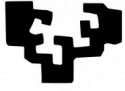


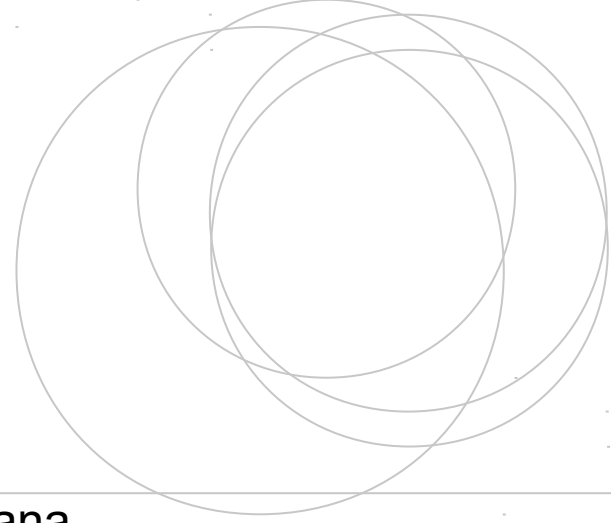
eman ta zabal zazu



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

ZIENTZIA  
ETA TEKNOLOGIA  
FAKULTATEA  
FACULTAD  
DE CIENCIA  
Y TECNOLOGÍA



## Gradu Amaierako Lana Fisikako Gradua

# Plastikoaren kutsadura Mediterraneo itsasoan

Eredu lagrangearrean oinarritutako simulazioa

Egilea:  
Lide Lejonagoitia Garmendia

Zuzendaria:  
Jon Sáenz Agirre

# Aurkibidea

<b>I</b>	<b>SARRERA ETA HELBURUAK</b>	<b>1</b>
<b>II</b>	<b>GARAPENA</b>	<b>5</b>
<b>1</b>	<b>Metodologia</b>	<b>6</b>
1.1	Korronteen azterketa . . . . .	6
1.1.1	Higidura geofisikoa zuzentzen duten ekuazioak . . . . .	6
1.1.2	Korronte geostrofikoak . . . . .	12
1.1.3	Ekman korronteak . . . . .	14
1.2	Eredu lagrangearrak . . . . .	17
1.2.1	Partikula lagrangearren ibilbideen integrazioa . . . . .	18
1.2.2	Ibilbide estokastikoen integrazioa . . . . .	19
1.3	OceanParcels . . . . .	22
<b>2</b>	<b>Datuak</b>	<b>23</b>
2.1	Korronteak . . . . .	23
2.2	Isurpenak . . . . .	24
<b>3</b>	<b>Emaitzak eta eztabaida</b>	<b>26</b>
3.1	Banaketa homogenea . . . . .	26
3.2	Ibaietatik isuritako plastikoa . . . . .	30
3.3	Eta... Europar Batasunean plastikoa debekatuko balitz? . . . . .	32
<b>III</b>	<b>ONDORIOAK</b>	<b>34</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>36</b>

Atala I

# **SARRERA ETA HELBURUAK**

Gaur egun zaila da plastikorik gabeko mundu bat imajinatzea, inguratzen gaituzten objektu gehienak plastikoz eginda baitaude, partzialki bada ere: arropa, telefonoak eta ordenagailuak, etxeak eta altzariak... Gainera, azken urteotan plastikoa oso era errazean ekoiztu eta lantzea lortu da, eta horrek erabilera bakarreko plastikozko produktuen ekoizpen masiboa ekarri du. Haien artean daude supermerkatuetako poltsak, lastotxoak, ur botilak eta elikagaien ontziak, besteak beste. Horrela, gure gizarteak plastikoarekiko duen menpekotasuna erabatekoa da eta askotan badirudi hura aztikeriaz produzitu eta desagertzen dela. Baina, egia esan, ikerketen arabera plastikoak 450 eta 1000 urte artean behar ditu ingurune naturalean desagiteko. Are gehiago, zenbait kasutan baliteke inoiz maila molekularra arte ez desagitea [1]. Ondorioz, plastikoa ingurumenaren aurkako mehatxu larria bihurtu da azken urteotan. Hain larria non zenbait zientzialarik erabili eta botatzeko plastikoa material arriskutsuen sailkapenean sartu beharko litzatekeela proposatu duten [2].

Gaur egun, orain arte ekoiztu den plastikoaren %30a (2600 milioi tona) besterik ez dago erabileran, eta gainera, baztertuak diren hondakinen %75ak (4900 milioi tona) ez du inolako jarraipenik izaten, hau da, ez dira birziklatze-, errauste- edo bestelako prozesuetan sartzen [3]. Kontrolik gabe geratzen diren hondakin hauek dira ingurumena arriskuan jartzen dutenak, normalean naturako edozein bazterretan botata bukatzen baitute bertako ekosistemetan kalteak eraginez. Itsas-ingurumena da kalterik larrienak jasaten ari denetako bat. Korrontek bertara heltzen diren plastikoak garraiatzen dituzte kutsadura ozeano guztian zehar zabalduz. Ikertu den ozeanoetako puntu bakoitzean aurkitu izan da plastikoa, baita pentsaezinak iruditzen zaizkigun Artikoko izotzean eta Lurreko punturik sakonetan ere (*Mariana Trench*, 11034m) [4, 5].

Plastikoaren produkzio eta baztertze datuak ezagunak diren arren, itsasora heltzen den hondakin kopurua ezezaguna da oraindik. 2015ean burututako azterlan baten arabera 2010ean 4.8-12.7 milioi plastiko tonaren helmuga izan zen itsasoa [6]. Estimazioek diotenez, ozeanoetan bukatzen duten hondarren %70-80ak lurrean du jatorria (haizeak, ibaiek, ur-zikinek... garraiatuta), eta beste %20-30ak, aldiz, itsasoan bertan (arrantzontziek isurita, adibidez) [7]. Ibaiak isurketaren iturri garrantzitsuenetako bat dira, azterketen arabera urtean 1.15-2.41 milioi tona plastiko jariatzen baitituzte. Gainera, isurketen 2/3en erantzuleak munduko 20 ibai kutsatuenak dira, lehenengoa Yangtze ibaia (Txina) izanik, zeinak urtean 333.000 tona plastiko isurtzen dituen Itsaso Horira [8].

Hondakin hauek eragin larriak dituzte ekosistemetan, animaliak haietan trabatuta geratzeaz gain, irentsi egiten baitituzte elikagaietatik bereizteko gai ez direlako. Gero eta gehiago dira barnean harnaketa kilo plastiko dituztela hilda aurkitu diren animaliak (baleak, katxaloteak...). Baina arazoa ez da animalia handietara soilik mugatzen, hasiera batean handiak diren hondakinak eguzkiaren, azidotasunaren eta olatuen ondorioz pixkanaka desagiten direlako eta mota guztietako animalien sabelean amaitzen dutelako. Adibidez, planktonean, muskuiluetan, arrainetan eta itsas-hegaztietan [7].

Izaki bizidunak ez dira gai irensten dituzten plastikoak digeritzeko, eta ondorioz, haien barnean metaketa prozesu bat gertatzen da. Zatiirik handienak digestio-aparatuan trabatuta geratzen dira, elikatze arazoak sortuz, eta zenbait kasutan banakoaren heriotza eraginez. Hauek baino arriskutsuagoak izan daitezke, ordea, ikusezinak eta kontrolaezinak diren *mikroplastikoak* (5mm baino txikiagoak diren plastikoak). Izan ere, badirudi erraz hedatzen direla elikadura katean gora, gizakienganaino heldu arte [9]. Hala ere, hau ez da gizakiengan aurkitu diren plastiko aztarnen jatorri bakarra (biztanleriaren %93ak BPA du gernuan eta ume zein helduen odolean ftalatoak aurkitu dira [10, 11]). Hainbat ikerketek bestelako elikagaietan ere aurkitu dituzte plastikoak, eztiari, garagar-doan, iturriko uretan eta gatzean, besteak beste [12, 13]. Gainera, elikagaien bilgarriek, plastikozko botilek, biberoiek eta polikarbonatozko ontziteriak ere kutsa ditzakete kontsumitzen ditugun janari eta edariak [10].

Datu hauek eskuartean izanda, argi dago itsasoko plastikoen kutsadura gaur egungo ingurumen arazo larrienetako bat dela aldaketa klimatikoarekin eta airearen kutsadurarekin batera. Gainera, ez dirudi etorkizun laburrean afera hau arintzeko neurri ekonomiko ez legalik hartuko denik. Hala, berebiziko garrantzia du plastikoak itsasoan duen portaera zein den jakiteak, lekuan lekuko ezaugarrietara moldatzen diren eskuhartze planak diseinatu eta arazo honi konponbide eraginkor bat eman ahal izateko. Itsasoko plastikoaren higidura ezagutzeko asmoz hainbat ikerketa egin dira azken urteotan eszenario eta eredu konputazional ezberdinak erabiliz.

2012an mundu osoan zeharreko itsaso eta ozeanoetako plastikoen portaeraren ikerketa bat burutu zen [14]. Honen helburua 30 urtean zehar lurretik zein itsasotik bertatik isuritako hondakin plastikoen garraioa eta pilaketa simulatzea zen. Horretarako 9.8 milioi partikula birtual inguru isuri zituzten eta haien jarraipen lagrangearra burutu zuten Pol3DD ereduaren bidez. Partikulak ozeano eta itsasoetan zehar garraiatzeko beharrezko korronteak HYCOM sistematik hartu zituzten. Bukararako emaitzetan argi ikusi zuten zaborraren bost bilgune nagusi daudela ozeano nagusietako latitude subtropikaletan, gaur egun *garbage patch* izenez ezagunak direnak. Gainera, ipar hemisferiokoek tamaina eta kontzentrazioa hego hemisferiokoena baino handiagoa dela adierazi zuten simulazioek. Azkenik, kostaldean biztanleria dentsitatea altua duten itsaso txikiagoetan ere gainazaleko plastiko kutsaduraren kontzentrazioa handia dela ondorioztatu zuten.

Orain aipatutakoaren parekoak diren azterlanek eta behaketek ziurtatu egiten dute bost konbergentzia-gune nagusien existentzia, baina oraindik ez dago argi zeintzuk diren haiek sortzen dituzten faktoreak. Zalantza hauek argitzeko egindako ikerketen artean dago 2019an simulazio bidez egindakoa [15]. Bertan partikulen jarraipenerako eredu lagrangearra erabiliz Ekman korronteek, korronte geostrofikoek eta Stokesen gainazaleko korronteek mundu mailako plastikoaren banaketan duten eragina aztertu zuten. Jarraipena OceanParcels *toolboxa* erabiliz egin zuten eta beharrezko korronteak GlobCurrent eta WaveWatch III datuetatik hartu zituzten. Lortutako emaitzek pilaketen erantzule nagusia Ekman korronteak direla adierazten zuten. Gainera, korronte geostrofikoek eta Stokesen korronteek konbergentzia-guneen sorreran duten ekarpena nahiko txikia dela ere ondorioztatu zuten. Azkenik, Stokesen korronteek partikulak Artikorantz bultzatzen zituztela ikusi ahal izan zuten.

Lehenengo aipatutako ikerketaren emaitzetako bat da biztanleria dentsitate altuko itsaso txikietako kutsadura nahiko altua dela. Itsaso hauetako bat Mediterraneo itsasoa da eta bertan ere hainbat azterlan egin dira. 2018an burututako ikerketa batean, adibidez, Mediterraneo itsasoko plastikoen jarraipena egin zen bi dimentsioko eredu lagrangear bat erabiliz [16]. Bertan  $10^{10}$  partikula birtual baino gehiago isuri zituzten hiriguneetatik, erreketatik eta itsasontzietatik. Hasiera batean guztiak gainazalean zeuden arren, denborarekin kostaldera heltzeko edo hondoratzeko aukera ere bazegoela hartu zuten kontuan. Higidura aztertzeke gainazaleko korronteez gain Stokesen korrontea ere erabili zuten, azken honek nabarmen desbideratzen baititu partikulen bideak. Gainazaleko plastiko kontzentrazioa denbora eta espazioan zehar asko aldatzen zenez konbergentzia-gune nabarmenik ez zegoela behatu zuten. Horrela, Mediterraneoeko plastiko partikula gehienek helmuga kosta eta itsas-hondoa direla ondorioztatu zuten.

Gradu amaierako lan honetan ere itsasoko plastikoen kutsadura aztertuko da eredu lagrangearrean oinarritutako simulazioen bidez. Eskura ditugun baliabide konputazionalak murrizak izanik, nahitaezkoa da ikerketa burutzeko zonalde egoki bat aukeratzea. Alde batetik, simulazioek erresoluzio esanguratsu bat izan dezaten azalera ezin da nolana hinkoa izan. Izan ere, kontuan hartu behar dugu azterketa eremuari gehitzen diogun puntu bakoitzeko gorde eta kudeatu beharrezko datu kopurua handitu egiten dela. Bestetik, zonaldea itxia izatea komenigarria da partikulen kanporantzko zein barrurantzko fluxuen estimazioak egiteko beharra ekiditen baitugu. Ezaugarri hauek dituzten zonalde asko defini daitezke eta, hauen artean, Mediterraneo itsasoa da interesgarrienetako bat. Izan ere:

- Eredu globalek aurrea dute hondakin plastikoen kontzentrazio altuenetakoa duen gunea dela. Are gehiago, zenbait ikerketek beste bost *garbage patch* nagusiekin batera pilaketa eremu garrantzitsuen sailkapenean sartzea proposatu dute [17].
- Kostan populazio-dentsitate altua du, arrantza-gune garrantzitsua da, itsasontzien joan-etorria etengabekoa da, bilgune turistiko ezaguna da eta industriagune ugari daude. Horregatik, eta itsaso *itxia* dela kontuan hartuta, gizakiaren eragina beste itsasoetan baino nabariagoa da bertan.
- Balio ekologiko izugarri handia du munduko itsas-espezie guztien %4-%18aren bizitokia baita [18]. Ondorioz, plastikoaren kutsadurak eragindako kalteak bereziki larriak izan daitezke bertan.

Arazoa aztertzeko geografiak ematen dituen erraztasunengatik eta kutsadurak bertan izan ditzakeen ondorio kaltegarriengatik ikerketa hau Mediterraneoan itsasoan zentratuta egongo da. Helburu nagusia bertako plastikoaren kutsaduraren portaera ulertzea da, eta horretarako, partikula birtualen garraioa simulatuko da hainbat eszenario ezberdinetan.

- **Banaketa homogenea:** Hasiara batean partikulen zorizko banaketa homogeen baten bila-kaera aztertuko dugu. Banaketa artifizial honen bidez Mediterraneoan plastikoen konbergentzia-gunerik edo bestelako pilaketarik dagoen ikusi nahi dugu.
- **Errealitatearen hurbilketa:** Behin partikulen garraioa nolakoa den jakinda, azterketa errealistago bat egingo dugu, ibai nagusiek isuritako hondakinen jarraipena eginez. Helburua benetako egoeraren inguruko informazioa lortzea da, kutsadurari aurre egiteko planak diseinatzerako orduan ezinbestekoa dena.
- **Egoera hipotetiko:** Azkenik, egoera hipotetiko bat ikertuko dugu. Kalteak arintzeko planteatzen den konponbide entzutetsuenetako bat plastikoaren debekua da. Lan honetan neurri hau Europar Batasuneko herrialdeetan martxan jartzeak izango lukeen eragina aztertuko da haren eraginkortasun maila zein izango litzatekeen ezagutzeko asmoz.

Azkenik, gradu amaierako lan hau proposatzeko arrazoi nagusietako bat betidanik interesatu zaidan ingurugiroaren alorrean fisika nola aplikatu daitekeen ezagutzea izan da, etorkizun batean nire formakuntza gero eta garrantzitsuagoa bilakatuko den ildo honetatik jarraitzeko aukera esploratuz. Era berean, lan honek graduan zehar garatutako gaitasun eta ezagutzak aplikatuz nire burua lehen aldiz nolabaiteko ikerketa prozesu batean murgiltzea eta trebatzea du helburu.

Atala II

**GARAPENA**

# Kapitulua 1

## Metodologia

Atal honetan gradu amaierako lanean egindako azterketa klasikoaren oinarri teorikoa landuko da. Lehenengo eta behin itsasoko korronteak deskribatzen dituzten ekuazioak garatuko ditugu *Introduction To Physical Oceanography* eta *Introduction to geophysical fluid dynamics* liburuetan oinarrituz [19, 20]. Ondoren, *Lagrangian ocean analysis: Fundamentals and practices* eta *Lagrangian models of dispersion in marine environment* artikulua jarraituz partikulen jarraipenerako eredu lagrangearrak landuko ditugu, haietan oinarritzen baitira burutu ditugun simulazioak [21, 22]. Azkenik, simulazioak aurrera eramateko erabilitako tresna, OceanParcels, aurkeztuko dugu.

### 1.1 Korronteen azterketa

Korronteak ozeanoko masa-garraioak dira azken finean. Hauek aztertzen dituen fisikako alorra fluidoaren dinamika geofisikoa da, naturan agertzen diren eskala handiko jarioak ikertzen dituena. Fluidoaren dinamika geofisikoa eta fluidoaren mekanikaren arteko ezberdintasuna da lehenengoak, bigarrenak ez bezala, biraketen eta estratifikazioaren eraginak kontuan hartzen dituela. Efektu hauek propietate bereizgarriak ematen dizkiete fluxu geofisikoei.

#### Biraketaren eragina

Ozeanoko korronteak aztertzeke erabiltzen den erreferentzia-sistema Lurrarekin batera biratzen da eta ozeanoetako ura bertan higitzen da. Dakigunez, erreferentzia-sistema birakari batean mugitzen den gorputzen gainean bi indar sortzen dira: Coriolis indarra eta indar zentrifugoa. Hortaz, aztergai dugun fluidoak bi hauen eragina izango du. Lehenengoa fluidoaren dinamikan berebiziko garrantzia duen faktorea da. Bigarrenaren efektuak, aldiz, arbuigarriak dira, betiere grabitatea geoidearekiko definituz.

#### Estratifikazioaren eragina

Ozeano eta itsasoetan dentsitate ezberdinetako fluidoak egon ohi dira eta grabitateak pisutsuenak beherantz eramaten ditu. Horrela, orekan fluidoaren dentsitate konstanteko geruza horizontaletan banatuta dago, hau baita energia potentzial minimoko egoera. Fluidoaren mugimenduek egoera hau perturbatzen dute eta grabitatea oreka-egoera berreskuratzen saiatzen da.

#### 1.1.1 Higidura geofisikoa zuzentzen duten ekuazioak

Orain estratifikatuta dagoen fluido birakari baten higidura deskribatzen duten ekuazioak ondorioztatuko ditugu. Lehenengo eta behin ekuazio orokorrak lortuko ditugu, eta ondoren, Boussinesq



hurbilketa eta beste hainbat erabiliz ekuazioak sinplifikatuko ditugu gero korranteak aztertu ahal izateko.

Ozeanoen dinamika deskribatzeko zazpi aldagai erabiltzen dira: abiaduraren hiru osagaiak ( $u, v, w$ ), presioa ( $p$ ), dentsitatea ( $\rho$ ), tenperatura ( $T$ ) eta gazitasuna ( $S$ ). Hortaz, zazpi ekuazio behar dira azterketa egiteko: momentuaren hiru ekuazioak, jarraitutasunaren ekuazioa, energiaren ekuazioa, egoera ekuazioa (dentsitatea eta presioa erlazionatzen dituena) eta gazitasunaren ekuazioa. Gu momentuaren hiru ekuazioetan eta jarraitutasun ekuazioan zentratuko gara hauek nahikoa baitira interesatzen zaizkigun korrante geostrofikoak azaltzeko.

Jarraitutasunaren eta momentuen ekuazioak masaren eta momentuaren kontserbazio printzipioetatik eratorriak dira, hurrenez hurren. Horregatik, haien adierazpena lortzeko fluidoan bolumen txiki arbitrario bat definitzen da, edozein forma izan dezakeena, eta kontserbazio printzipioak aplikatzen zaizkio. Ondoren, bolumena infinitesimala deneko limitea aztertu eta bila gabiltzan ekuazioak lortzen dira.

**Jarraitutasunaren ekuazioak**, (1.1), adierazten du bolumenean zehar masaren fluxua baldin badago fluido konprimatu edo zabaldu egingo dela, hau da, bere dentsitatea aldatuko dela.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (1.1)$$

Bestalde, Newtonen bigarren legea jarraituz, fluidoaren gaineko indar totala ez-nulua bada haren momentua aldatuko da. Fluidoaren gainean eragiten duten indarrak presioaren gradientea, Coriolis indarra, grabitatea (bertikal lokalarekiko paraleloa dena, hau da,  $\vec{\Omega} \times \vec{\Omega} \times \vec{r}$  indar zentrifugoa barruan duena) eta marruskadura direnean honela geratzen da **momentuaren ekuazioa**:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} + 2\vec{\Omega} \times \vec{v} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \vec{g} + \vec{F}_{mar} \quad (1.2)$$

Koordenatu kartesiarretan garatuz:

$$x: \quad \rho \left( \frac{du}{dt} + f_* w - fv \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau^{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau^{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau^{xz}}{\partial z} \quad (1.3a)$$

$$y: \quad \rho \left( \frac{dv}{dt} + fu \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau^{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau^{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau^{yz}}{\partial z} \quad (1.3b)$$

$$z: \quad \rho \left( \frac{dw}{dt} - f_* u \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g + \frac{\partial \tau^{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau^{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau^{zz}}{\partial z} \quad (1.3c)$$

non  $f = 2\Omega \sin \phi$  eta  $f_* = 2\Omega \cos \phi$  Coriolisen parametroa eta elkarrekiko Coriolisen parametroa diren, hurrenez hurren.  $\tau^{ij}$  osagaiak, bestalde, marruskadurak (biskositateak) sortutako esfortzuaren osagai normalak eta ebakidura osagaiak adierazten dituzte. Azkenik, gogoratu grabitatetzat bertikal lokalarekiko paraleloa den indarra hartu dugula, *benetako grabitatearen* eta indar zentrifugoen batura dena.

Azpimarratu beharra dago azelerazioa ez dela fluidoaren abiadurak puntu jakin batean duen aldatketaren bidez neurtzen, fluxuarekin batera higitzen den partikula baten abiaduraren aldatketaren bidez baizik. Horregatik, (1.3) adierazpenetako denborarekiko deribatutako denborarekiko aldatetak ez ezik, espazioarekikoak ere izan behar ditu kontuan. Deribatu honi *deribatu totala* deitzen zaio.

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z}$$

Azkenik, aipatzekoa da  $\Omega = 0$  denean, hau da, fluido birakaria ez denean, fluidoaren mekanikako *Navier-Stokes* ekuazioak berreskuratzen direla. Hau ikusita argi dago biraketaren eragina kontuan hartzean portaera berriak agertuko direla, atal honen hasieran aipatu bezala.

## Boussinesq hurbilketa

Zehaztasun handirik galdu gabe (1.1) eta (1.3) ekuazioak sinplifikatzeko Boussinesq hurbilketa aplika daiteke. Hurbilketa honetan fluidoaren puntu batetik bestera dentsitatearen aldaketa txikia dela kontsideratzen da. Horrela, dentsitateak erreferentziako balio bat ( $\rho_0$ ) eta perturbazio gaia ( $\rho'$ ) izango ditu. Azken hau estratifikazioak zein fluidoaren mugimenduak sortutakoa izan daiteke.

$$\rho = \rho_0 + \rho'(x, y, z, t) \quad : \quad |\rho'| \ll \rho_0 \quad (1.4)$$

Lehenengo eta behin jarraitutasun ekuazioa sinplifikatuko dugu. Adierazpen hau (1.1) ekuazioan sartuz:

$$\rho_0 \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \rho' \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \left( \frac{\partial \rho'}{\partial t} + u \frac{\partial \rho'}{\partial x} + v \frac{\partial \rho'}{\partial y} + w \frac{\partial \rho'}{\partial z} \right) = 0$$

Ozeano eta itsasoetan dentsitatearen denbora eta espazioko aldaketak abiadurarenak baino txikiagoak edo antzekoak izaten dira. Beraz, adierazpen honetako hirugarren terminoaren magnitude ordena bigarrenaren antzekoa edo txikiagoa izango da. Honetaz gain,  $|\rho'| \ll \rho_0$  dela aipatu dugunez bigarren terminoa, eta ondorioz hirugarrena, arbuigarriak izango dira lehenengoarekin alderatuz. Hortaz, horrela geratzen da **jarraitutasun ekuazio sinplifikatua**:

$$\boxed{\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0} \quad (1.5)$$

Orain momentuaren ekuazioak, (1.3), landuko ditugu. Horretarako aztertutako fluido Newton-darra dela suposatuko dugu. Mota honetako fluidoetan biskositate-esfortzuaren eta abiaduraren gradientearen arteko erlazioa hurrengoa da:

$$\tau^{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \delta_{ij} \lambda \nabla \vec{v} \quad (1.6)$$

non  $\mu$  eta  $\lambda$  biskositate dinamikoaren eta bulkada biskositatearen koefizienteak diren, hurrenez hurren.

Jarraitutasun ekuazio sinplifikatua, (1.5), erabiliz:

$$\tau^{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (1.7)$$

Bestalde, Boussinesq hurbilketa, (1.4), aplikatzean momentuaren ekuazioetako ezkerreko aldean  $\rho_0$ -ri lotutako gaiak soilik mantenduko ditugu [20]. Honetaz gain, ohartu momentuaren z osagaiari dagokion ekuazioan, (1.3c), dentsitatearen eta grabitatearen arteko biderkadura dugula. Kasu horretan ezin da  $\rho'$ -ri dagokion gaia arbuiaitu presioaren aldaketan eragina baitu. Aldaketa hau honela adieraz daiteke:

$$p = p_0(z) + p'(x, y, z, t) \quad : \quad p_0(z) = P_0 - \rho_0 g z \quad (1.8)$$

non  $P_0$  egurats-presioa den, hots, oreka hidrostatikoa bertikalean.

(1.3) ekuazioen ezkerreko aldean  $\rho'$ -rekin doazen gaiak arbuiaituz eta (1.7) eta (1.8) baldintzak kontuan hartuz horrela geratzen dira momentuaren ekuazioak:

$$x: \quad \frac{du}{dt} + f_* w - f v = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p'}{\partial x} + \nu \nabla^2 u \quad (1.9a)$$

$$y: \quad \frac{dv}{dt} + f u = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p'}{\partial y} + \nu \nabla^2 v \quad (1.9b)$$

$$z: \quad \frac{dw}{dt} - f_* u = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p'}{\partial z} - \frac{\rho' g}{\rho_0} + \nu \nabla^2 w \quad (1.9c)$$

non  $\nu = \mu/\rho_0$  biskositate zinematikoa den.

Hemendik aurrera ez dira  $p$  eta  $\rho$  jatorrizko aldagaiak agertuko, eta beraz,  $p'$  eta  $\rho'$ -ri ' ikurra kenduko diegu. Hau da, hurrengo ekuazioetan  $p$  eta  $\rho$ -ren bidez presioaren eta dentsitatearen perturbazioak adieraziko ditugu, hurrenez hurren.

### Reynolds batezbestekoa

Fluido geofisikoen dinamikaren oinarria osatzen duten ekuazioak garatzen jarraituko dugu. Fluido geofisikoa normalean turbulentsia egoeran egoten dira. Ondorioz, haiei dagozkien aldagaiak bi ataletan bana daitezke. Alde batetik batezbesteko balioa izango dugu, eta bestetik, fluktuazioen eragina kontuan hartzen duen gaia. Hau da:

$$u = \langle u \rangle + u' \quad : \quad \langle u' \rangle = 0$$

Ekuazioak lantzerako orduan ondoko propietatea izan beharko dugu buruan:

$$\langle uv \rangle = \langle \langle u \rangle \langle v \rangle \rangle + \langle \langle u \rangle v' \rangle + \langle \langle v \rangle u' \rangle + \langle u' v' \rangle = \langle u \rangle \langle v \rangle + \langle u' v' \rangle$$

Fluktuazio hauek kontuan hartzean jarraitutasun ekuazio sinplifikatua, (1.5), ez da aldatzen baina momentuarenak bai. Bi propietate hauek ezagututa (1.9) ekuazioak berridatziko ditugu.  $x$  osagaiaren ekuazioari, (1.9a), dagokionez:

$$\frac{\partial \langle u \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle uu \rangle}{\partial x} + \frac{\partial \langle vu \rangle}{\partial y} + \frac{\partial \langle wu \rangle}{\partial z} + f_* \langle w \rangle - f \langle v \rangle = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x} + \nu \nabla^2 \langle u \rangle \quad (1.10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle u \rangle \langle u \rangle}{\partial x} + \frac{\partial \langle v \rangle \langle u \rangle}{\partial y} + \frac{\partial \langle w \rangle \langle u \rangle}{\partial z} + f_* \langle w \rangle - f \langle v \rangle = \\ -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x} + \nu \nabla^2 \langle u \rangle - \frac{\partial \langle u' u' \rangle}{\partial x} - \frac{\partial \langle v' u' \rangle}{\partial y} - \frac{\partial \langle w' u' \rangle}{\partial z} \end{aligned} \quad (1.11)$$

Ekuazio honetako azken hiru terminoek fluktuazioek fluidoaren gainean duten eragina adierazten dute. Gainera, gai hauek eta biskositate-esfortzuari dagozkionak gehi daitezke. Prozesu hau (1.9) ekuazioetan errepikatuz:

$$\begin{aligned} x: \quad \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle u \rangle \langle u \rangle}{\partial x} + \frac{\partial \langle v \rangle \langle u \rangle}{\partial y} + \frac{\partial \langle w \rangle \langle u \rangle}{\partial z} + f_* \langle w \rangle - f \langle v \rangle = \\ -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial x} - \langle u' u' \rangle \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial y} - \langle u' v' \rangle \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial z} - \langle u' w' \rangle \right) \end{aligned} \quad (1.12a)$$

$$\begin{aligned} y: \quad \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle u \rangle \langle v \rangle}{\partial x} + \frac{\partial \langle v \rangle \langle v \rangle}{\partial y} + \frac{\partial \langle w \rangle \langle v \rangle}{\partial z} + f \langle u \rangle = \\ -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial x} - \langle u' v' \rangle \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial y} - \langle v' v' \rangle \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial z} - \langle v' w' \rangle \right) \end{aligned} \quad (1.12b)$$

$$\begin{aligned} z: \quad \frac{\partial \langle w \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle u \rangle \langle w \rangle}{\partial x} + \frac{\partial \langle v \rangle \langle w \rangle}{\partial y} + \frac{\partial \langle w \rangle \langle w \rangle}{\partial z} - f_* \langle u \rangle = -\frac{g \langle \rho \rangle}{\rho_0} \\ -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu \frac{\partial \langle w \rangle}{\partial x} - \langle u' w' \rangle \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu \frac{\partial \langle w \rangle}{\partial y} - \langle v' w' \rangle \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu \frac{\partial \langle w \rangle}{\partial z} - \langle w' w' \rangle \right) \end{aligned} \quad (1.12c)$$

Adierazpen hauetan esfortzu gaiek bi osagai dituzte: biskositateari dagokiona eta turbulentsiei dagokiena ( $\langle u' v' \rangle, \langle w' w' \rangle, \dots$ ). Azken hauei *Reynolds esfortzu* deritze eta turbulentsien fluktuazioen ondoriozko momentu transferentzia adierazten dute.

Gauzak horrela, ekuazioak ebazterako orduan biskositatearen eraginaz gain Reynolds esfortzuena ere hartu behar da kontuan. Horretarako hainbat modu daude baina sinpleenean  $\nu$  biskositate molekularraren ordez askoz handiagoak diren *Eddy biskositateak* ( $\nu_E$  eta  $\mathcal{A}$ ) erabiltzen dira. Hauek fluxuaren propietate bat dira, posizioaren arabera direnak. Gainera, modelizatu behar dira haien balioa ezin baita teorikoki lortu.

Hemendik aurrera aldagaien batezbestekoeekin egingo dugu lan, eta horregatik, notazioa sinplifikatzeko asmoz makoak kenduko ditugu. Hau jakinik, (1.12) ekuazioetan Eddy biskositateak sartuz:

$$\begin{aligned} x: \quad \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + f_* w - f v = \\ - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mathcal{A} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mathcal{A} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_E \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (1.13a)$$

$$\begin{aligned} y: \quad \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + f u = \\ - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mathcal{A} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mathcal{A} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_E \frac{\partial v}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (1.13b)$$

$$\begin{aligned} z: \quad \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} - f_* u = \\ - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\rho g}{\rho_0} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mathcal{A} \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mathcal{A} \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_E \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (1.13c)$$

Ekuazio hauetan eddy biskositate ezberdinak esleitu zaizkie norabide horizontal eta bertikalei. Izan ere, fluxuek horizontalean egindako distantziak bertikalean egindakoak baino askoz handiagoak direnez  $\mathcal{A}$  terminoak  $\nu_E$ -k baino higidura turbulentu gehiago izan beharko ditu kontuan, eta horregatik handiagoa izango da.

### Higidura eskalak

Orain arte lortutako higidura-ekuazioak are gehiago sinplifika daitezke higidura eskalak kontuan hartuz gero. Horretarako ekuazioetako gai bakoitzaren magnitude ordena aztertzen da eta horren arabera arbuigarriak diren terminoak identifikatzen dira. Magnitude ordena zehazteko aldagai bakoitzari haren dimentsioa duen konstante bat esleitzen zaio, eskala izenez ezaguna dena. Ondoko zerrendan aldagai bakoitzari dagokion eskala adierazi da:

$$\begin{array}{ccccc} x \rightarrow L & z \rightarrow H & v \rightarrow U & p \rightarrow P & t \rightarrow T \\ y \rightarrow L & u \rightarrow U & w \rightarrow W & \rho \rightarrow \Delta\rho & f \rightarrow \Omega \end{array}$$

Ohartu atal honetan T-ren bidez adieraziko dugula denborari dagokion eskala. Ez da temperatura-rekin nahastu behar.

Lehenengo eta behin biraketaren eragina nabarmena den kasuetan higidura eskalek betetzen dituzten erlazioak zeintzuk diren aztertuko dugu. Horretarako fluidoaren mugimenduaren garapenaren denbora eskala aztertu behar da. Ondoko parametroa definituz:

$$\epsilon = \frac{\text{Lurrak biraketa bat egiteko behar duen denbora}}{\text{Partikulak } U \text{ abiaduraz } L \text{ distantzia egiteko behar duen denbora}} = \frac{2\pi/\Omega}{L/U} = \frac{2\pi U}{\Omega L} \quad (1.14)$$

$\epsilon \lesssim 1$  denean biraketaren eragina kontuan hartu behar da. Hortaz, biraketaren eraginak kontsideratzeko ondoko baldintzak bete behar dira:

$$\frac{U}{L} \lesssim \Omega \quad (1.15) \quad T \gtrsim \frac{1}{\Omega} \quad (1.16)$$

Adibidez,  $L=100\text{km}$  eta  $U \leq 1.2\text{m/s}$  ( $L=1000\text{km}$  eta  $U \leq 12\text{m/s}$ ) denean biraketa efektuak garrantzitsuak dira.

Behin hau jakinda  $L$  eta  $H$ -ren arteko erlazioa zehaztuko dugu. Ozeano eta itsasoetako fluxuak horizontalean espazio zabalak betetzen dituzte baina haien sakonera txikia izan ohi da. Hortaz:

$$\boxed{H \ll L} \quad (1.17)$$

Harreman honetatik abiatuta  $U$  eta  $W$ -ren artekoa aztertuko dugu jarraitutasun ekuazio sinplifikatua (1.5) erabiliz. Ekuazio honen osagaiei dagozkien eskalak ondokoak dira:

$$\frac{U}{L} ; \frac{U}{L} ; \frac{W}{H}$$

Demagun  $W/H$  terminoa  $U/L$  baino askoz handiagoa dela. Kasu horretan jarraitutasun ekuazioko lehen bi gaiak arbuigarriak lirateke eta  $\partial w / \partial z = 0$  izango genuke. Beraz, abiadura bertikala konstantea izango litzateke. Baina  $H$  finitua da, eta ondorioz,  $w$  konstantea izan dadin beharrezkoa da haren mugetan (zoruan, adibidez) fluxuaren ekarpen horizontal bat egotea. Honek esan nahi du (1.5) ekuazioko lehen bi terminoak ezin direla aldi berean arbuia. Horregatik  $W/H \lesssim U/L$  izango da beti. Gainera, (1.17) erlazioa erabiliz:

$$\boxed{W \ll U} \quad (1.18)$$

Fluxuak gutxi gorabehera bi dimentsionalak (1.18) eta sakonera txikikoak (1.17) izateak momentuaren ekuazioetan (1.13) duen eragina aztertuko dugu orain.  $x$  osagaiari dagokion ekuazioan (1.13a) arbuia daiteken gai bakarra  $f_* w$  da.  $y$ -ri dagokionean (1.13b) aldiz, ez dago ezeztza daitekeen terminorik. Bi ekuazio hauen eskala azterketak ez du sinplifikazio askorik egiteko balio izan baina zenbait erlazio garrantzitsu ondoriozta daitezke bertatik, gero z ardatzeko ekuazioa (1.13c) nabarmen laburtuko dutenak.

Aztertutako jarioetan biraketaren eragina nabarmena denez, Coriolisen gaia eta higidura sortzen duen indarrarena parekoak dira. Kasu honetan sortzailea presioaren gradientea denez:

$$\frac{P}{\rho_0 L} = \Omega U \quad (1.19)$$

Bestalde, disipazio bertikal eta horizontalaren gaiak ezin dira Coriolisen gaia baino garrantzitsuagoak izan. Hortaz:

$$\frac{\nu_E U}{H^2} \lesssim \Omega U \quad (1.20) \quad \frac{\mathcal{A}U}{L^2} \lesssim \Omega U \quad (1.21)$$

Behin erlazio hauek ezagututa momentuaren  $z$  osagaiari dagokion ekuazioa sinplifikatzeko moduan gara. Haren osagaiak eskalen bidez adieraziz gero:

$$\frac{W}{T} ; \frac{UW}{T} ; \frac{UW}{T} ; \frac{W^2}{H} ; \Omega U ; \frac{P}{\rho_0 H} ; \frac{g\Delta\rho}{\rho_0} ; \frac{\mathcal{A}W}{L^2} ; \frac{\mathcal{A}U}{L^2} ; \frac{\nu_E W}{H^2}$$

(1.16) erlazioa dela eta lehenengo terminoa  $W\Omega$  baino txikiagoa edo antzekoa izan behar da. Ondorioz, (1.18) kontuan hartzen badugu  $U\Omega$ -rekin alderatuz txikia izango da. Bestalde, (1.15) eta (1.18) baliatuz esan dezakegu hurrengo hiru gaiak ere arbuigarriak direla  $U\Omega$ -ren aldean. Honetaz

gain, (1.20) eta (1.21) ekuazioetan Uren ordez  $W$  jarriz gero argi geratzen da azken hiru terminoen ekarpena oso txikia dela. Hau kontuan izanda, momentuz ondoko gaiak geratzen dira:

$$\Omega U \quad ; \quad \frac{P}{\rho_0 H} \quad ; \quad \frac{g \Delta \rho}{\rho_0}$$

Azkenik, presio gradientearen eta Coriolis parametroaren arteko erlazioa aztertuko dugu. Bien zatiketa egin eta (1.19) erabili ondoren:

$$\frac{\Omega U \rho_0 H}{P} \sim \frac{H}{L} \ll 1$$

Hortaz, ekuaziotik  $\Omega U$  gaia kenduz gero ez dugu zehaztasun handirik galduko. Hau jakinik, horrela geratzen da (1.13c) ekuazioa:

$$z: \quad 0 = -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g \quad (1.22)$$

Hortaz, higidura eskalen bidezko azterketa egin ondoren ondokoak dira lortu ditugun **momentuaren ekuazio sinplifikatuak**:

$$\begin{aligned} x: \quad & \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - f v = \\ & -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mathcal{A} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mathcal{A} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_E \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (1.23)$$

$$\begin{aligned} y: \quad & \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + f u = \\ & -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mathcal{A} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mathcal{A} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_E \frac{\partial v}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (1.24)$$

$$z: \quad 0 = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\rho g}{\rho_0} \quad (1.25)$$

Momentuaren hiru ekuazio hauek eta jarraitutasunaren ekuazioa (1.5) dira dinamika geofisikoa-  
ren oinarria. Aztertutako fluidoaren propietateen arabera (homogeneoa, marruskadurarik gabea...) ekuazio hauek gehiago sinplifika daitezke eta ezaugarri bereizgarriak dituzten korronteak deskribatu ditzakete. Hurrengo ataletan, adibidez, ekuazio hauetatik abiatuz eta zenbait hipotesi eginez korronte geostrofikoen eta Ekman korronteen ezaugarri garrantzitsuak zeintzuk diren ikusiko dugu.

### 1.1.2 Korronte geostrofikoak

Biratzen ez duen fluido batean presio gradiente bat baldin badago fluido osatzen duten partikulek presio baxuko eremuetara joateko joera dute. Fluido birakaria baldin bada, aldiz, partikulen portaera beste bat da, Coriolisen indarra sartzen baita jokoan. Honek presio gradienteari aurre egiten dio, eta azkenean, sistema bi indar hauen arteko oreka egoerara heltzen da epe luzean. Momentu horretan sortzen dira korronte geostrofikoak.

Korronte geostrofikoen azterketa egiteko dentsitate konstanteko ( $\rho = \rho_0$ ) fluido bat erabiliko dugu. Honetaz gain, fluxua homogeneoa dela eta marruskaduraren eraginak arbuigarriak direla ere suposatuko dugu.

Ezaugarri hauek dituen fluido batean honela geratzen dira jarraitutasunaren (1.5) eta momentuaren (1.23), (1.24), (1.25) ekuazioak:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1.26)$$

$$x: -fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1.27a)$$

$$y: fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (1.27b)$$

$$z: 0 = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (1.27c)$$

Lehenengo eta behin fluidoaren abiadura horizontalak aztertuko ditugu. Horretarako (1.27a) eta (1.27b) ekuazioak z-errekiko deribatuko ditugu.

$$-f \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial z} = 0$$

$$f \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial p}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial p}{\partial z} = 0$$

Hortaz:

$$\boxed{\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = 0} \quad (1.28)$$

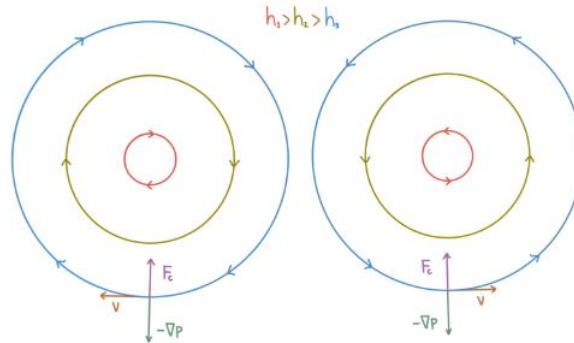
Emaitza honi *Taylor-Proudman teorema* deitzen zaio eta haren arabera fluidoaren abiadura horizontalak ez dira sakonerarekin batera aldatzen. Ondorioz, bertikal berean dauden partikula guztien higidura berdina izango da.

Bestalde, (1.27) ekuazioetatik abiadura horizontalak bakanduz:

$$\boxed{u_g = -\frac{1}{f\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y}} \quad (1.29)$$

$$\boxed{v_g = \frac{1}{f\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x}} \quad (1.30)$$

Azken bi ekuazio hauek adierazten dute abiadura bektorea presio gradientearekiko perpendikularra dela, eta ondorioz, fluidoa osatzen duten partikulak presio konstanteko lerroetan (*isobarak*) barrena higitzen dira, presio altu eta baxuko guneak inguratuz eta korrante geostrofikoak sortuz (ikus 1.1 irudia).



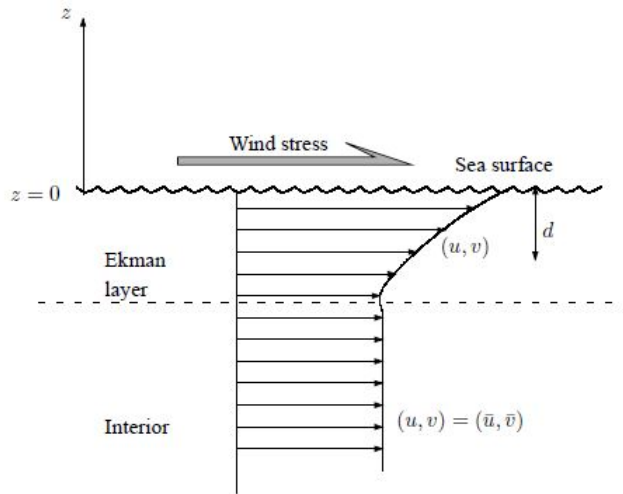
Irudia 1.1: Presio gradientearen eta Coriolis indarraren arteko oreka-egoera lortzen denean sortzen diren korrante geostrofikoak. Korranteak isobaretan zehar higitzen dira haien eta noranzkoa hemisferioen arabera da Coriolis indarra dela-eta. Kasu honetan ezkerreko irudia ipar hemisferioari dagokio, eta eskuinekoa, hego hemisferioari.

Fluido homogeen batean murgilduta dagoen partikula batek jasaten duen presioa haren gainean dagoen fluido kantitatearen arabera da. Zenbat eta jariakin gehiago izan gainean, orduan eta presio handiagoa jasango du. Horregatik presioa sakonerarekin batera handitzen da. Honek esan nahi du itsasoaren topografia konstantea ez bada, hau da, gainazalaren altuera puntu batzuetan besteetan baino altuagoa baldin bada, sakonera berean presio altu eta baxuko guneak sortuko direla. Isobarak altuera konstanteko lerroak izango dira (gazitasuna konstantetzat hartuz), eta hortaz, itsaso eta ozeanoen gainazalaren altuera aztertuz korrante geostrofikoak identifika daitezke.

Azkenik, ohartu abiaduraren noranzkoa Coriolisen indarraren arabera dela. Horregatik ipar hemisferioan partikulek eskuinaldean izaten dute presio altuko gunea, eta hego hemisferioan, ezkerrean.

### 1.1.3 Ekman korranteak

Demagun Coriolisen indarrak eta presio gradienteaz gain, gainazalean marruskadura tentsio horizontal bat ere badagoela, itsasoaren gainazalean haizeak jotzen duelako, adibidez. Hiru indar hauen arteko oreka-egoeran fluidoak duen portaera zein den aztertuko dugu. Aztertu beharreko egoeran sakonera handietan oreka geostrofikoa dugula kontsideratuko dugu. Gainera, gainazalean haizeak sortutako tentsio horizontala izango dugu, 1.2 irudian ikus daitekeen bezala.



Irudia 1.2: Haizeak itsasoaren gainazalean jotzen duenean sortzen diren korranteen eskema.  $\bar{u}$  eta  $\bar{v}$   $u_g$  eta  $v_g$  dira, hurrenez hurren. Irudia *Introduction to geophysical fluid dynamics* liburuko da [20]

Fluido homogeen eta egoera iraunkorra direla suposatuko dugu. Gainera, azterketa sinplifikatzeko asmoz eddy biskositatea konstantea dela ere kontsideratuko dugu. Hau jakinik, horrela geratzen dira (1.23) eta (1.24) ekuazioak:

$$x: \quad -f(v - v_g) = \nu_E \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1.31a)$$

$$y: \quad f(u - u_g) = \nu_E \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (1.31b)$$

non  $u_g$  eta  $v_g$  aurreko atalean aztertutako abiadura gesotrofikoak diren.  $u(z)$  eta  $v(z)$  funtzioek abiaduraren osagai bertikalaren bilakaera deskribatzen dute eta gure helburua haiek ezagutzea da.



Ekuzazioen soluzioa lortzeko gainazaleko eta sakonera handiko mugalde baldintzak erabiliko ditugu. Azterketa egiteko  $z = 0$  puntua gainazalean kokatuko dugu eta handik beherako puntuen sakonera  $z$ -ren balio negatiboan bidez adieraziko dugu. Hau jakinik:

$$z=0: \quad \rho_0 \nu_E \frac{\partial u}{\partial z} = \tau^x \quad \rho_0 \nu_E \frac{\partial v}{\partial z} = \tau^y \quad (1.32a)$$

$$z \rightarrow -\infty \quad u = u_g \quad v = v_g \quad (1.32b)$$

Mugalde baldintzen problema berridatziko dugu (1.32b)  $i$  zenbaki konplexuarekin biderkatu ondoren (1.32a) ekuazioarekin batuz [23].

$$if(v^* - v_g^*) = \nu_e \frac{\partial^2 v^*}{\partial z^2} \quad (1.33a)$$

$$z=0: \quad \rho_0 \nu_E \frac{\partial v^*}{\partial z} = \tau^x + i\tau^y \quad (1.33b)$$

$$z \rightarrow -\infty \quad v^* = v_g^* \quad (1.33c)$$

non  $v^* = u + iv$  abiadura konplexua eta  $v_g^* = u_g + iv_g$  abiadura geostrofiko konplexua definitu ditugun.

Problema honen soluzioa hurrengoa da:

$$u = u_g + \frac{1}{\rho\sqrt{f\nu_E}} e^{\frac{z}{d}} \left[ \tau_x \cos\left(\frac{z}{d} - \frac{\pi}{4}\right) - \tau_y \sin\left(\frac{z}{d} - \frac{\pi}{4}\right) \right] \quad (1.34a)$$

$$v = v_g + \frac{1}{\rho\sqrt{f\nu_E}} e^{\frac{z}{d}} \left[ \tau_x \sin\left(\frac{z}{d} - \frac{\pi}{4}\right) + \tau_y \cos\left(\frac{z}{d} - \frac{\pi}{4}\right) \right] \quad (1.34b)$$

non  $d = \sqrt{\frac{2\nu_E}{f}}$  Ekman geruzaren lodiera den.

Soluzio hauek aztertuz Ekman korronteen zenbait ezaugarri ezagut daitezke:

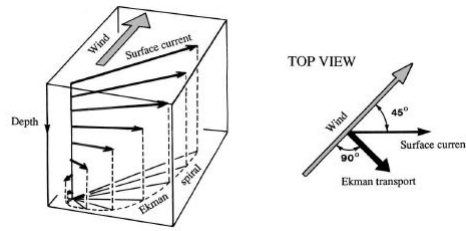
- Gainazaleko eta sakonera handietako fluxuen arteko ezberdintasuna sortzen duen faktore bakarra haizeak eragindako tentsioa da.
- Gainazalean haizearen eta korrontearen norabideak ez dira paraleloak. Zehazki, bien arteko angelua  $45^\circ$ koa da. Gainera, angelu hau sakonerarekin batera aldatzen da *Ekman espirala* sortuz (ikusi 1.3 irudia).
- Gainazaleko abiadura esponentzalki txikitzen da eta  $z \sim -d$  denean abiadura geostrofikoa berreskuratzen da. Horregatik deitzen zaio  $d$  parametroari Ekman geruzaren lodiera.

Ekman korronteen azterketarekin bukatzeko *Ekman garraioa* aztertuko dugu.  $u(z)$  eta  $v(z)$  sakoneraren menpekoak direnez, garraioa ere sakoneraren araberakoa izango da. Horregatik garraio garbia ezagutzea interesatzen zaigu. Haren osagaiak ondokoak dira:

$$U = \int_{-\infty}^0 (u - u_g) = \frac{\tau^y}{\rho_0 f} \quad (1.35a)$$

$$V = \int_{-\infty}^0 (v - v_g) = -\frac{\tau^x}{\rho_0 f} \quad (1.35b)$$

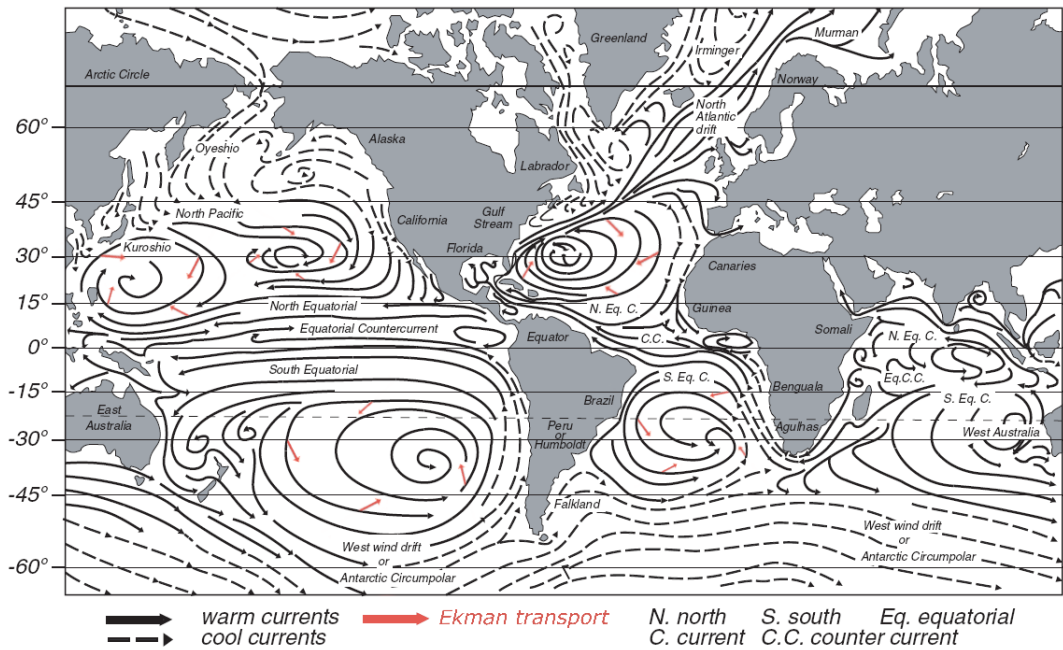
Hortaz, arraroa badirudi ere, Ekman garraioaren norabidea gainazaleko haizearekiko perpendikularra da, eskuinerantz ipar hemisferioan eta ezkererantz hego hemisferioan (ikusi 1.3 irudia).



Irudia 1.3: Ekman espirala ezker aldean eta haizearen, korrontearen eta garraioaren norabideak (ipar hemisferioan) eskuinaldean. Irudia *Introduction to geophysical fluid dynamics* liburukoa da [20]

Sarreran aipatu bezala, ikerketen arabera mundu mailako plastikoen pilaketa guneen erantzule nagusia Ekman korronteak dira [15]. Horregatik Ekman korronteak aztertuz konbergentzia-guneen sorrera azalduko dugu.

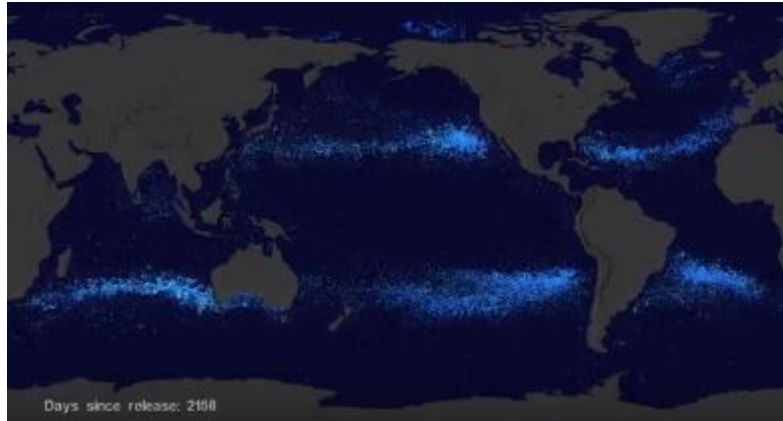
Lurreko ozeano nagusietako latitude ertainetan ( $-30^\circ$  eta  $30^\circ$  inguruan) Ekialdeko Tropikoko haize alisioak eta latitude ertaineko mendebaldeko haizeak daude, egonkorak direnak. Haize hauek ozeanoetako gainazalean tentsioa eragiten dute Ekman korronteak sortuz. Ozeanoen gainazaleko korronteen zirkulazioa 1.4 irudian dago adierazita. Bertan argi ikusten da latitude ertainetan gainazaleko korronteek zurrunbiloak sortzen dituztela.



Irudia 1.4: Ozeano nagusietako gainazaleko korronteak. Gezi gorrien bidez adierazi da Ekman garraio garbia. Jatorrizko irudia *Elements of Dynamic Oceanography* (David Tolmazin) liburutik ateratakoa da [24].

Orain aipatu dugunez, Ekman korronteek gauzatzen duten fluidoaren garraio garbia gainazaleko

korronteen norabidearekiko  $45^\circ$  eskuinera (ezkerrera) gertatzen da ipar hemisferioan (hego hemisferioan) (ikusi 1.3). Honek esan nahi du Ekman korronteez ur-masak latitude ertainetara bideratzen dituztela, hau da, latitude ertainak ozeanoetako konbergentzia guneak direla. Plastikozko hondakinak urarekin batera higitzen direnez, zentzuzkoa da konbergentzia-gune horietan zabor pilaketak egongo direla pentsatzea. Hau betetzen den ikusteko NASA's Scientific Visualization Studio-k simulazio bidezko azterketa bat burutu zuen [25]. Bertan plastikozko partikula birtualen banaketa homogeneo baten garapena aztertu eta ondoko emaitza lortu zuten:



Irudia 1.5: NASA's Scientific Visualization Studio-k burutako ikerlanean lortutako emaitza. Bertan argi ikus daiteke partikula birtualak aurrez aipatutako konbergentzia-guneetan pilatzen direla.

Espero bezala, partikulak Ekman garraioaren ondorioz sortutako konbergentzia-guneetan pilatzen dira. Hortaz, Ekman korronteez plastikoen metaketa prozesuan berebiziko garrantzia dutela baieztatu daiteke. Lan honetan Mediterraneo itsasoan plastikoak biltzen dituen horrelako zurrumbilrik dagoen ala ez aztertuko dugu, eta horretarako, eredu lagrangearren oinarritutako simulazioak erabiliko ditugu.

## 1.2 Eredu lagrangearrak

Asko dira ozeanoan zehar korronteei jarraituz higitzen diren elementu bizidun zein bizigabeak, eta askotan garrantzitsua izaten da haien nondik norakoak ezagutzea. Horretarako eredu lagrangearren oinarritutako ikerketak egin daitezke. Hauetan, aztertu beharreko elementuaren higidura fluidoak zehaztutakoa dela suposatzen da. Horrela, abiadura-eremu batean partikula birtualak askatu eta haien jarraipena egiten da. Gainera, abiadura-eremuen bilakaera ezagutuz gero, eredu lagrangearren bidez denbora alderantzizkatu eta partikulen jatorriaren inguruko informazioa ere lor daiteke.

Abiadura-eremuan igorritako partikulen posizioaren inguruko informazioa  $\vec{x}(t)$  *posizio-bektorearen* bidez lortzen da, honek adierazten baitu  $t$  aldiunean partikula zein puntutan dagoen. Horrela, aldiune ezberdinetako posizioak lotuz, partikulak eginiko ibilbidea ezagut daiteke. Honetaz gain, lehenago aipatu dugun bezala, partikularen abiadura puntu horretan fluidoak duen abiadura dela hipotesi bezala hartzen bada, honek zehaztuko du partikularen bidea. Hau jakinik, eredu lagrangearren abiapuntua den adierazpena idatz daiteke:

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{v}(\vec{x}, t) \quad (1.36)$$

non  $\frac{d}{dt}$  eta  $\vec{v}(x, t)$  deribatu totala eta fluidoaren abiadura diren, hurrenez hurren.

### 1.2.1 Partikula lagrangearren ibilbideen integrazioa

Partikula baten ibilbidea lortzeko aldiune desberdinetako posizioak lotu behar dira. Horretarako posizioaren denboraren zeharreko integrazioa egin behar da, ondoko adierazpenean ikus daitekeen bezala.

$$\boxed{\vec{x}(t + \Delta t) = \vec{x}(t) + \int_t^{t+\Delta t} \vec{v}(\vec{x}(\tau), \tau) d\tau} \quad (1.37)$$

Hortaz, integrazio prozesuan zenbait pausu jarraitu behar dira. Lehenengo eta behin, partikularen posizioa ezagutu nahi den hurrengo aldiunea,  $\Delta t$ , zehaztu behar da. Ondoren  $\Delta t$  hau denbora-tarte txikiagotan,  $\delta t$ , banatzen da emaitzaren zehaztasuna handitzeko asmoz. Behin parametro hauek definituta, integrazioa burutzen da. Hainbat dira erabil daitezken integrazio-metodoak eta haietako bat Runge-Kutta 4 (RK4) da.

#### Runge-Kutta integrazio-metodoak

Runge-Kutta metodoak ondoko forma duten hasierako baldintzen problemak ebazteko erabiltzen dira:

$$\frac{dy(t)}{dt} = y'(t) = f(y(t), t) \quad (1.38)$$

$$y(t + h) = y(t) + \int_t^{t+h} f(y(\lambda), \lambda) d\lambda \quad (1.39)$$

Hasierako egoera bat eta haren garapena definitzen duen ekuazio diferentziala (1.38) edukita bukaerako egoera lortzen da metodo hauen bitartez.

Helburua  $y(t_0)$  ezagututa  $y(t_0 + h)$  lortzea da.  $y(t)$  funtzioa ezaguna ez denez haren hurbilketa bat egin behar da eta horretarako modurik sinpleena hurrengoa da (ikusi 1.6a irudia):

1. Ez dakigu  $y(t)$  zein den baina haren malda,  $y'(t)$ , ezaguna da. Beraz,  $y(t)$  funtzioa  $t = t_0$  puntuko malda duen zuzenaren bidez ordezkatzen da.
2. Funtzio berriak  $t = t_0 + h$  puntuan duen balioa  $y(t_0 + h)$ -ren ondoko estimazioa izango da.

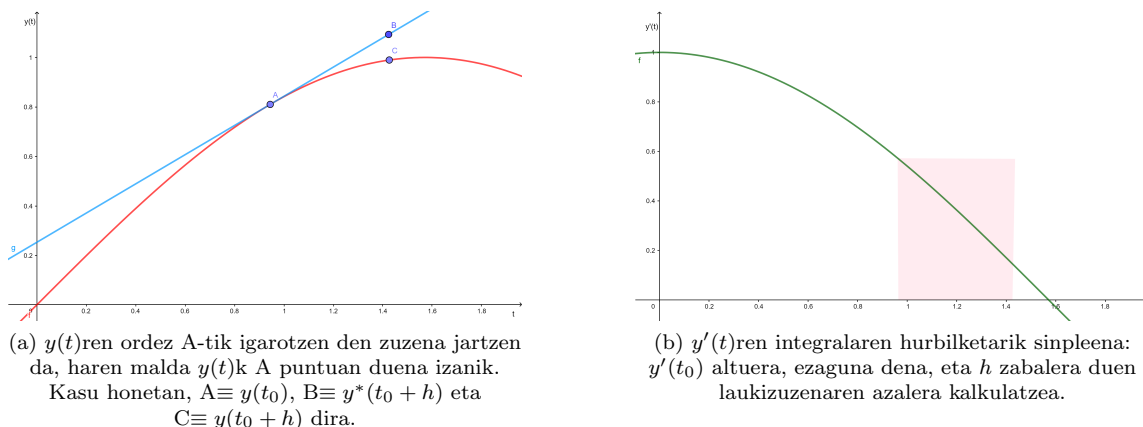
$$y^*(t_0 + h) \sim y(t_0) + f(y(t_0), t_0)h \quad (1.40)$$

non izartxoaren bidez adierazten den estimazio bat dela.

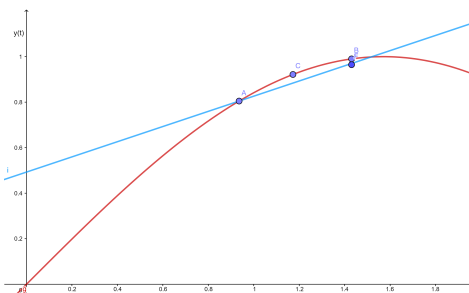
Ohartu orain azaldutako pausoak jarraitzean (1.39) integrala ebazten dela. Izan ere, 1.6b irudian ikus daitekeen bezala,  $y'(t)$  funtzioaren integralaren hurbilketarik sinpleena  $y'(t_0)$  altuera eta h zabalera duen laukizuzenaren azalera kalkulatzea da.

Metodo honi **lehen ordenako Runge-Kutta metodoa** edo **Euler-en metodoa** deitzen zaio. Bere sinpletasunak erabilgarri egiten duen arren emandako pauso bakoitzean errorea metatu eta azkenean ez da zehaztasun handiko emaitzarik lortzen. Soluzio egokiagoak ematen dituzte ordena altuagoko Runge-Kutta metodoek. Metodo guztietan  $y(t)$  funtzioa zuzen batekin ordezkatzen da, baina bakoitzean zuzenaren malda aldatu egiten da. Bigarren ordenako Runge-Kutta metodoan, adibidez, ordezko zuzenaren malda  $t_0$  puntuari dagokiona izan ordez  $t_0$  eta  $t_0 + h$  tarteko erdiko puntuari dagokiona izango da (ikusi 1.7 irudia).

Argi dago, beraz, ordezko funtzioari hasierako puntuko malda esleitu ordez erdiko puntuko malda esleitzen badiogu zehaztasuna nabarmen handitzen dela. Zehaztasuna are gehiago handitzen da



Irudia 1.6: Runge-Kutta integrazio metodoaren oinarriaren adierazpen grafikoa. a eta b irudietan adierazitako metodoak guztiz baliokideak dira.



Irudia 1.7: Runge-Kutta 2 metodoaren adierazpen grafikoa. A ( $t_0$ ) puntutik igarotzen den zuzenaren malda C puntuan ( $y(t_0)$  eta  $y(t_0 + h)$  arteko erdiko puntuan)  $y(t)$ k duena izango da. Kasu honetan,  $B \equiv y(t_0 + h)$  eta  $F \equiv y^*(t_0 + h)$  dira.

tarteko puntu bakarra erabili ordez hainbat puntu erabiltzen badira. Metodoric erabilienetako bat Runge-Kutta 4 da non lau malda ezberdin erabiltzen diren hurbilketa egiteko. Kasu honetan horrela geratzen da (1.39) integraleko urrats bakoitza:

$$y(t_0 + h) = y(t_0) + \frac{k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4}{6} h \quad (1.41)$$

non malden adierazpenak ondokoak diren:

$$\begin{aligned} k_1 &= f(y(t_0), t_0) \\ k_2 &= f\left(y(t_0) + k_1 \frac{h}{2}, t_0 + \frac{h}{2}\right) \\ k_3 &= f\left(y(t_0) + k_2 \frac{h}{2}, t_0 + \frac{h}{2}\right) \\ k_4 &= f(y(t_0) + k_3 h, t_0 + h) \end{aligned}$$

## 1.2.2 Ibilbide estokastikoen integrazioa

Fluidoetan murgildutako partikulen garraioan bi prozesu nagusik hartzen dute parte: adbezioak eta difusioak. Partikulak fluidoaren jarioak zehaztu bezala higitzen direnean adbezioa dugu. Difu-

sio bidez mugitzen badira, aldiz, fluidoaren barneko ausazko higiduren araberakoa izango da haien ibilbidea.

Orain arte eginiko azterketan adbezio bidezko garraioa besterik ez dugu hartu kontuan. Horregatik aurreko atalean partikulen ibilbidea jarraitzeko (1.37) adierazpena erabili dugu. Azterketan difusioaren eraginak ere sartzeko, Wiener prozesuak erabiltzen dira eta (1.37) adierazpenari *ebatzi gabeko fisika* ordezkatzeko duen gairen bat gehitzen zaio. Gai honi *zarata estokastiko* deitzen zaio eta ausazkoa izaten da. Horregatik integrazioa egitean ez da beti emaitza berdina lortzen, eta ondorioz, puntu berean dauden bi partikularen hurrengo aldiuneko posizioa ez da berdina izango orokorrean.

Difusioaren eragina kontuan hartzeko, beraz, ekuazio diferentzial estokastikoak erabiltzen dira. Ekuazio hauek lortzeko Markov ereduak zein Fokker-Planck ekuazioa erabil daitezke, besteak beste.

### Ibilbide estokastikoak Markov ereduaren bidez

Markov ereduak ausazko aldaketak jasaten dituzten sistemak modelizatzeko erabiltzen dira. Haien propietate nagusia da etorkizuneko egoerak momentuko egoeraren araberakoa soilik direla, hau da, etorkizuna aurrezateko ez dela lehenagoko informaziorik behar [22]. Kasu honetan helburua estatistikak (behaketetatik edo simulazio zehatzagoetatik lortuak) betetzen dituzten ekuazio diferentzial estokastikoak lortzea da. Horretarako posizioari (0. ordenako Markov eredu), abiadurari (1. ordenako Markov eredu) zein azelerazioari (2. ordenako Markov eredu) zuzenketa gaia gehitzen zaio.

Gehien erabiltzen den eredu lagrangearteko bat ondoko zero ordenako Markov eredu da [21].

$$x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + \int_t^{t+\Delta t} v_i d\tau + R\sqrt{2K_i\Delta t} \quad (1.43)$$

non  $x_i$  eta  $v_i$  posizio bektorearen eta abiadura euleriarraren  $i$ . osagaiak diren, hurrenez hurren. Gainera,  $K_i$  difusibitate tentsorearen gai diagonalak dira. Azkenik,  $R = N(0, 1)$  batezbestekoa 0 eta bariantza 1 dituen distribuzio normal batetik hartutako ausazko zenbakia da.

Eredu honen arazo nagusia da partikulak difusibitate txikiko guneetan pilatzen direla. Honi aurre egiteko jito gai bat gehi dakiok. Honen bidez difusibitatearen ez-homogeneotasun espazialak hartzen dira kontuan. Gai hau nolakoa den jakiteko Fokker-Planck ekuazioa erabiltzen da.

### Ibilbide estokastikoak Fokker-Planck ekuazioaren bidez

Ibilbide orokor bat deskribatzen duen ekuazio diferentzial estokastikoa hurrengo izan daiteke:

$$dx_i(t) = a_i(\vec{x}, t)dt + \sigma_{ik}(\vec{x}, t)dW_k(t) \quad (1.44)$$

$dx_i$  gaia partikularen  $i$  ardatzeko desplazamendua da.  $a_i$ , aldiz, jito determinista deskribatzen duen terminoa da. Bestalde,  $\sigma_{ik}$  difusio tentsorea da. Azkenik,  $dW_k$  ausazko fluktuazioak deskribatzen dituen Wiener prozesua dugu, 0 batezbestekoa eta  $dt$  bariantza dituen aldagai Gaussiarra dena. Beraz, argi dago desplazamenduak adbezioaren ekarpena (determinista) eta difusioarena (ausazkoa) dituela.

Helburua (1.44) ekuazioko  $a_i$  gaiaren itxura zein den jakitea da. Horretarako Fokker-Planck ekuazioa eta adbezio-difusio ekuazioa alderatu behar dira.

- **Fokker-Plank ekuazioa:** Partikularen probabilitate dentsitatearen denboraren garapena zehazten duen ekuazioa da.

$$\boxed{\frac{\partial P}{\partial t} = \partial_i(a_i P) + \partial_{ij}(b_{ij} P) \quad : \quad 2b_{ij} = \sigma_{ik}\sigma_{jk}} \quad (1.45)$$

- **Adbekzio-difusio ekuazioa:** Adbekzio eta difusio prozesuen ondorioz partikulen kontzentrazioa,  $C$ , nola aldatzen den adierazten duen ekuazioa da.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla(\vec{v}C) = \nabla \cdot (J\nabla C) \quad (1.46)$$

non  $J$  garraio-tentsorea eta  $C$  kontzentrazioa diren. Aztertutako fluidoa konprimaezina (1.5) dela suposatuz eta  $\nabla(\vec{v}C) = (\nabla \cdot \vec{v})C + \vec{v} \cdot \nabla C$  propietatea erabiliz:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla C = \nabla \cdot (J\nabla C) \quad (1.47)$$

Garraio-tentsorea tentsore simetriko eta antisimetrikoen batura modura idatziko dugu:

$$J = K + A \quad : \quad K_{ij} = K_{ji} \quad \text{eta} \quad A_{ij} = -A_{ji} \quad (1.48)$$

$K$  tentsore simetrikoak difusioaren inguruko informazioa du gordeta.  $A$ , aldiz, adbekzioari lotuta dago. (1.48) adierazpena (1.47) ekuazioan sartuz eta  $\vec{v}^* = \nabla A$ :

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} + (\vec{v} - \vec{v}^*) \cdot \nabla \right) C = \nabla(K \cdot \nabla C) \quad : \quad \vec{v}^* = \nabla A \quad (1.49)$$

Azkenik,  $\vec{v}^\dagger = \vec{v} - \vec{v}^*$  batezbestekoarekiko abiadura-hondarra definituz:

$$\boxed{\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}^\dagger C) = \nabla(K \cdot \nabla C)} \quad (1.50)$$

Adbekzio-difusio ekuazioari (1.50) Fokker-Planck ekuazioaren (1.45) forma eman behar zaio orain. Horretarako hurrengo erlazioa erabiliko dugu:

$$\partial_i(K_{ij}\partial_j C) = \partial_i[\partial_j(K_{ij}) - C\partial_j K_{ij}]$$

Horrela geratzen da (1.50) ekuazioa:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}^m C) = \partial_{ij}(K_{ij} C) \quad : \quad \vec{v}^m = \vec{v}^\dagger + \nabla \cdot K \quad (1.51)$$

(1.51) eta (1.45) ekuazioak alderatuz:

$$\begin{aligned} b_{ij} &= K_{ij} \\ a_i &= v_i^\dagger + \partial_j K_{ij} \\ P &= C \end{aligned}$$

Adierazpen hauek (1.44) ekuazioan sartuz:

$$dx_i(t) = \left( v_i^\dagger + \frac{\partial K_{ij}}{\partial x_j} \right) (\vec{x}, t) dt + \sigma_{ik}(\vec{x}, t) dW_k(t) \quad (1.53)$$

Eta beraz:

$$\boxed{x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + (v_i^\dagger + \partial_j K_{ij})\Delta t + \sigma_{ik}(\vec{x}, t)\Delta W_k(t)} \quad (1.54)$$

Beraz, ibilbideak kalkulatzeko adierazpen hau erabiliz gero, (1.37) ekuazioa erabiltzean kontuan hartzen ez diren bi faktore sartzen dira azterketan: difusio prozesuen ondoriozko ausazko mugimenduak ( $\Delta W_k(t)$ ) eta difusibitatearen homogeneotasun eza ( $\partial_j K_{ij}$ ), bereziki fluxuaren anisotropiak. Ekuazio honetako Wiener prozesuaren forma ez dago zehaztuta eta (1.43) adierazpenean erabilitakoa izan daiteke.

### 1.3 OceanParcels

OceanParcels (Probably A Really Computationally Efficient Lagrangian Simulator) da lan honetan plastikozko partikulen ibilbideak kalkulatzeko erabili dugun tresna, gero eta ikerketa lantalde gehiagok itsasoko hondakinak aztertzeke erabiltzen dutena [15, 26, 27]. Python lengoiaian idatzitako *toolbox* bat da eta ozeanoetako partikulen ibilbideak simulatzeko aukera ematen du [28]. Simulazioak ezaugarri ezberdinak izan ditzake eta erabiltzaileak askatasuna du hauek aukeratzeko orduan. Adibidez, partikula aktibo edo pasiboak (ura, planktona, plastikoa...) jarraitu, azterketa bi edo hiru dimentsiotan egin edo difusioa deskribatzen duten gai estokastikoak sartu ala ez erabaki dezake.

Bestalde, azpimarratu behar da OceanParcelsek ez dituela higidura geofisikoaren (1.23), (1.24), (1.25) eta (1.5) ekuazioak ebazten. Bere betebeharra integrazio lagrangearra burutzea da eta horretarako behar diren korronteen inguruko informazioa erabiltzaileak eman behar dio. Hau jakinik, adbezkioa soilik hartzen bada kontuan (1.37) integrala ebazten da Runge-Kutta4, Runge-Kutta4/5 edo Euler metodoak erabiliz. Difusioa aztertu nahi izatekotan, aldiz, (1.43) ekuazioa da ebazten duena. Lan honetan partikulen adbezkioa bakarrik ikertu dugu RK4 metodoa erabiliz gure ahalmen konputazioanala oso mugatua izan baita.

Azkenik, partikulen jarraipena egiterako orduan erraztasun handiak eman dizkigun arren (abiadura eremuak sartzerakoan edo partikula multzoak manipulatzekoan, adibidez), bukaerako emaitzak irudikatzeke eskaintzen duen formatua ez da gure beharretara egokitzen, ez baitu hauek nahi bezain argi adierazten uzten. Horregatik, grafikoak egiteke Panoply, Matplotlib eta GMT (Generic Mapping Tools) programak erabili behar izan ditugu.



# Kapitulua 2

## Datuak

Simulazioak martxan jartzeko beharrezkoa da OceanParcelsen bidez diseinatutako programari korronteen eta isurketen datuak pasatzea. Lehenengoen bidez partikulak higituko diren eremua definitzen da eta bigarrenek isurpenak nondik eta nola egin zehazten dute. Atal honetan erabilitako datuak zeintzuk izan diren eta nola eskuratu ditugun azalduko dugu.

### 2.1 Korrontek

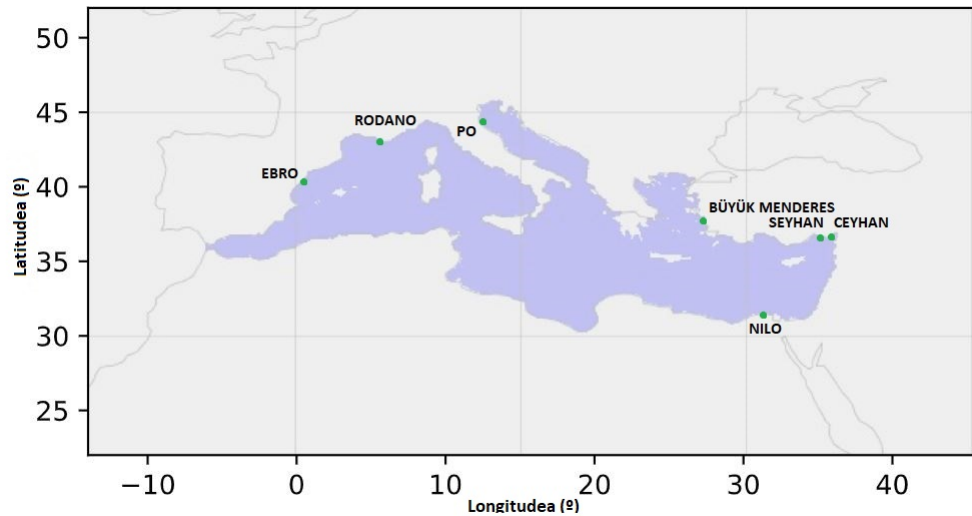
Korronteen abiadura eremua zehazteko Copernicusek (Europar Batasuneko Lurraren behaketa programa) eskaintako MEDSEA\_REANALYSIS\_PHY\_006\_004 produktua erabili dugu [29]. Honek Mediterraneo itsasoko egoera fisikoa aztertzeako datuak eskaintzen ditu NetCDF (Network Common Data Form) fitxategietan gordeta. Horrelako fitxategiak matrize-motako datuak era eraginkor eta errazean gordetzeko prestatuta daude, eta horregatik, erabilera handia dute ingurumenaren alorrean [30].

Eskuragarri dauden aldagaien artean (tenperatura, gazitasuna...) erabiliko ditugunak abiadura horizontalaren bi osagaiak eta itsasoaren gainazalaren altuera izango dira. Datu-sorta hauen erresoluzio espaziala  $1/16^\circ \times 1/16^\circ$ koa ( $\sim 6.5km \times 6.5km$ ) da. Gainera, 72 maila desberdinetako abiadurak ematen dira, 5500m-ko sakoneratik hasi eta gainazalera heldu arte. Hala ere, azterketa honetan gainazaleko abiadura besterik ez da erabili helburua flotatzen duten partikulen higadura aztertzea delako. 1987/01/01 eta 2017/12/31 arteko eguneroko datuak daude eskuragarri baina lan honetan 2005/01/01 eta 2011/01/01 urteak soilik sartu dira. Azkenik, aipatu beharra dago Mediterraneo itsasoko datuak izan arren ozeano Atlantikora apur bat zabaltzen direla Gibraltargo itsasartean gertatzen den Mediterraneoaren eta Atlantikoaren arteko ur fluxuak hobeto modelizatu ahal izateko.

Datu-sorta hauek NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean) eredu hidrodinamikoaren bidez lortu dira [31]. Eredu hau ECMWFk (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) eskaintako eremu atmosferikoen bidez bultzatu da goiko gainazalean, azken hauen erresoluzio horizontala 6-h,  $0.75^\circ$  izanik [32]. Numerikoki lortutako emaitzak hobetzeko hauek behaketekin alderatzen dira. Kasu honetan OceanVAR sistema erabili da behaketen asimilazioa egiteko [33]. Bertan sateliteen bidez lortutako itsas mailaren anomaliak eta tenperatura eta gazitasunaren profil bertikalak daude.

## 2.2 Isurpenak

Lehenengo kapituluan azaldu bezala, lan honetan ibaietatik isuritako plastikozko hondakinen jarrailpena egin dugu. Ibai bakoitzaren igorpena zehazteko Svitlana Lyubartseva et al. lantaldeak 2018an argitaratutako artikuluko datuak erabili ditugu. Bertan Mediterraneo itsasora urtean 100.000 tona inguru plastiko heltzen direla kontsideratzen da. Gainera, hondakinen jatorria hiriak, ibaiak eta itsasontziak izan daitezkeela hartzen da kontuan, ekarpenak %50, %40 eta %30 izanik, hurrenez hurren. Proporzioen banaketa honen bidez adierazten da Mediterraneoeko biztanleria dentsitatea altua dela eta bertan itsasoratzen diren ibaiak ez direla ikaragarri.



Irudia 2.1: Azterketan kontuan hartu diren zazpi ibaien kokapena.

Azterketa honetan zazpi ibai hartu ditugu kontuan: Nilo, Ceyhan, Seyhan, Büyük Menderes, Rodano, Po eta Ebro (ikus 2.1 irudia). Lehenengo seien datuak aipatutako artikulutik hartu ditugu zuzenean. Ebrori dagozkion datuak eskuragarri ez daudenez, estimazio bat egin behar izan dugu. Frantzia, Italia eta Espainiaren garapen eta egoera ekonomikoa antzekoak direla suposatuz Rodano, Po eta Ebroren kutsadura mailak parekoak direla kontsideratu dugu. Gainera, ibai bakoitzaren ekarpena fluxuaren arabera dela ere hartu dugu kontuan. Horrela, ondokoak dira erabilitako isurpen datuak:

Ibaia	Masa totalaren %	Tonak urteko	Tonak eguneko	Partikulak eguneko
Nilo	6.8	6800	19	114
Ceyhan	5.1	5100	14	84
Seyhan	3.5	3500	10	60
Büyük Menderes	2.4	2400	7	42
Rodano	1.5	1500	4	24
Po	1.4	1400	4	24
Ebro*	0.5	520	1	6

Taula 2.1: Ibai bakoitzeko plastikoen isurpen datuak. Ebroren datuak artikuluan eskuragarri ez daudenez estimazio bat egin behar izan dugu.

Exekutazio denbora gehiegizkoa izan ez dadin ahalmen konputazionala errespetatzen duen partikula/masa erlazioa zehaztu dugu. Alde batetik, partikula kopuru maximoa 30.000 inguruan kokatu dugu. Bestalde, igorpena hiru hilabetetan zehar egunero errepikatuz lortzen den banaketa emaitza egokiak lortzeko nahikoa dela kontsideratu dugu. Bi baldintza hauek kontuan hartuta 6 partikula/tona erlazioa lortu dugu.

Azkenik, azpimarratu behar da erabilitako datuak adierazgarriak diren arren estimazio bat baino ez direla. Izan ere, hauek kalkulatzeko orduan hainbat hipotesi egin behar izan dira, eta gainera, kalkuluak egiterako orduan erabilitako datuen ziurgabetasuna nahiko handia da igorpenen inguruan dagoen informazio faltaren ondorioz.

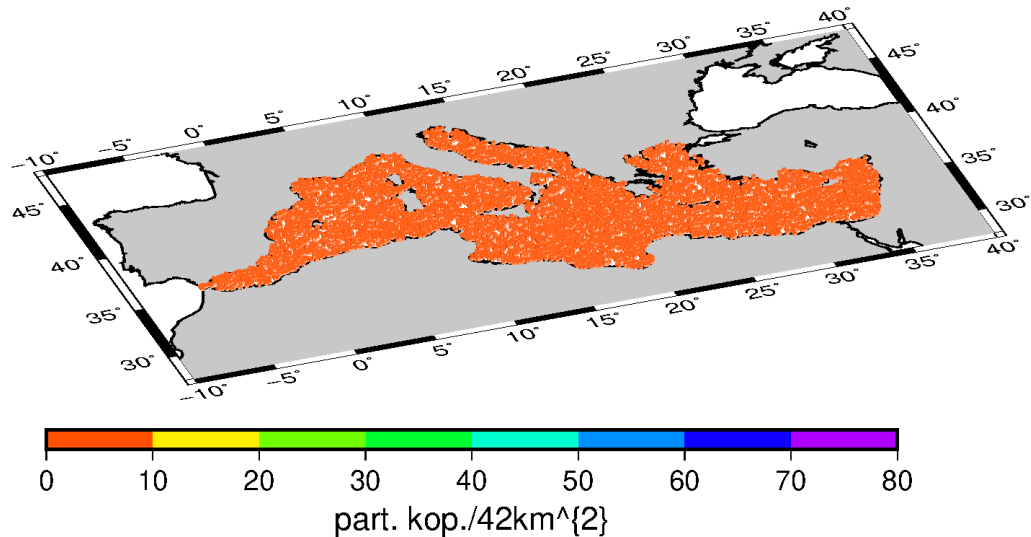
## Kapitulua 3

# Emaitzak eta eztabaida

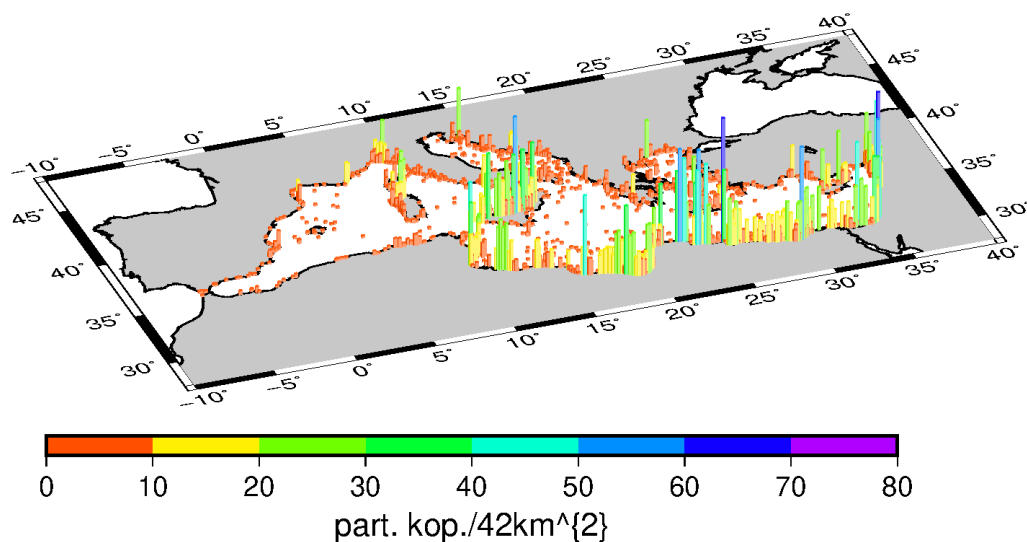
Azken atal honetan lanean aztertutako hiru estimazio ezberdinak eta bakoitzean lortutako emaitzak aurkeztuko dira. Lehenengo teorikoa da eta haren bidez plastikoak Mediterraneo itsasoan duen jokaera ulertzea da helburua. Bigarrenak, aldiz, gaur egungo egoera deskribatzen du. Azkenik, etorkizuneko egoera hipotetiko baten azterketa ere egin da. Lortutako emaitzei azalpena emateko analizatutako urteetako korronteen batezbestekoa erabiliko da.

### 3.1 Banaketa homogenea

Lehenengo eta behin banaketa homogeen baten garapena aztertu da. 10000 partikula banatu dira ausaz Mediterraneo itsasoan zehar. Helburua itsasoko puntu ezberdinetatik abiatzen diren plastikozko hondakinen joera ezagutzea da. Horretarako partikulen jarraipena egin da sei urtean zehar. 3.1 eta 3.2 irudietan hasierako eta bukaerako egoera ageri dira, hurrenez hurren.



Irudia 3.1: Ausazko banaketa homogenea: hasierako egoera (2005/01/01)



Irudia 3.2: Ausazko banaketa homogeneoa: bukaerako egoera (2011/01/01)

Bukaerako egoerari begiratu azkar bat ematea nahikoa da partikula gehienen helmuga kostala dela ohartzeko. Gainera, partikulek hego-ekialderantz joateko joera nabarmena dutela ere ikus daiteke bertan. Horrela, badirudi Mediterraneo itsasoan ez dagoela hondakinak metatzen diren konbergentzia-gune egonkorrik, Ozeano Atlantikoan edo Borean ez bezala [34, 35, 36].

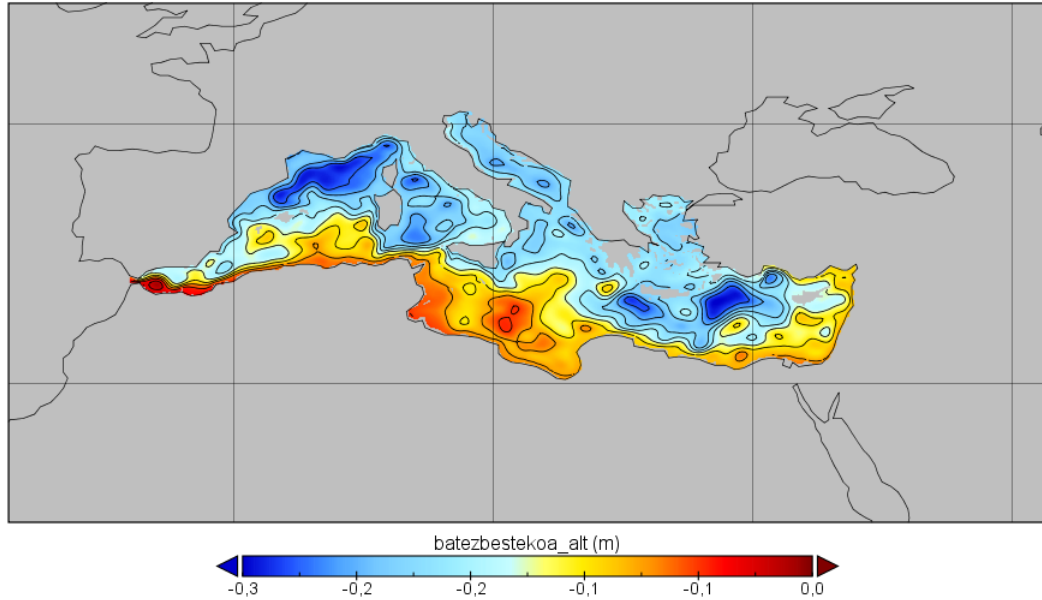
Emaitza honi azalpen bat emateko Mediterraneo itsasoko korronteen azterketa egin behar da. Hasiere batean pentsa daiteke horretarako modurik onena simulazioak aurrera eramateko erabilitako abiadura eremu guztien batezbestekoa egitea dela. Izan ere, honek Mediterraneo itsasoko korronteen ikuspegi orokor bat izatea ahalbidetzen du. Arazoa da horrela lortutako grafikoak nahiko konplexuak izaten direla eta haietatik emaitza argiak ateratzea ez dela batere erraza. Beraz, korrontek ikertzeko beste bide bat bilatu behar da.

Alternatiba bat korronte geostrofikoaren analisia egitea da. Lehen kapituluaz azaldu bezala, itsasoko gainazalaren altuera aldaketak presio altu eta baxuko guneak sortzen ditu, eta presio aldaketa honi Lurraren biraketaren eragina gehituz gero korronte geostrofikoak sortzen dira, presio altu eta baxuko guneak inguratuz biratzen dutenak (ikus 1.1 irudia). Hortaz, abiadura eremuen batezbestekoa beharrean gainazalaren altuerarena ikertzen bada, konbergentzia-gune edo zurrumbilo nagusiak antzeman daitezke.

2005/01/01 eta 2011/01/01 bitartean Mediterraneo itsasoaren gainazalaren altueraren batezbestekoa irudikatzean 3.3 grafikoa lortzen da. Ohartu erreferentzia maila batekiko altuera-diferentzia dela adierazten duena. Zehazki, kolore granateak zehazten du erreferentzia eta handik urruntzen diren koloreek gainazalaren altueraren diferentzia zenbatesten dute. Zenbat eta urdinagoa izan, orduan eta altuera baxuagoa izango du gainazalak puntu horretan, eta beraz, presioa ere baxuagoa izango da bertan. Bestalde, gogoratu ipar hemisferioan dagoenez korronte geotrofikoek eskuinaldean utziko dituztela presio altuko guneak.

Hau jakinik 3.3 irudiko presio altuko eta baxuko guneak identifika ditzakegu. Bertan presio baxuko hiru gune (Frantziako hegoaldean bat, Kretako hego-mendebaldean beste bat eta Kreta eta Txipre artean azkena) eta presio altuko gune txiki bat (Sizilia eta Libiaren artean) ageri dira. Hortaz, badirudi Mediterraneoan pilaketa guneak sor daitezkeela. Baina emaitza hau ez dator bat simulazioen bidez lortutakoarekin. Beraz, orain beharrezkoa da bateragarritasun ez honen jatorria aurkitzea.

Gainazalaren batezbesteko altuera



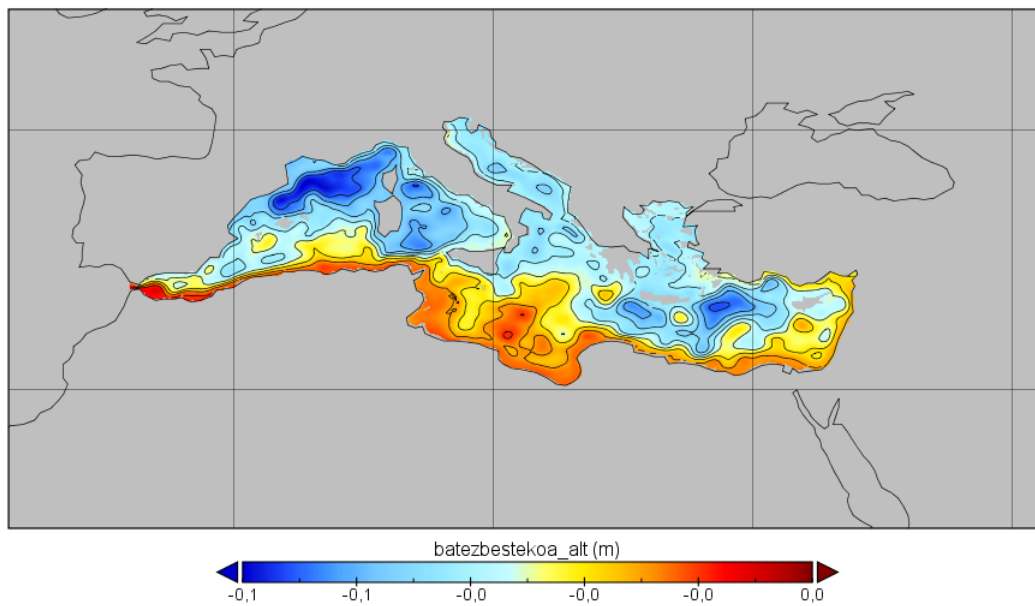
Irudia 3.3: Mediterraneo itsasoko gainazalaren urte osoko batezbestekoa, sei urtean zehar.

Plastikozko partikulen pilaketa guneak sortzeko beharrezko baldintza da korrante geostrofikoen zurrumbilo egonkorrak izatea [34, 37]. Honek esan nahi du Mediterraneoan konbergentzia-gune iraunkorrak egon daitezzen 3.3 irudian ageri diren presio altu eta baxuko guneak urte guztian zehar mantendu behar direla. Hori horrela den ikusteko neguko eta udako altueraren batezbestekoak kalkulatu behar dira. Ozeanografian neguko hilabeteak urtarrila, otsaila eta martxoa direla kontsideratzen da eta udakoak, aldiz, uztaila, abuztua eta iraila dira.

Sei urteetako gainazalaren altueraren neguko eta udako batezbestekoak 3.4 eta 3.5 irudietan ageri dira, hurrenez hurren. Frantzia hegoaldeko presio baxuko guneari dagokionez, neguan udan baino nabarmen zabalagoa da. Presio baxuko beste bi guneak, aldiz, handiagoak dira udako hilabeteetan. Azkenik, aurreko grafikoan identifikatu dugun presio altuko gunea udan isolatuta dagoen arren neguan zabaldu egiten da. Hortaz, korrante gestrofikoek ez dute urte osoan zehar egonkor mantentzen den zurrumbilorik sortzen itsasoan, eta beraz, ez dago plastikozko partikulak pilatuko diren konbergentzia-gune iraunkorrak sortzeko modurik. Ondorioz, baiezta dezakegu Mediterraneo itsasora heltzen diren plastiko gehienek kostan bukatzen dutela hondoratu ezean.

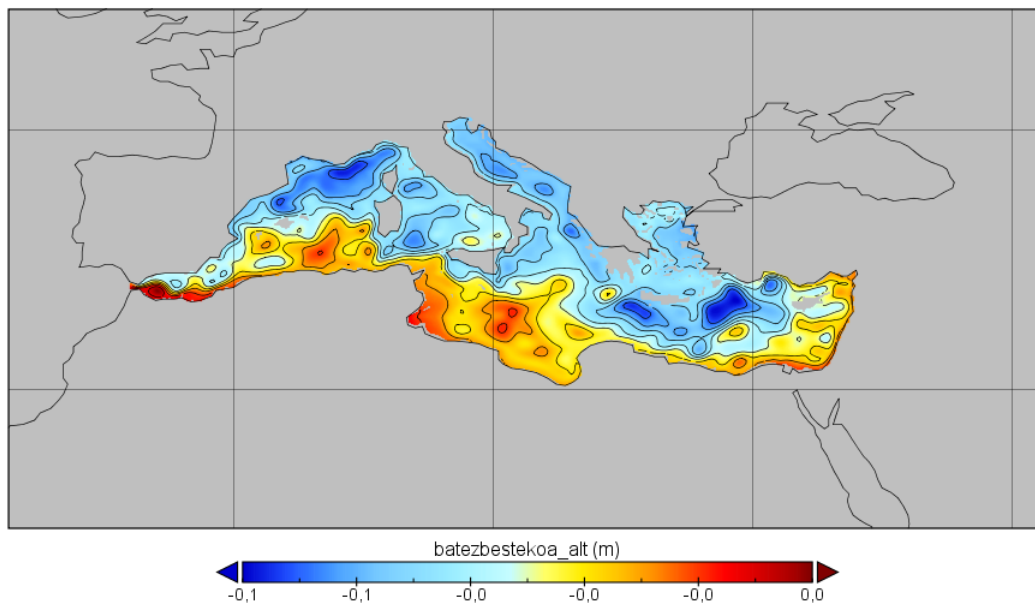
Behin partikulak kostaldera heltzea zentzuzkoa dela ikusita partikulek hego-ekialderantz joateko duten joerari azalpena eman behar zaio. Horretarako ere korrante geostrofikoen analisia egingo dugu. Badirudi partikulak etengabe eskuinalderantz garraiatzen dituen korrante bat egon behar dela. 3.3, 3.4 eta 3.5 irudiak alderatuz gero hiruretan zonalde urdinaren (presio baxua) eta horiaren (presio altua) arteko banaketa antzekoa dela ikus daiteke. Muga horretan zehar korrante geostrofikoen noranzkoa eskuineranzkoa izango da, ipar hemisferioan presio altuko gunea eskuinean geratzen delako beti. Hortaz, Mediterraneo itsasoan urte osoan zehar mantentzen den eskuineranzko korrante bat dago, eta beraz, partikulak gehienbat hego-ekialdeko kostara heltzea arrazoizkoa da.

Gainazalaren batezbesteko altuera neguan



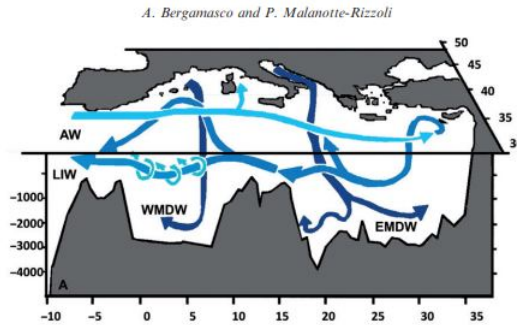
Irudia 3.4: Mediterraneo itsasoko gainazalaren neguko batezbestekoa, sei urtean zehar.

Gainazalaren batezbesteko altuera udan



Irudia 3.5: Mediterraneo itsasoko gainazalaren udako batezbestekoa, sei urtean zehar.

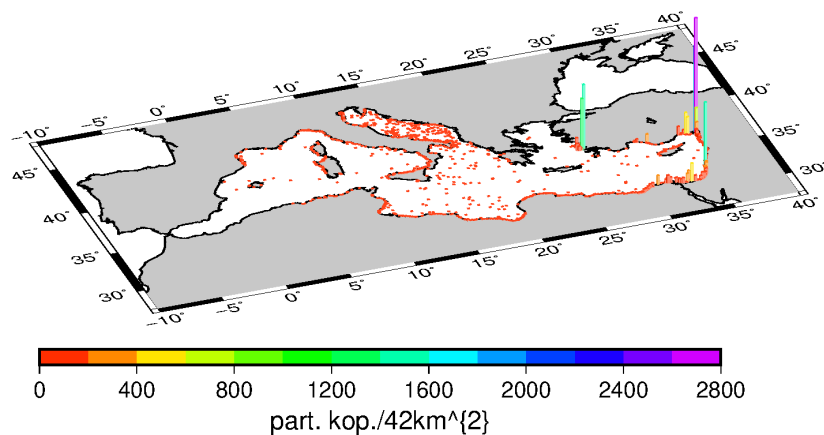
Orain ikusi dugu Mediterraneoeko gainazalean eskuineranzko korrante bat badagoela. Baina, dakigunez, fluxua kontserbatu egin behar da, eta beraz, eskuineranzko korrante bat baldin badago ezkereranzko bat ere egon beharko da. 3.3, 3.4 eta 3.5 irudietan, ordea, ez da horrelako korranterik ageri. Kontua da ezkereranzko korrantea egon badagoela baina sakonekoa dela (ikusi 3.6 irudia), eta gainazalaren batezbesteko altueraren irudietatik gainazaleko korranteak soilik azter daitezkeenez, ezin dela haien bidez identifikatu.



Irudia 3.6: Mediterraneo itsasoko korrante nagusien adierazpen grafikoa. Bertan ikus daiteke nola gainazaleko eskuineranzko fluxua sakoneko ezkereranzkoak konpentsatzen duen. Irudia *The circulation of the Mediterranean Sea: a historical review of experimental investigations* artikulutik aterata dago [38].

### 3.2 Ibaietatik isuritako plastikoa

Behin korranteek partikulak nola garraiatzen dituzten jakinda gaur egungo egoeraren parekoa izan daitekeen simulazioa egin dugu. Bigarren kapituluan emandako isurpen datuak erabiliz partikulak igorri dira Mediterraneo itsasoko ibai kutsatzaileenetatik. Aipatu beharra dago emaitza errealtagoak lortzeko asmoz ibai beretik igorritako partikula guztien hasierako puntua ez dela berdina izan. Abiapuntu ezberdinak lortzeko ibai bakoitzaren bokalearen inguruan zonalde bat aukeratu eta bertako puntuak hartu dira zoriz. Horrela, lortutako emaitzak 3.7 irudian adierazitakoak dira.



Irudia 3.7: Ibaietatik isuritako plastikoa: bukaerako egoera (2011/01/01)

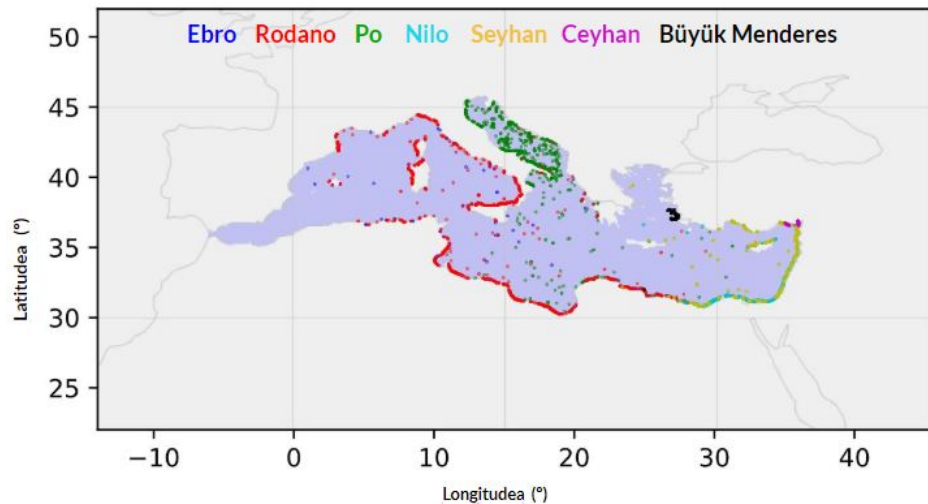


Espero bezala kontinenteetako zein uharteetako kostaldea izan da partikula gehienen helmuga.

Aipatzekoa da, alde batetik, Itsaso Adriatikoan dagoen partikula pilaketa nabarmena dela. Hau ez da harritzekoa, izan ere, nahiko itsaso itxi eta luzanga da eta honek partikulak pilatzeko gune ezin hobe bilakatzen du. Hori bai, plastikoa kostako ia edozein puntutan aurki daitekeen arren, haren kontzentrazioa ez da bereziki handia ( $\sim 1-200$  partikula/ $42km^2$ ). Bestetik, Mediterraneoaren hego-ekialdeko kostaldean plastikoaren kutsadura handia da. Hau ere esperotako emaitza da, aurreko atalean aipatu bezala eskuineranzko korronteak bertara bideratzen baititu hondakin plastikoak.

Honetaz gain, azpimarratu behar da hego-ekialdeko gune horretako lau puntutan partikulen kontzentrazioa bereziki handia dela. Egia da bokaleetatik oso gertu dauden tokiak direla eta horrek eragina izan dezakeela, baina hala ere, arraroa da hain puntu zehatzetan halako partikula kantitatea pilatzea. Honen arrazoia ezezaguna den arren, baliteke abiadura eremuari lotuta egotea. Izan ere, batzuetan zenbait puntutan ez dira zuzenketa egokiak egiten, eta ondorioz, espero ez diren portaerak agertzen dira haietan. Kasu honetan badirudi toki konkretu horietan korronteari ez zaiola abiaduraren osagai normala nulua izateko bete beharreko muga-baldintza aplikatu.

Banaketa homogeenaren azterketa eginda edukita, 3.7 irudiak ez du informazio berri askorik eskaintzen, ibaietatik isuritako partikulek esperotako portaera izan baitute. Hori bai, interesgarria litzateke partikula bakoitzaren jatorria zein den jakitea, honek ibai bakoitzetik igorritako hondakinen garapena ezagutzea ahalbidetuko bailiguke. Horretarako ibai bakoitzetik igorritako partikulei kolore ezberdin bat esleitu diegu, eta lortutako emaitza 3.8 irudian ageri da.



Irudia 3.8: Ibaietatik isuritako plastikoa: bukaerako egoerako partikula bakoitzaren jatorria.

Lehenengo eta behin, azpimarratu behar da 3.8 irudia ez dela egokia puntu bakoitzean dagoen partikula kantitatea zenbateteko, eta honen helburua partikula bakoitzaren jatorriaren inguruko informazioa ematea besterik ez dela.

3.7 irudia aztertzerakoan aipatu dugu Itsaso Adriatikoa pilaketa gune bat dela. Orain honetaz gain baieztatu dezakegu bertako plastikoaren ia %100 Po ibaiak isuritakoa dela (azterketa honetan). Honek esan nahi du itsaso itxia izateak partikulen irteeran eragina izateaz gain sarreran ere baduela. Hori bai, behin bertatik aterata erraz barreiatzen dira itsasoan zehar eta Greziako mendebaldeko, Libiako eta Egiptoko kostalderaino heltzen dira. Gainera, badirudi denborarekin Ekialde Hurbileko

beste herrialdeetako kostan ere buka dezaketela.

Bestalde, oso adierazgarria da Rodano ibaiko kutsaduraren sakabanaketa maila, bertako hondakinak baitira Mediterraneoan zehar gehien zabalduta daudenak. Frantziako kostaldean, Balear uharteak, Korsika, Sardinia, Sizilia eta Italiako mendebaldeko kostan nabarmen kutsatzen ditu. Gainera, Aljeriatik hasi eta Egiptoraino kostako ia puntu guztietan aurki daitezke Rodanotik isuri den partikularen bat. Are gehiago, Itsaso Adriatikokoan eta Greziako mendebaldeko kostan ere aurki daitezke bertako partikulak.

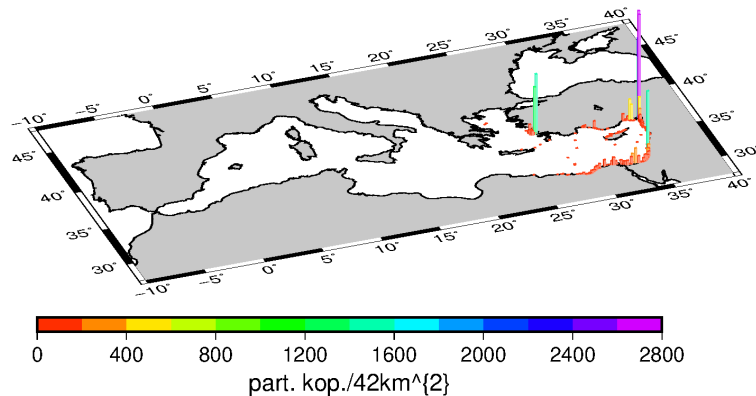
Azkenik, aipatzekoa da, baita ere, Nilo, Ceyhan, Seyhan eta Büyük Menderes ibaietako kutsadura ez dela askorik zabaltzen eta Ekialde Hurbileko kostaldean pilatzen dela batez ere. Honetaz gain, Büyük Menderes eta Ceyhaneko partikulak bokaletik oso gertu geratzen dira beti. Portaera hau haien bokaleen kokapenaren ondorioa da. Lehenengoaren kasuan, uharte asko daude bertatik gertu eta hauek partikulak zabaltzea ekiditen dute. Bigarrenak, aldiz, golko batean du bukaera, eta ondorioz, asko dira bertatik irten ezinik geratzen diren plastikoak.

Hori bai, oso garrantzitsua da zabalkundea eta kontzentrazioa ez nahastea. Hauek plastikoaren kutsaduraren bi aurpegi direla esan daiteke, nolabait. Lehenengoan puntu bakoitzean dagoen kantitatea oso handia ez izan arren, plastikoa leku askotan aurki daiteke. Bigarrenean, aldiz, normalean zonalde *txiki* bati eragiten dio, baina bertako kutsadura maila altuagoa izaten da. Hau da, hain justu, Rodano eta Nilo eta Seyhaneko kutsaduraren arteko aldea. Rodanok beste biek baino askoz ere hondakin gutxiago isurtzen ditu baina askoz ere errazago zabaltzen dira. Baina puntu bakoitzeko kutsadura maila kontuan hartzen baldin badugu, Nilo eta Seyhanek sortutakoa larriagoa da, gune murriztu bati eragiten dion arren.

### 3.3 Eta... Europar Batasunean plastikoa debekatuko balitz?

Gaur egun gero eta zabalduago dago plastikoaren kutsadurak ingurumenean eragin ditzakeen kalteen inguruko kezka. Hala, gero eta gehiago dira hari aurre egiteko burutzen diren ekimenak, horien artean plastikoaren debekua entzutetsuena izanik. Gauzak horrela, zenbait herrialdetan debeku hau gauzatzeak izango lukeen eragina ezagutzea interesgarria da.

Zehazki Europar Batasunean plastikoaren erabilera galarazten duen legea indarrean jartzeak Mediterraneoan kutsadura maila nola aldatuko lukeen aztertu dugu. Horretarako, hasiera batean plastikorik ez duen Mediterraneo itsasora partikulak igorri ditugu Nilo, Seyhan, Ceyhan eta Büyük Menderes ibaietatik soilik. Sei urteren ondoren izango genukeen egoera 3.9 irudian ageri da.



Irudia 3.9: EBekoak ez diren ibaietatik isuritako plastikoa: bukaerako egoera (2011/01/01)

Hasteko, argi dago plastikoaren kutsadura 3.7 egoeran baino askoz ere gune txikiagoan dagoela presente. Gainera, kaltetutako zonaldeak ibai kutsatzaileen bokaleen ingurukoak dira. Hortaz, kasu hipotetiko honetan arazoa ez litzateke kontrolik gabeko barriaketa izango, eremu zehatzetako kutsaduraren kontzentrazio altua baizik. Horrela, Mediterraneoan kaltetutako gune bakarra egongo litzateke: Ekialde Hurbileko kostaldea. Hori bai, bertako ekosistemen aurkako mehatxua oso handia litzateke, aurrez aipatu bezala kutsadura benetan altua delako.

Bukatzeko, 3.7 irudian bezala, hemen ere deigarriak diren lau pilaketa puntu ageri dira. Beraz, arrazoi handiagoz pentsa dezakegu puntu zehatz horietako korronteen portaera anomaloa dela.

**Atala III**

**ONDORIOAK**

Egindako ikerketaren ondorio nagusia da Mediterraneo itsasoan ez dagoela plastikoak pilatzen dituen isolatutako konbergentzia-gunerik, eta ondorioz, hondakin gehienen helmuga kostaldea dela. Emaitza hau bera aurkeztu zuen S. Liubartseva et al. lantaldeak 2018an argitaratutako ikerlanean [16]. Hala, lan honetan burutako azterketa sinpleagoa eta xumeagoa den arren, gorengo mailako ikerketa baten antzeko emaitzak lortu izanak sinesgarritasuna ematen dio egindako lanari. Alde batetik, Mediterraneo itxia, dimentsio txikikoa eta geografia irregularrekoa izanik, ez da harrizkoa bertan mundu mailan aurkitzen diren zurrumbiloen parekorik ez agertzea. Gainera, Mediterraneo itsasoan ez dago latitude ertainetan dauden haize egonkorren parekorik (1.1.3 atala), eta horrek Ekman garraioaren bidez konbergentzia-gune egonkorrek sortzea ekiditen du. Egia da itsasoaren gainazalaren uniformetasun ezaren ondorioz sortutako zenbait zurrumbilo *txiki* antzeman ahal izan ditugula, baina topografia aldakorra dela-eta ez dira plastikoen pilaketa eremu egonkorrek sortzeko gai. Laburbilduz, Mediterraneoaren geografiaren ezaugarriak eta bertako korrante aldakorrek dira konbergentzia-guneen ausentziaren erantzule nagusiak.

Partikulen jatorriaren araberako banaketari dagokionez, ekialderanzko korranteek erabat baldintzatzen dutela esan dezakegu, mendebaldeko partikulak barreiatu eta ekialdekoak bertan mantentzen baitituzte. Horrela, Ekialde Hurbileko herrialdeetan S. Liubartseva et al. lantaldearen 2018ko lanean aipatzen den *boomerang efektua* (kostara heltzen diren hondakinak herrialdetik bertatik botatakoak dira) betetzen dela ikusi ahal izan dugu. Italiako kostaldeko ekialdean ere efektu hau gertatzen dela dirudi, baina beste herrialdeei dagokienez ezin dugu baieztapenik egin. Mendebaldeko herrialdeetako (Espainia, Frantzia, Maroko, Aljeria...) *boomerang efektua* aztertzeke igorpen puntu gehiago beharko genituzke haien inguruan, beste ibairen bat, hiriak edo itsasontziak, adibidez. Hori bai, argi dago ekialdeko hondakinek zailtasun handiak dituztela zabaltzeko, eta beraz, zentzuzkoa da mendebaldeko kostaldeko hondakinak ingurutik isuritakoak izan daitezkeela pentsatzea.

Aipatzekoa da azterketa honek plastikoak Mediterraneo itsasoan duen portaeraren ezaugarri nagusiak ezagutzeko soilik balio duela. Haren bidez hondakinen pilaketa-gune nagusiak zein plastikoaren kutsadurak gehien kaltetutako zonaldeak identifika daitezke. Baina puntu bakoitzeko partikula kontzentrazioaren inguruko informazio zehatzagoa lortzeko, adibidez, partikula gehiago isurtzea komeniko litzateke. Izan ere, horrela 6 partikula/tona erlazioa baino errealistagoa den bat izango genuke. Honetaz gain, lan honetan ez da plastikoa hondoratu edo desagertzeko (animaliaren batek irentsi izanagatik, adibidez) aukera kontuan hartu, eta gainera, partikulak lurretik puntu bat ikutzearan bertan tratatuta gelditzen dira. Zehaztasun handiko datuak lortu nahi izanez gero, portaera hauek guztiak probabilitate funtzioen bidez aztertu beharko lirateke. Halaber, adbezioa soilik ikeru beharrean difusioa ere aztertuko balitz garapenaren ikuspegi errealago bat eskuratuko genuke. Azkenik, esan beharra dago aztertutako hiru kasuetan sei urteko denbora tartea nahikoa izan dela partikulen joera zehazteko. Hori bai, denbora tartea luzatzeak plastikoak distantzia handiagoetan duen eragina ezagutzeko aukera emango luke.

Lan honen beste ondorio garrantzitsu bat da Mediterraneoeko kostaldean plastikoaren kutsadura oso presente dagoela. Ekialde Hurbileko kosta da kalterik larrienak jasaten ari dena, bertan baitaude gehien kutsatzen duten ibaiak eta, lehen aipatu bezala, hondakin horiek ez baitira batere erraz sakabanatzen. Gainera, mendebaldetik datozen partikulak ere heltzen dira bertaraino. Bestalde, Itsaso Adriatikoa ere kutsadura handiko zonaldea dela ondoriozta dezakegu, itsaso itxia denez bertara isuritako partikula gehienak han geratzen baitira. Gainera, turismo askoko gunea denez oso probablea da hara igorritako hondakin plastikoak lan honetan kontuan hartu direnak baino askoz gehiago izatea, eta beraz, lortutako informazioak arriskuaren benetako magnitudea ez islatzea.

Mediterraneo itsasoko plastikoaren kutsadura aztertu ondoren, argi ikusten da beharrezkoa dela haren aurkako neurriak berehala hartzea, plastikoa bertako paisaia idilikoetako protagonista bihurtzea nahi ez badugu behintzat. Alde batetik, jada itsasoan dagoen plastikoa biltzeko Mediterraneo itsasoko ezaugarrietara egokitzen diren proiektuak garatzea ezinbestekoa da, horrela soilik lortuko baita ekosistemak arriskutik ateratzea. Horretarako garrantzitsua da honen moduko ikerketak egitea, hauek ematen baitute pilaketa guneen ezaugarrien inguruko informazioa. Lan hau egin da, adibidez, ondoriozta daiteke Ozeano Barean erabiltzen ari diren metodoak ez direla egokiak Mediterraneo zaborra biltzeko. Izan ere, lehenengoan ozeanoko gune isolatu batean egin behar da lana, eta bigarrenean, aldiz, kostalde osoan zehar. Bestalde, plastikoa itsasoratzea ekiditeko, inolako kontrolik gabe naturan barreiatzen den zabor kantitatea murriztu behar da. Hori lortzeko, hondakinen administrazio-sistema eta azpiegiturak hobetzearen aldeko apustua egin beharko litzateke herrialde garatu zein azpigaratuetan. Baina plastikoaren kontsumoa murriztea izango litzateke neurrikerik eraginkorrenetako bat. Horretarako erabilera bakarreko plastikozko produktuen ekoizpena mugatzeak eta objektuen berrerabilpena sustatzeak berebiziko garrantzia du. Azken hau gure esku ere badago, eta aldaketak txikitik hasten direnez, egin dezagun guztiok ingurumenaren aldeko keinutxo bat, ahal den neurrian plastikoaren erabilerari uko eginez.

# Bibliografía

- [1] Laura Parker (National Geographic). *Contaminación por plástico*. June 2018.
- [2] Chelsea M Rochman et al. “Policy: Classify plastic waste as hazardous”. In: *Nature* 494 (Feb. 2013), pages 169–71. DOI: 10.1038/494169a.
- [3] Roland Geyer, Jenna Jambeck, and Kara Law. “Production, use, and fate of all plastics ever made”. In: *Science Advances* 3 (July 2017), e1700782. DOI: 10.1126/sciadv.1700782.
- [4] Ilka Peeken et al. “Arctic sea ice is an important temporal sink and means of transport for microplastic”. In: *Nature Communications* 9 (Apr. 2018). DOI: 10.1038/s41467-018-03825-5.
- [5] Alan J. Jamieson et al. “Microplastics and synthetic particles ingested by deep-sea amphipods in six of the deepest marine ecosystems on Earth”. In: *Royal Society Open Science* 6 (Feb. 2019), page 180667. DOI: 10.1098/rsos.180667.
- [6] Jenna Jambeck et al. “Marine pollution. Plastic waste inputs from land into the ocean”. In: *Science (New York, N.Y.)* 347 (Feb. 2015), pages 768–771. DOI: 10.1126/science.1260352.
- [7] W.C. LI, H.F. TSE, and Lincoln Fok. “Plastic waste in the marine environment: A review of sources, occurrence and effects”. In: *Science of The Total Environment* 566-567 (Oct. 2016), pages 333–349. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.05.084.
- [8] Laurent Lebreton et al. “River plastic emissions to the world’s oceans”. In: *Nature Communications* 8 (June 2017). DOI: 10.1038/ncomms15611.
- [9] Sarah Nelms et al. “Investigating microplastic trophic transfer in marine top predators \*”. In: *Environmental Pollution* 238 (Feb. 2018). DOI: 10.1016/j.envpol.2018.02.016.
- [10] National Institute of Environmental Health Sciences NIH-HHS. *Bisphenol A (BPA)*. Jan. 2010. URL: <https://www.niehs.nih.gov/health/topics/agents/sya-bpa/index.cfm>.
- [11] John Meeker, Sheela Sathyanarayana, and Shanna Swan. “Phthalates and other additives in plastics: Human exposure and associated health outcomes”. In: *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences* 364 (Aug. 2009), pages 2097–113. DOI: 10.1098/rstb.2008.0268.
- [12] Mary Kosuth, Sherri A. Mason, and Elizabeth V. Wattenberg. “Anthropogenic contamination of tap water, beer, and sea salt”. In: *PLOS ONE* 13 (Apr. 2018), e0194970. DOI: 10.1371/journal.pone.0194970.
- [13] Gerd Liebezeit and Elisabeth Liebezeit. “Non-pollen particulates in honey and sugar”. In: *Food additives & contaminants. Part A, Chemistry, analysis, control, exposure & risk assessment* 30 (Oct. 2013). DOI: 10.1080/19440049.2013.843025.
- [14] Laurent Lebreton, S Greer, and Jose Borrero. “Numerical modelling of floating debris in the world’s oceans”. In: *Marine pollution bulletin* 64 (Mar. 2012), pages 653–61. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2011.10.027.

- [15] Victor Onink et al. “The role of Ekman currents, geostrophy and Stokes drift in the accumulation of floating microplastic”. In: *Journal of Geophysical Research: Oceans* (Feb. 2019). DOI: 10.1029/2018JC014547.
- [16] Svitlana Lyubartseva et al. “Tracking plastics in the Mediterranean: 2D Lagrangian model”. In: *Marine Pollution Bulletin* 129 (Feb. 2018), pages 151–162. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2018.02.019.
- [17] Giuseppe Suaria et al. “The Mediterranean Plastic Soup: Synthetic polymers in Mediterranean surface waters”. In: *Scientific Reports* 6 (Nov. 2016), page 37551. DOI: 10.1038/srep37551.
- [18] Carlo Bianchi and Carla Morri. “Marine Biodiversity of the Mediterranean Sea: Situation, Problems and Prospects for Future Research”. In: *Marine Pollution Bulletin - MAR POLLUT BULL* 40 (May 2000), pages 367–376. DOI: 10.1016/S0025-326X(00)00027-8.
- [19] Robert H. Stewart. *Introduction To Physical Oceanography*. Sept. 2008, pages 133–155.
- [20] Jean-Marie Beckers Benoit Cushman-Roisin. *Introduction to geophysical fluid dynamics*. June 2007, pages 185–248.
- [21] Paolo Monti and Giovanni Leuzzi. “Lagrangian models of dispersion in marine environment”. In: *Environmental Fluid Mechanics* 10 (Dec. 2010), pages 637–656. DOI: 10.1007/s10652-010-9184-x.
- [22] Erik Sebille et al. “Lagrangian ocean analysis: Fundamentals and practices”. In: *Ocean Modelling* 121 (Jan. 2018), pages 49–75. DOI: 10.1016/j.ocemod.2017.11.008.
- [23] Pijush K.Kundu and Ira M.Cohen. *Fluid Mechanics*. Elsevier Science, 1990.
- [24] Robert Talmazin. *Elements of Dynamic Oceanography*. Chapman & Hall, London, UK, 1985, page 181. DOI: 10.1007/978-94-009-4856-3.
- [25] NASA’s Scientific Visualization Studio. *Garbage Patch Visualization Experiment*. Aug. 2015. URL: <https://svs.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/details.cgi?aid=4174>.
- [26] Ana Lacerda et al. “Plastics in sea surface waters around the Antarctic Peninsula”. In: *Scientific Reports* 9 (Mar. 2019). DOI: 10.1038/s41598-019-40311-4.
- [27] Mirjam Van der Mheen, Charitha Pattiaratchi, and Erik Sebille. “Role of Indian Ocean Dynamics on Accumulation of Buoyant Debris”. In: *Journal of Geophysical Research: Oceans* (Mar. 2019). DOI: 10.1029/2018JC014806.
- [28] Michael Lange and Erik Sebille. “Parcels v0.9: prototyping a Lagrangian Ocean Analysis framework for the petascale age”. In: *Geoscientific Model Development Discussions* (July 2017). DOI: 10.5194/gmd-2017-167.
- [29] S. Simoncelli et al. “Mediterranean Sea physical reanalysis (MEDREA 1987-2015)”. In: *Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS)* (2014). DOI: 10.25423/MEDSEA\_REANALYSIS\_PHYS\_006\_004.
- [30] Russ Rew et al. *Unidata NetCDF*. en. 1989. DOI: 10.5065/d6h70cw6. URL: <http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>.
- [31] Madec Gurvan et al. *NEMO ocean engine*. 2017. DOI: 10.5281/zenodo.1464816.
- [32] D Dee et al. “The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system”. In: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 137 (Apr. 2011), pages 553–597. DOI: 10.1002/qj.828.
- [33] Srdjan Dobricic and Pinardi Nadia. “An oceanographic three-dimensional variational dataera assimilation scheme”. In: *Ocean Modelling* 22 (Dec. 2008), pages 89–105. DOI: 10.1016/j.ocemod.2008.01.004.



- [34] Marcus Eriksen et al. “Plastic Pollution in the World’s Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea”. In: *PLoS ONE* 9 (Dec. 2014). DOI: 10.1371/journal.pone.0111913.
- [35] Kara Law et al. “Plastic Accumulation in the North Atlantic Subtropical Gyre”. In: *Science (New York, N.Y.)* 329 (Sept. 2010), pages 1185–8. DOI: 10.1126/science.1192321.
- [36] Elodie Martinez, Keitapu Maamaatuaiahutapu, and Vincent Taillandier. “Floating marine debris surface drift: Convergence and accumulation toward the South Pacific subtropical gyre”. In: *Marine pollution bulletin* 58 (June 2009), pages 1347–55. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2009.04.022.
- [37] Laurent Lebreton, Julia Reisser, and Bruno Sainte-Rose. “Modelling Floating Plastic Origin, Transport And Accumulation In The World’s Ocean”. In: Mar. 2017.
- [38] Andrea Bergamasco and Paola Malanotte-Rizzoli. “The circulation of the Mediterranean Sea: A historical review of experimental investigations”. In: *Advances in Oceanography and Limnology* 1 (June 2010), pages 11–28. DOI: 10.1080/19475721.2010.491656.