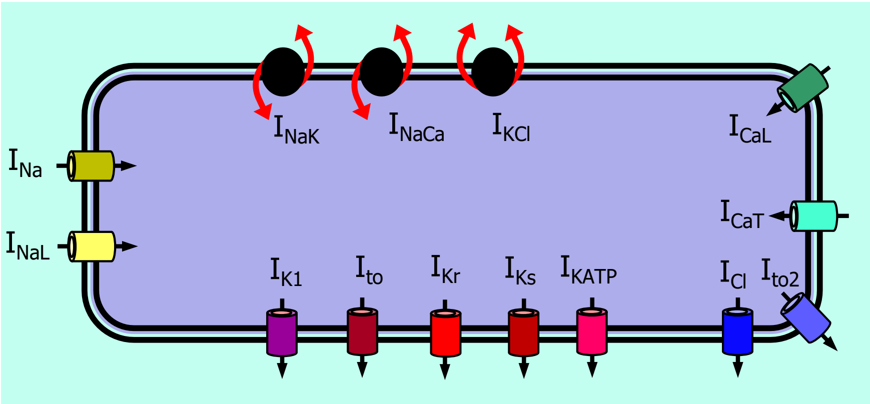


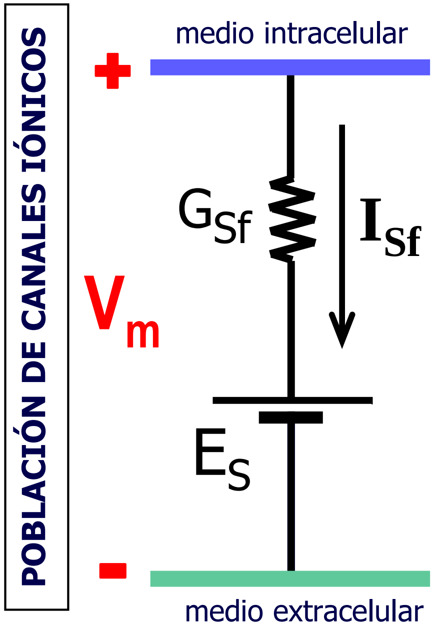




Modelo eléctrico de una célula excitable







$$I_{Sf} = G_{Sf}\left(V_m - E_S\right)$$

$$G_{Sf}(t) = \overline{G}_{Sf}\ p_{oSf}(t)$$

$$p_{oSf}(t) = \frac{N_{oSf}(t)}{N_S}$$

$$E_S = \frac{RT}{z_S F}\ ln\frac{[S]_e}{[S]_i}$$

V_m : potencial de membrana [mV]

I_{Sf} : corriente [nA] de la pobación f

$\overline{G}_{Sf}$: conductancia máxima [μS] de la población f

E_S : potencial de equilibrio para el ion S [mV]

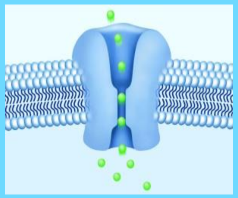
p_{oSf} : fracción de canales abiertos de la población f
≈ probabilidad de que un canal de la población f esté abierto

G_{Sf} : conductancia instantánea [μS] de la población f

Tejido

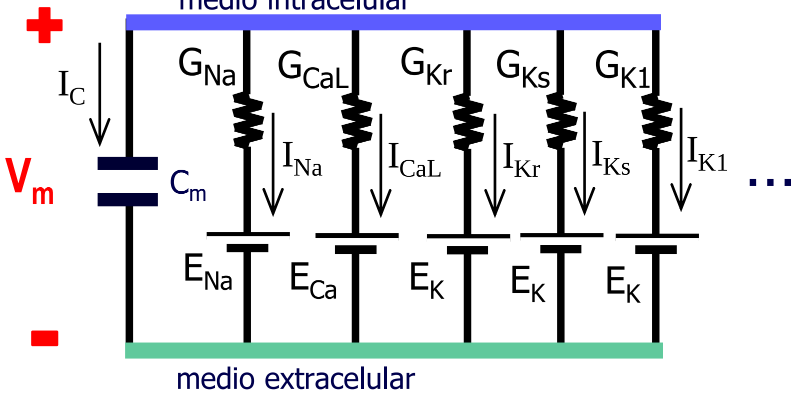
Célula

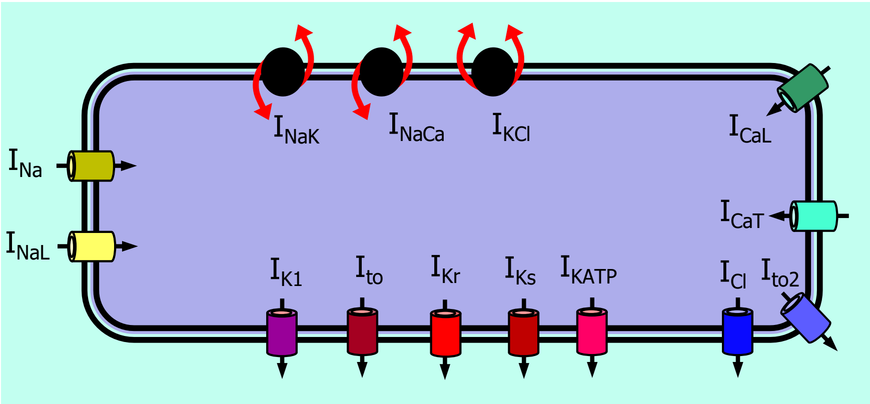
Canal Iónico

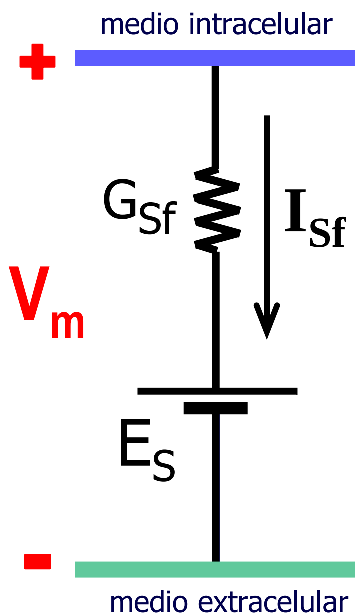


Gen

Modelo eléctrico de una célula excitable







$$I_{Sf} = G_{Sf}\left(V_m - E_S\right)$$

$$G_{Sf}(t) = \overline{G}_{Sf}\ p_{oSf}(t)$$

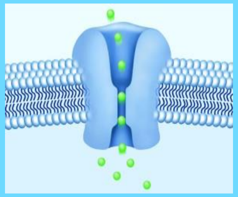
$$p_{oSf}(t) = \frac{N_{oSf}(t)}{N_S}$$

$$E_S = \frac{RT}{z_S F}\ ln\frac{[S]_e}{[S]_i}$$

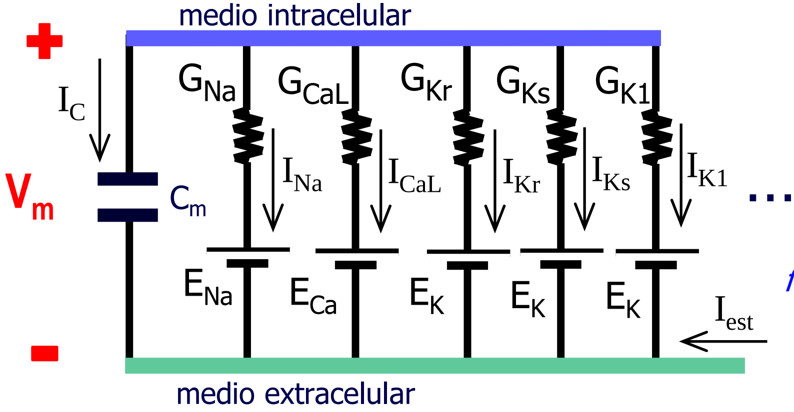
V_m : potencial de membrana [mV]
I_{Sf} : corriente [nA] de la pobación f
$\overline{G}_{Sf}$: conductancia máxima [μS] de la población f
E_S : potencial de equilibrio para el ion S [mV]
p_{oSf} : fracción de canales abiertos de la población f
≈ probabilidad de que un canal de la población f esté abierto
G_{Sf} : conductancia instantánea [μS] de la población f

Célula

Canal Iónico



Modelo eléctrico de una célula excitable



una ecuación por cada familia de canales iónicos f

Ley de Ohm

$$I_{Sf} = G_{Sf}\left(V_m - E_S\right)$$

una ecuación por cada familia de canales iónicos f

Dinámica de canales

$$G_{Sf}(t) = \overline{G}_{Sf}\; p_{oSf}(t)$$

una ecuación por cada familia de canales iónicos f

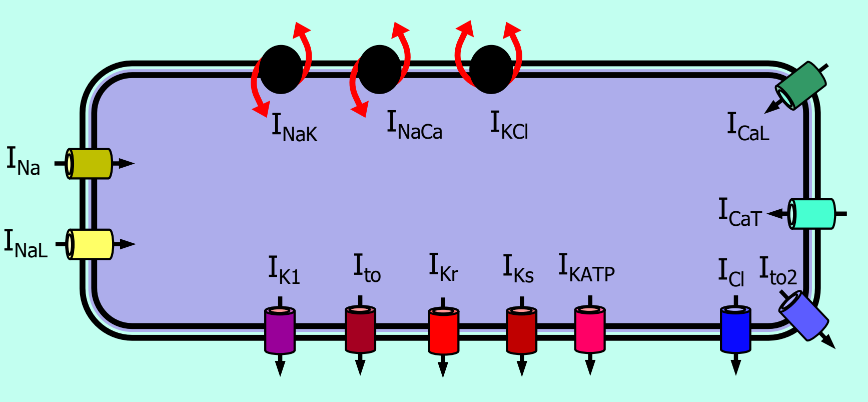
?

$$p_{oSf}(t) = \frac{N_{oSf}(t)}{N_S}$$

una ecuación por cada especie iónica S (Na⁺, Ca²⁺, K⁺, Cl⁻)

Ecuación de Nernst

$$E_S = \frac{RT}{z_S F}\, ln \frac{[S]_e}{[S]_i}$$



1ª Ley de Kirchhoff

$$C_m \frac{dV_m}{dt} + \sum_f I_{Sf} + I_{est} = 0$$

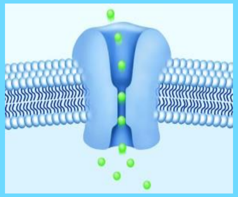
una sola ecuación para toda la célula

V_m : potencial de membrana [mV]
I_{Sf} : corriente [nA] de la pobación *f*
$\overline{G}_{Sf}$: conductancia máxima [μS] de la población *f*
E_S : potencial de equilibrio para el ion *S* [mV]
p_{oSf} : fracción de canales abiertos de la población *f*
≈ probabilidad de que un canal de la población *f* esté abierto
G_{Sf} : conductancia instantánea [μS] de la población *f*

Órgano Tejido

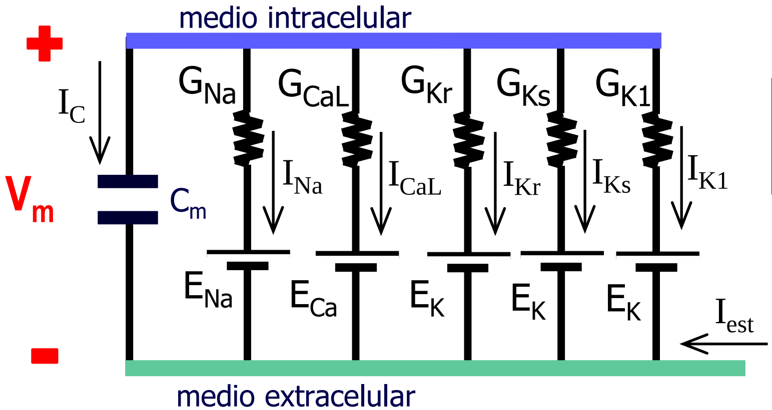
Célula

Canal Iónico



Gen

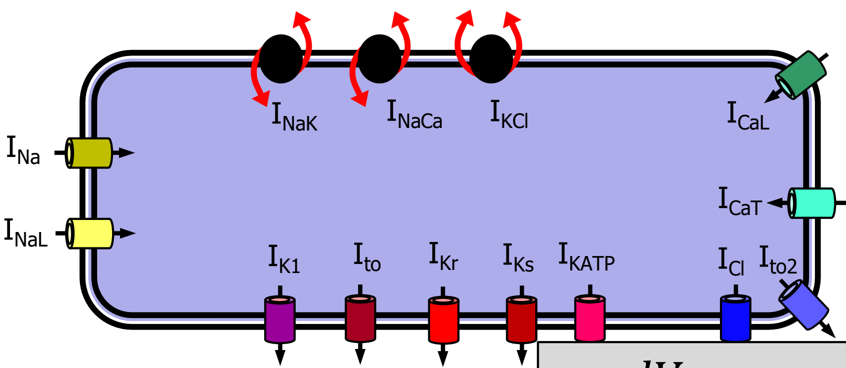
… por unidad de superficie…

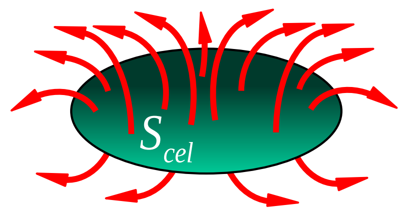


$$j_{Sf} = g_{Sf}\left(V_m - E_S\right) \quad \overset{\div S_{cell}}{\Longleftrightarrow} \quad I_{Sf} = G_{Sf}\left(V_m - E_S\right)$$

$$g_{Sf}(t) = \bar{g}_{Sf}\, p_{oSf}(t) \quad \overset{\div S_{cell}}{\Longleftrightarrow} \quad G_{Sf}(t) = \bar{G}_{Sf}\, p_{oSf}(t)$$

$$p_{oSf}(t) = \frac{N_{oSf}(t)}{N_S}$$





$$E_S = \frac{RT}{z_S F}\, ln \frac{[S]_e}{[S]_i}$$

$c_m = 1\ \mu\mathrm{F/cm}^2$

capacidad ESPECÍFICA de la membrana

$$c_m \frac{dV_m}{dt} + \sum_f j_{Sf} + j_{est} = 0 \quad \overset{\div S_{cell}}{\Longleftrightarrow} \quad C_m \frac{dV_m}{dt} + \sum_f I_{Sf} + I_{est} = 0$$

V_m : potencial de membrana [mV]

j_{Sf} : DENSIDAD de corriente de la población [nA/cm²]

$\bar{g}_{Sf}$: conductancia ESPECÍFICA máxima [μS/cm²]

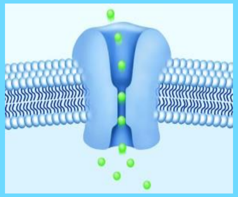
E_S : potencial de equilibrio para el ion S [mV]

p_{oSf} : fracción de canales abiertos de la población f
≈ probabilidad de que un canal de la población f esté abierto

g_{Sf} : conductancia ESPECÍFICA instantánea [μS/cm²]

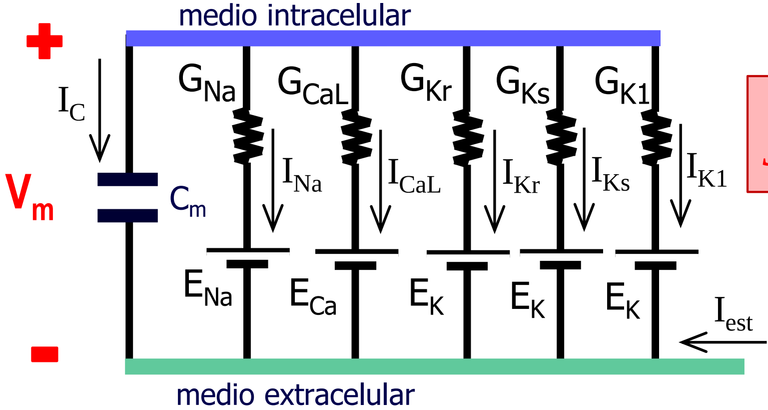
Célula

Canal Iónico



Gen

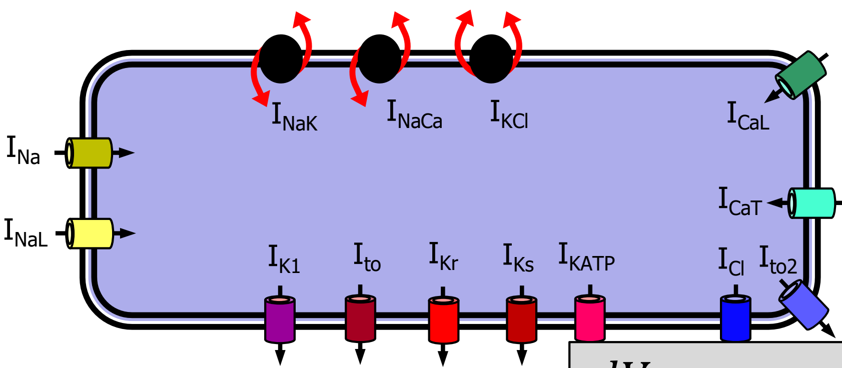
… o por unidad de capacidad

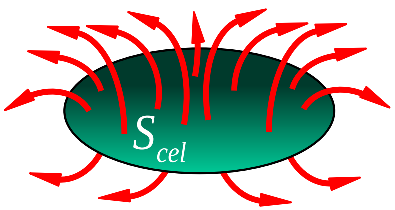


$$j_{cSf} = g_{cSf}\left(V_m - E_S\right) \quad \xleftrightarrow{\div C_{cell}} \quad I_{Sf} = G_{Sf}\left(V_m - E_S\right)$$

$$g_{cSf}(t) = \overline{g}_{cSf}\; p_{oSf}(t) \quad \xleftrightarrow{\div C_{cell}} \quad G_{Sf}(t) = \overline{G}_{Sf}\; p_{oSf}(t)$$

$$p_{oSf}(t) = \frac{N_{oSf}(t)}{N_S}$$





$$E_S = \frac{RT}{z_S F}\, ln \frac{[S]_e}{[S]_i}$$

$$c_m = 1\ \mu F/cm^2$$

capacidad ESPECÍFICA de la membrana

$$\frac{dV_m}{dt} + \sum_f j_{cSf} + j_{cest} = 0 \quad \xleftrightarrow{\div C_{cell}} \quad C_m \frac{dV_m}{dt} + \sum_f I_{Sf} + I_{est} = 0$$

V_m : potencial de membrana [mV]

j_{Sf} : corriente POR UNIDAD DE CAPACIDAD [nA/μF]

$\overline{g}_{Sf}$: conductancia máxima POR UNIDAD DE CAPACIDAD [μS/μF]

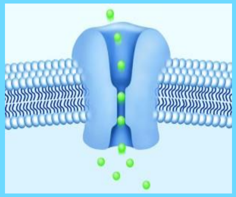
E_S : potencial de equilibrio para el ion S [mV]

p_{oSf} : fracción de canales abiertos de la población f
≈ probabilidad de que un canal de la población f esté abierto

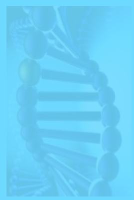
g_{Sf} : conductancia instantánea POR UNIDAD DE CAPACIDAD [μS/μF]

Célula

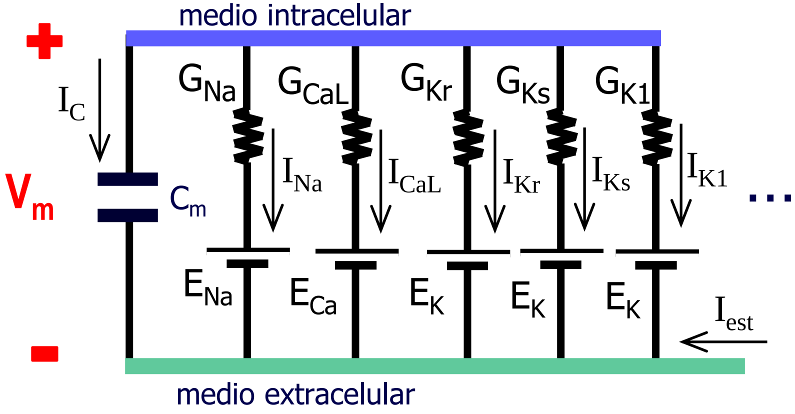
Canal Iónico



Gen



Modelo eléctrico de una célula excitable

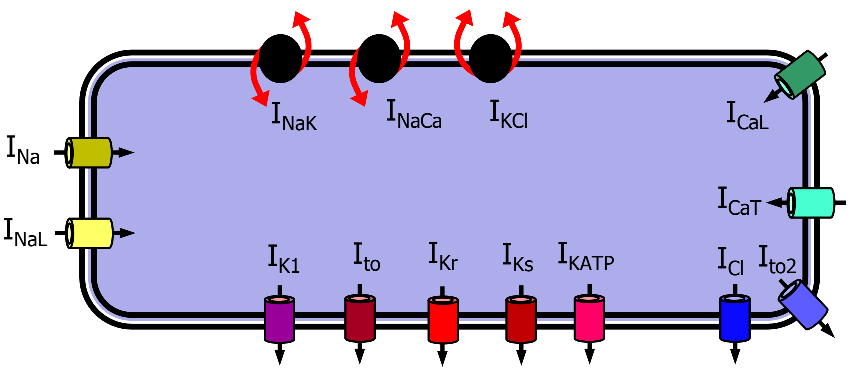


$$I_{Sf} = G_{Sf}\left(V_m - E_S\right)$$

$$G_{Sf}(t) = \overline{G}_{Sf}\; p_{oSf}(t)$$

$$p_{oSf}(t) = \frac{N_{oSf}(t)}{N_S}$$

$$E_S = \frac{RT}{z_S F}\, ln \frac{[S]_e}{[S]_i}$$

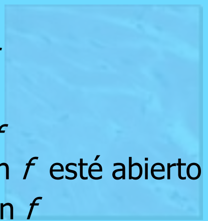


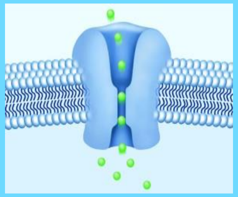
$$C_m \frac{dV_m}{dt} + \sum_f I_{Sf} + I_{est} = 0$$

- Se suele preferir trabajar en DENSIDADES
- Se suele utilizar la misma nomenclatura indistintamente

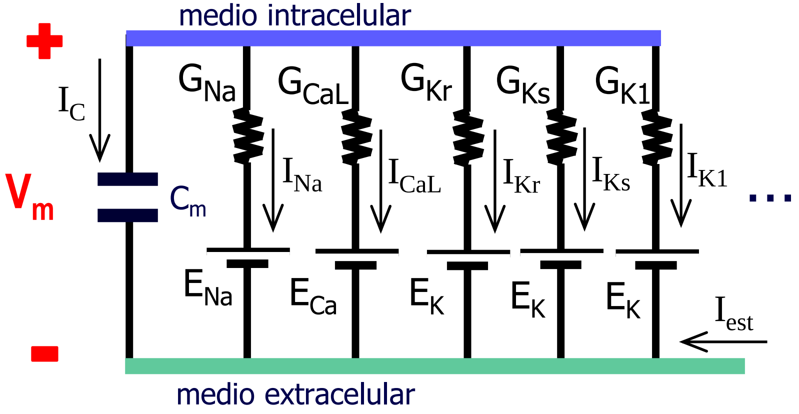
V_m : potencial de membrana [mV]
I_{Sf} : corriente [nA] de la pobación f
$\overline{G}_{Sf}$: conductancia máxima [μS] de la población f
E_S : potencial de equilibrio para el ion S [mV]
p_{oSf} : fracción de canales abiertos de la población f
≈ probabilidad de que un canal de la población f esté abierto
G_{Sf} : conductancia instantánea [μS] de la población f

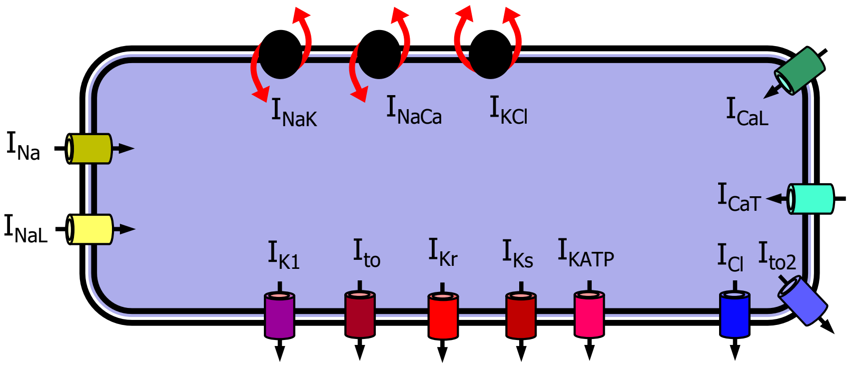
Órgano | Tejido | Célula | Canal Iónico | Gen




Realimentaciones…





$$I_{Sf} = G_{Sf}\left(V_m - E_S\right)$$

$$G_{Sf}(t) = \overline{G}_{Sf}\; p_{oSf}(t)$$

$$p_{oSf}(t) = \frac{N_{oSf}(t)}{N_S}$$

$$E_S = \frac{RT}{z_S F}\, ln \frac{[S]_e}{[S]_i}$$

$$C_m \frac{dV_m}{dt} + \sum_f I_{Sf} + I_{est} = 0$$

V_m : potencial de membrana [mV]

I_{Sf} : corriente [nA] de la pobación f

$\overline{G}_{Sf}$: conductancia máxima [μS] de la población f

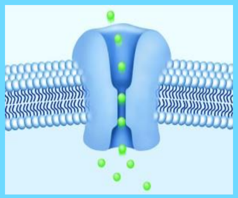
E_S : potencial de equilibrio para el ion S [mV]

p_{oSf} : fracción de canales abiertos de la población f
≈ probabilidad de que un canal de la población f esté abierto

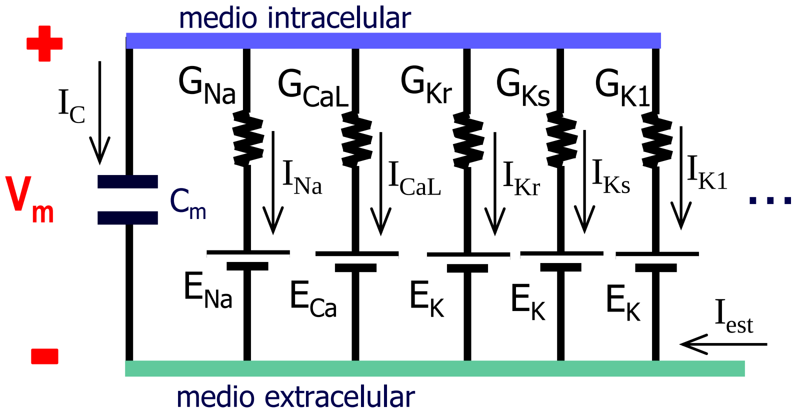
G_{Sf} : conductancia instantánea [μS] de la población f

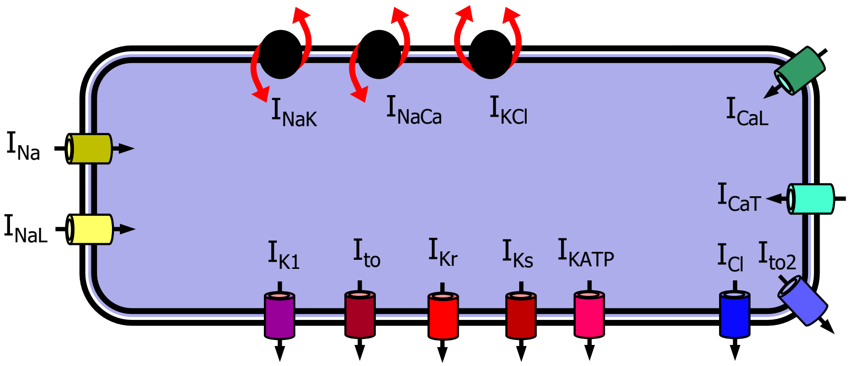
Célula

Canal Iónico



El "mensaje" de la ecuación…





$$I_{Sf} = G_{Sf}\left(V_m - E_S\right)$$

$$G_{Sf}(t) = \overline{G}_{Sf}\; p_{oSf}(t)$$

$$p_{oSf}(t) = \frac{N_{oSf}(t)}{N_S}$$

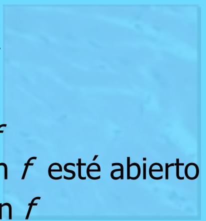
$$E_S = \frac{RT}{z_S F}\, ln \frac{[S]_e}{[S]_i}$$

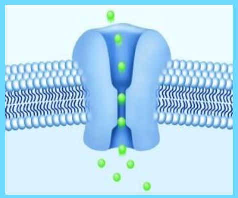
Cuanto más grande sea la corriente transmembrana (neta), más rápidamente cambiará el potencial de membrana

$$\frac{dV_m}{dt} = -\frac{1}{C_m}\sum I_{mem}$$

$$C_m \frac{dV_m}{dt} + \sum_f I_{Sf} + I_{est} = 0$$

Órgano Tejido Célula Canal Iónico Gen





V_m : potencial de membrana [mV]

I_{Sf} : corriente [nA] de la pobación f

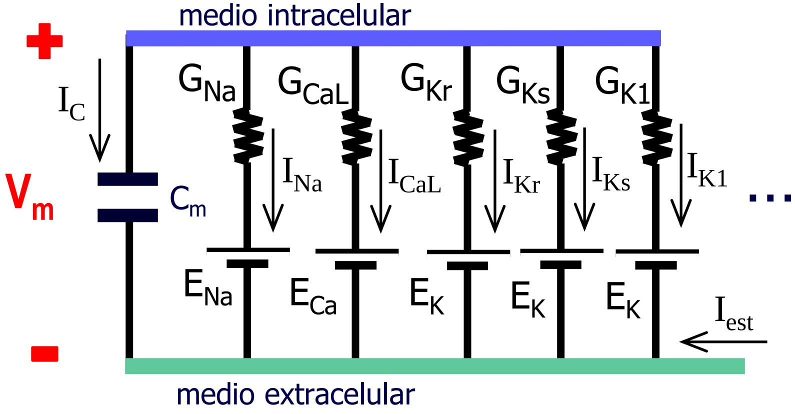
$\overline{G}_{Sf}$: conductancia máxima [µS] de la población f

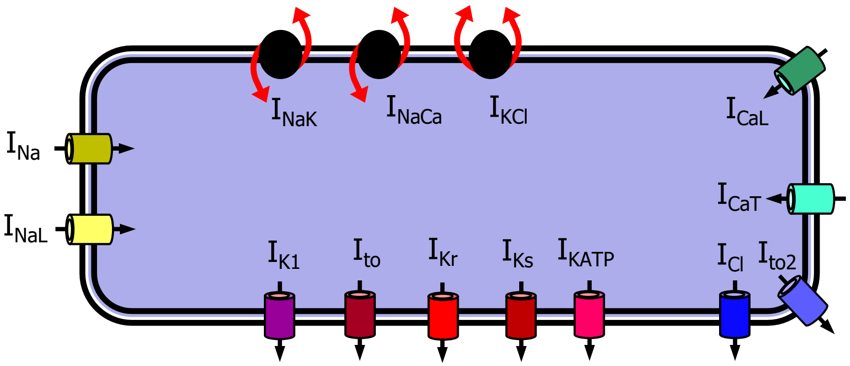
E_S : potencial de equilibrio para el ion S [mV]

p_{oSf} : fracción de canales abiertos de la población f
≈ probabilidad de que un canal de la población f esté abierto

G_{Sf} : conductancia instantánea [µS] de la población f

El "mensaje" de la ecuación…





$$I_{Sf} = G_{Sf}\left(V_m - E_S\right)$$

$$G_{Sf}(t) = \overline{G}_{Sf}\; p_{oSf}(t)$$

Tema 3

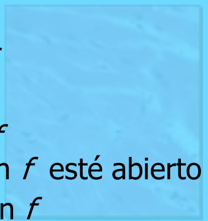
$$p_{oSf}(t) = \frac{N_{oSf}(t)}{N_S}$$

$$E_S = \frac{RT}{z_S F}\, ln \frac{[S]_e}{[S]_i}$$

$$C_m \frac{dV_m}{dt} + \sum_f I_{Sf} + I_{est} = 0$$

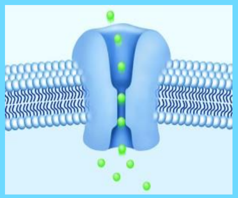
V_m : potencial de membrana [mV]
I_{Sf} : corriente [nA] de la pobación f
$\overline{G}_{Sf}$: conductancia máxima [μS] de la población f
E_S : potencial de equilibrio para el ion S [mV]
p_{oSf} : fracción de canales abiertos de la población f
≈ probabilidad de que un canal de la población f esté abierto
G_{Sf} : conductancia instantánea [μS] de la población f

Tejido

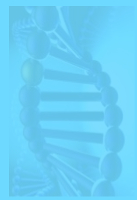


Célula

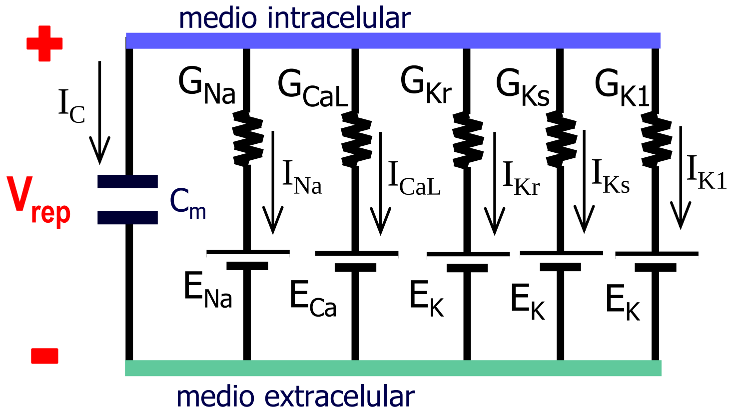
Canal Iónico

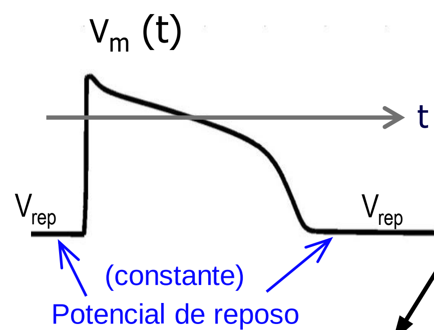


Gen



Potencial de reposo de una célula excitable





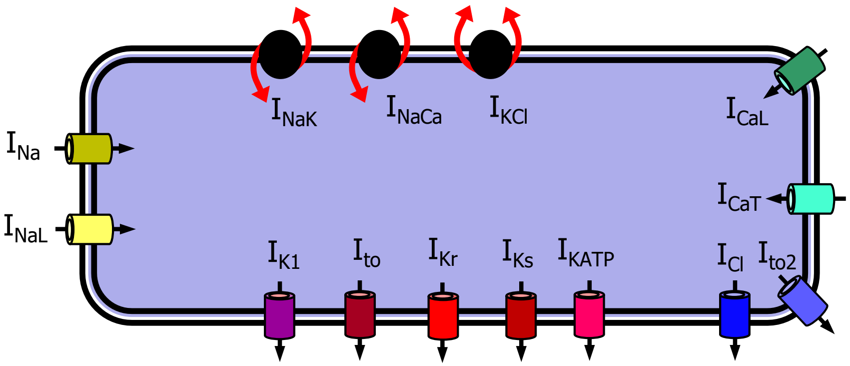
$$\boxed{I_{Sf} = G_{Sf}\left(V_{rep} - E_S\right)}$$

$$\boxed{G_{Sf}(t) = \overline{G}_{Sf}\; p_{oSf}(t)}$$

$$\boxed{p_{oSf}(t) = \frac{N_{oSf}(t)}{N_S}}$$

$$V_{rep} = \frac{\sum_S G_{Sf,rep}\; E_S}{G_{TOT,rep}}$$

$$\boxed{E_S = \frac{RT}{z_S F}\, ln \frac{[S]_e}{[S]_i}}$$

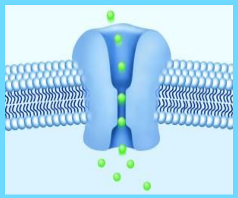


$$\boxed{\sum_f I_{Sf} = 0}$$

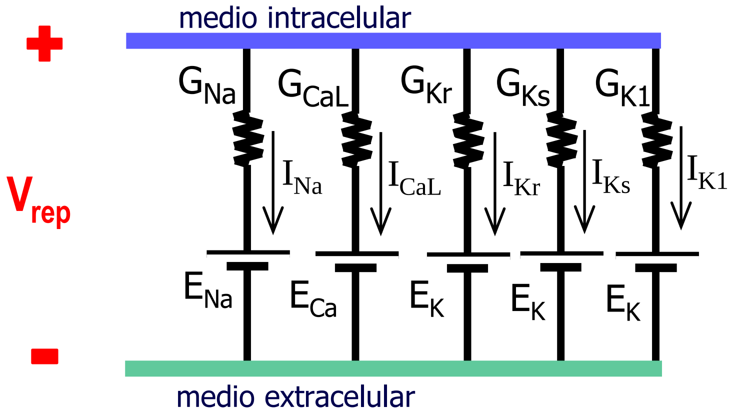
- El potencial de reposo V_{rep} tiene un valor intermedio entre los diferentes potenciales de equilibrio E_S
- Cada familia de canales iónicos "tira" del potencial de membrana hacia su potencial de equilibrio con una "fuerza" proporcional a la conductancia de la familia

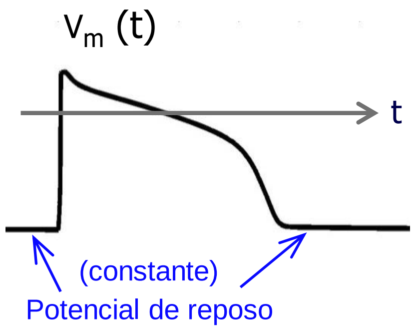
V_m : potencial de membrana [mV]
I_{Sf} : corriente [nA] de la pobación f
$\overline{G}_{Sf}$: conductancia máxima [μS] de la población f
E_S : potencial de equilibrio para el ion S [mV]
p_{oSf} : fracción de canales abiertos de la población f
≈ probabilidad de que un canal de la población f esté abierto
G_{Sf} : conductancia instantánea [μS] de la población f

Órgano Tejido Célula Canal Iónico Gen



Potencial de reposo de un cardiomiocito





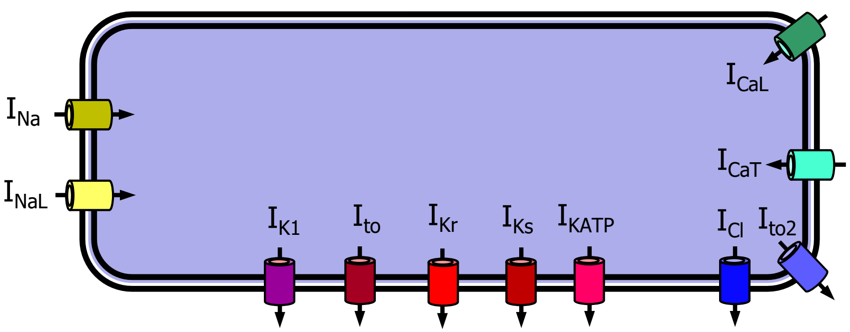
$$I_{Sf} = G_{Sf}\left(V_{rep} - E_S\right)$$

$$G_{Sf}(t) = \overline{G}_{Sf}\ p_{oSf}(t)$$

$$p_{oSf}(t) = \frac{N_{oSf}(t)}{N_S}$$

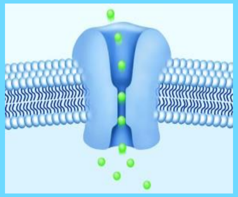
$$V_{rep} = \frac{\sum_S G_{Sf,rep}\ E_S}{G_{TOT,rep}}$$

$$E_S = \frac{RT}{z_S F}\ ln\frac{[S]_e}{[S]_i}$$



$$\sum_f I_{Sf} = 0$$

Órgano Tejido **Célula** **Canal Iónico** Gen



V_m : potencial de membrana [mV]

I_{Sf} : corriente [nA] de la pobación f

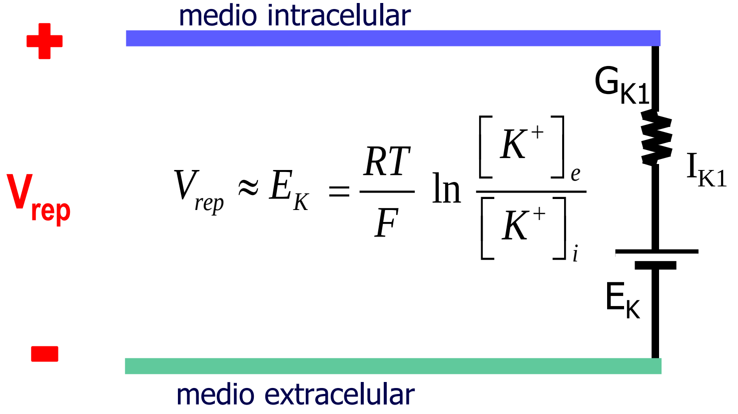
$\overline{G}_{Sf}$: conductancia máxima [µS] de la población f

E_S : potencial de equilibrio para el ion S [mV]

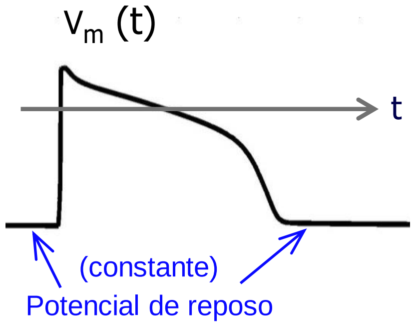
p_{oSf} : fracción de canales abiertos de la población f
≈ probabilidad de que un canal de la población f esté abierto

G_{Sf} : conductancia instantánea [µS] de la población f

Potencial de reposo de un cardiomiocito



$$V_{rep} \approx E_K = \frac{RT}{F} \ln \frac{\left[K^+\right]_e}{\left[K^+\right]_i}$$



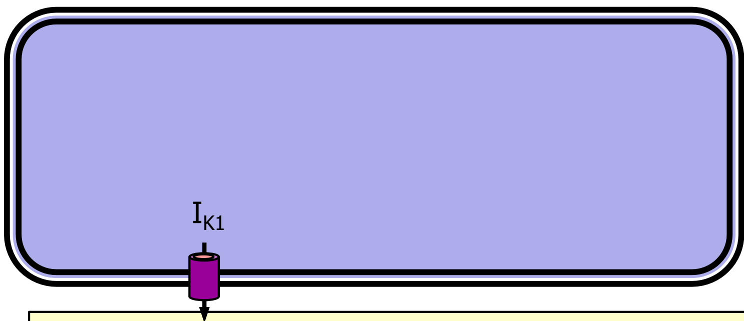
$$\boxed{I_{Sf} = G_{Sf}\left(V_{rep} - E_S\right)}$$

$$\boxed{G_{Sf}(t) = \overline{G}_{Sf}\ p_{oSf}(t)}$$

$$\boxed{p_{oSf}(t) = \frac{N_{oSf}(t)}{N_S}}$$

$$V_{rep} = \frac{\sum_S G_{Sf,rep}\ E_S}{G_{TOT,rep}}$$

$$\boxed{E_S = \frac{RT}{z_S F}\ ln \frac{\left[S\right]_e}{\left[S\right]_i}}$$

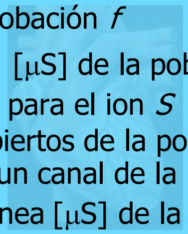


oclusión de una arteria ⇗ ↓O_2 ⇘ / ⇘ ↓glucosa ⇗ ↓ATP ⇨ ↓I_{NaK} ⇗ ↑$[K^+]_e$ ⇨ ↑E_K ⇨ ↑V_{rep} ⇨ ? / ⇘ ↓$[Na^+]_e$

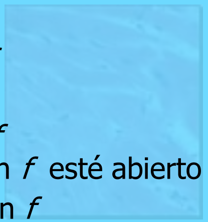
$$\boxed{I_{K1} = 0}$$

V_m : potencial de membrana [mV]
I_{Sf} : corriente [nA] de la pobación f
$\overline{G}_{Sf}$: conductancia máxima [μS] de la población f
E_S : potencial de equilibrio para el ion S [mV]
p_{oSf} : fracción de canales abiertos de la población f
≈ probabilidad de que un canal de la población f esté abierto
G_{Sf} : conductancia instantánea [μS] de la población f

Órgano

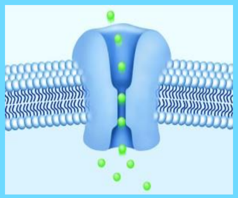


Tejido



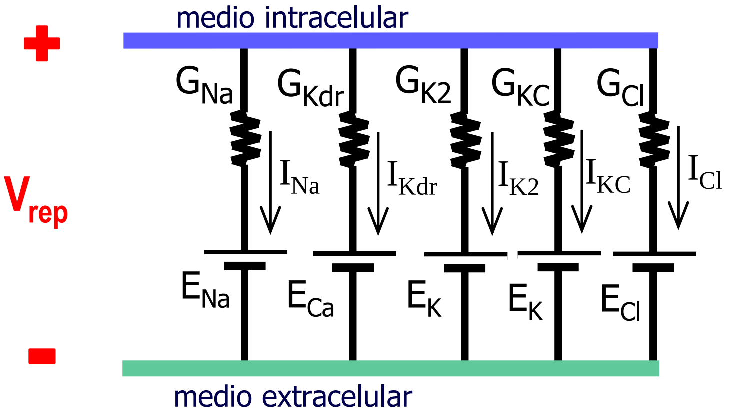
Célula

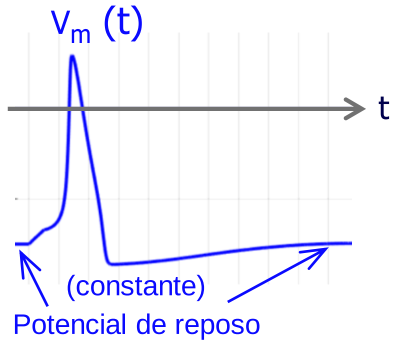
Canal Iónico



Gen

Potencial de reposo de una neurona piramidal





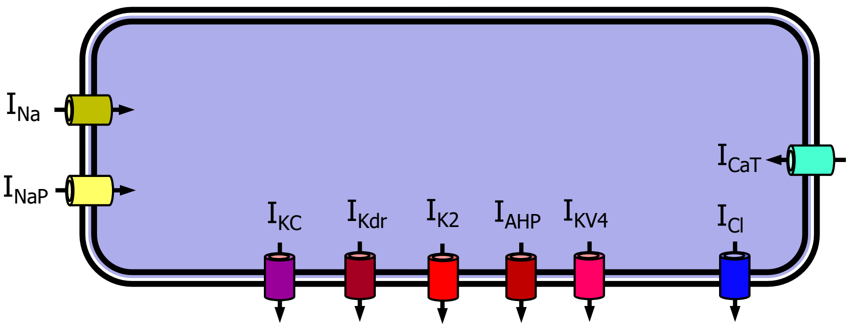
$$\boxed{I_{Sf} = G_{Sf}\left(V_{rep} - E_S\right)}$$

$$\boxed{G_{Sf}(t) = \overline{G}_{Sf}\ p_{oSf}(t)}$$

$$\boxed{p_{oSf}(t) = \frac{N_{oSf}(t)}{N_S}}$$

$$V_{rep} = \frac{\sum_S G_{Sf,rep}\ E_S}{G_{TOT,rep}}$$

$$\boxed{E_S = \frac{RT}{z_S F}\ ln\frac{[S]_e}{[S]_i}}$$

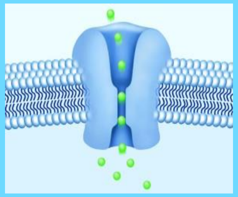


$$\boxed{\sum_f I_{Sf} = 0}$$

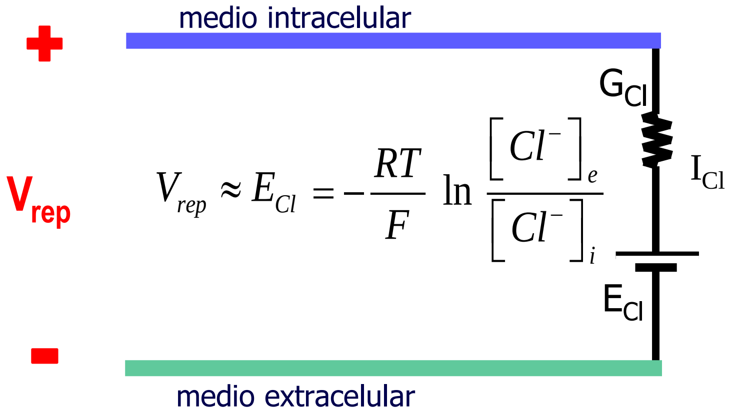
V_m : potencial de membrana [mV]
I_{Sf} : corriente [nA] de la pobación *f*
$\overline{G}_{Sf}$: conductancia máxima [μS] de la población *f*
E_S : potencial de equilibrio para el ion *S* [mV]
p_{oSf} : fracción de canales abiertos de la población *f*
≈ probabilidad de que un canal de la población *f* esté abierto
G_{Sf} : conductancia instantánea [μS] de la población *f*

Célula

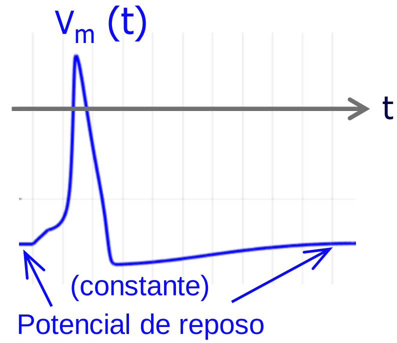
Canal Iónico



Potencial de reposo de una neurona piramidal



$$V_{rep} \approx E_{Cl} = -\frac{RT}{F} \ln \frac{\left[Cl^-\right]_e}{\left[Cl^-\right]_i}$$



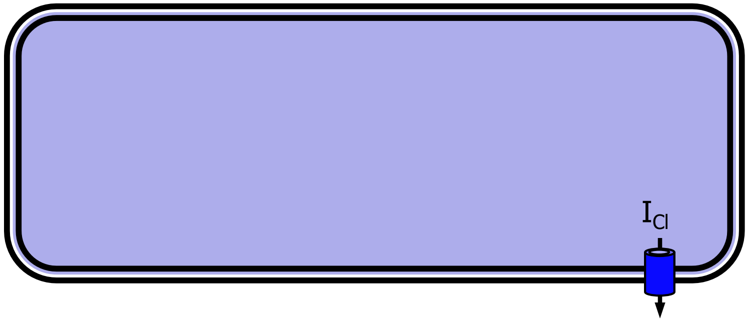
$$\boxed{I_{Sf} = G_{Sf}\left(V_{rep} - E_S\right)}$$

$$\boxed{G_{Sf}(t) = \overline{G}_{Sf}\; p_{oSf}(t)}$$

$$\boxed{p_{oSf}(t) = \frac{N_{oSf}(t)}{N_S}}$$

$$V_{rep} = \frac{\sum_S G_{Sf,rep}\; E_S}{G_{TOT,rep}}$$

$$\boxed{E_S = \frac{RT}{z_S F}\, ln\, \frac{[S]_e}{[S]_i}}$$



$$\boxed{I_{Cl} = 0}$$

V_m : potencial de membrana [mV]

I_{Sf} : corriente [nA] de la pobación f

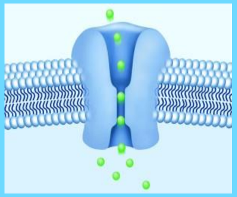
$\overline{G}_{Sf}$: conductancia máxima [μS] de la población f

E_S : potencial de equilibrio para el ion S [mV]

p_{oSf} : fracción de canales abiertos de la población f
≈ probabilidad de que un canal de la población f esté abierto

G_{Sf} : conductancia instantánea [μS] de la población f

Órgano Tejido Célula Canal Iónico Gen



Conclusiones

- El potencial de equilibrio de un ion es el potencial de membrana que debería existir para que el ion estuviese en equilibrio con una corriente neta nula (la corriente de difusión sería de igual magnitud y sentido contrario a la corriente debida al campo eléctrico).
- El potencial de equilibrio viene dado por la Ecuación de Nernst y es directamente proporcional al logaritmo neperiano del ratio de concentraciones (extracelular e intracelular).
- Si el potencial de membrana es diferente del potencial de equilibrio de un ion, éste atravesará sus canales iónicos específicos siempre que estos estén abiertos.
- El circuito eléctrico equivalente de un canal iónico abierto está formado por una fuente de tensión continua (batería E_S), de valor igual al potencial de equilibrio del ion, en serie con una conductancia (la conductancia unitaria de un canal abierto γ_s). El valor de esta conductancia puede depender del potencial de membrana, de las concentraciones intra y/o extra-celulares del ion y de otros factores.
- El circuito eléctrico equivalente de una familia de canales iónicos está formado por una fuente de tensión continua (batería E_S), de valor igual al potencial de equilibrio del ion, en serie con una conductancia cuyo valor en un instante de tiempo dado está determinado por la conductancia agregada (sumada) de todos los canales que están abiertos en ese instante (conductancia de la población de canales g_s). El valor de esta conductancia depende por lo tanto del tiempo y también del potencial de membrana.
- El valor de la conductancia de la población es igual al producto de la conductancia unitaria por el número total de canales por la fracción de canales abiertos en ese instante.
- El circuito equivalente también puede establecerse con magnitudes eléctricas específicas (es decir, por unidad de superficie de membrana). El circuito reflejará entonces la densidad de corriente (en lugar de la intensidad de corriente), la conductancia específica(en lugar de la conductancia) y la densidad de canales (en lugar del número total de canales).
- El hecho de que un potencial de acción esté normalmente confinado entre los potenciales de equilibrio del Na^+ y el Ca^{2+} (como límite superior) y los potenciales de equilibrio del K^+ y el Cl^- (como límite inferior) explica que los dos primeros iones tiendan a entrar en la célula y los dos últimos a salir.
- El modelo eléctrico (circuito equivalente) de una célula está formado por la combinación en paralelo de las diversas ramas correspondientes a las diferentes familias de canales iónicos junto con las ramas de las bombas, intercambiadores y co-transportadores y la rama de la capacidad de membrana.
- Cada familia de canales iónicos “tira” del potencial de membrana hacia su potencial de equilibrio con una “fuerza” proporcional a la conductancia de la familia
- En una célula, el potencial de reposo está determinado por aquellos iones asociados a canales que permanecen abiertos durante el reposo. Ello explica que el potencial de reposo de un axón neuronal sea aproximadamente igual al potencial de equilibrio del Cl^-, mientras que el de una célula miocárdica sea aproximadamente igual al potencial de equilibrio del K^+.

Bibliografía

- Electrofisiología básica de la membrana celular
  - Capítulo 3 de [1] (especialmente punto 3.9)
  - Capítulo 2 de [2] (especialmente punto 2.2.2)
  - Capítulo 3 de [3] (especialmente puntos 3.1 y 3.2)

- Mecanismos de transporte iónico y concentraciones iónicas
  - Capítulo 3 de [1]
  - Capítulo 3 de [2] (especialmente punto 3.5)
  - Capítulo 2 de [3]

- Ecuaciones del transporte iónico por difusión y campo eléctrico
  - Capítulo 3 de [1] (especialmente punto 3.2 a 3.8)
  - Capítulo 3 de [2] (especialmente punto 3.2 y 3.4)
  - Capítulo 2 de [3] (especialmente punto 2.3 y 2.4)

- Potencial de equilibrio
  - Capítulo 3 de [1] (especialmente punto 3.13)
  - Capítulo 3 de [2] (especialmente punto 3.2.4)
  - Capítulo 2 de [3] (especialmente punto 2.5)

- Circuito eléctrico equivalente de un canal iónico y de la membrana celular
  - Capítulo 3 de [1] (especialmente punto 3.13)
  - Capítulo 3 de [2] (especialmente punto 3.4)
  - Capítulo 4 de [3] (especialmente punto 4.3)

[1] Bioelectricity. A quantitative approach. R Plonsey & R Barr. Ed. Springer, 2007

[2] Bioelectromagnetism. J Malmivuo & R Plonsey. Ed. Oxford University Press, 1995

[3] Bioelectrónica. Señales bioeléctricas. JM Ferrero, JM Ferrero, J Saiz & A Arnau Ed. SP-UPV, 1994