Trabajo de Fin de Máster
Estudio de técnicas de visión por computador para la clasificación automática de vídeos de fondos marinos

Federico Maniscalco Martín

Tutores:
Jorge Cabrera Gámez
Modesto F. Castrillón Santana

Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería (IUSIANI)
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

29 de Octubre de 2012

Agradecimientos

Quisiera agradecer en primer lugar a mis tutores Jorge Cabrera Gámez y Modesto F. Castrillón Santana, que han sido muy pacientes y sumamente atentos, y por haber estado disponibles para ayudarme en todo momento.

Agradezco también a mi familia, dentro de la que incluyo también a Margarita M. Bilbao Martín y su familia, por haberme ayudado tanto, a los que dedico este trabajo.

Me gustaría incluir también un agradecimiento a mis amigos, por las grandes experiencias que han compartido conmigo.

Gracias a Fernando Tuya, Óscar Bergasa y Francisco Vila por su colaboración mediante la aportación de vídeos y su valoración experta.

En general gracias a todo el que ha aportado su granito de arena.

Muchas gracias a todos.

Índice

1. RESUMEN **12**

2. INTRODUCCIÓN **13**

3. ESTADO DEL ARTE **20**

4. REQUISITOS **26**

4.1. Requisitos hardware 26

4.2. Requisitos software 26

4.3. Otras herramientas utilizadas 27

5. ANÁLISIS **28**

5.1. Fundamentos Teóricos 29

5.1.1. Operador Sobel 29

5.1.2. Operador Scharr 32

5.1.3. Operador Laplaciano 33

5.1.4. Filtro de mediana 35

5.1.5. Local Binary Patterns 36

5.2. OpenCV 38

5.3. MATLAB 39

6. DESARROLLO **40**

6.1. Diseño 40

6.2. Implementación 41

7. RESULTADOS **44**

7.1. Detección de bordes 44

7.2. Tamaño de bordes 58

7.3. Etiquetado del vídeo 62

7.4. Estadísticos 89

7.5. Experimentos 96

8. CONCLUSIONES **104**

9. PROPUESTAS FUTURAS **105**

Apéndices **106**

A. INSTALACIÓN DE OPENCV **107**

Índice de figuras

1. Aspecto de una fanerógama marina. (Gentileza de Dr. Fernando Tuya) 14

2. Aspecto de los dos tipos estructurales más importantes de las praderas de *Cymodocea nodosa* en las islas Canarias. Izq. Praderas. Der. Parches o manchones. (Gentileza de Dr. Fernando Tuya) 16

3. *Caulerpal* y *Caulerpa prolifera*. (Gentileza de Dr. Fernando Tuya) 17

4. Funciones ecólogicas de los sebadales. (Gentileza de Dr. Fernando Tuya) 18

5. Pradera Extensa 24

6. Pradera Escasa 24

7. Arena 25

8. Izquierda: cámara de vídeo *MARISCOPE*. Derecha: monitor de televisión, *GEOSTAMP*, *GPS Garmin 12* y fuente de alimentación de la cámara. (Gentileza de Dr. Fernando Tuya) . . 28

9. Imagen original en escala de grises. 32

10. Cálculo del gradiente X con el *operador Sobel*. 32

11. Cálculo del gradiente Y con el *operador Sobel*. 33

12. Imagen resultante del gradiente calculado por el *operador Sobel* sobre la imagen original. 33

13. Primera derivada de la intensidad de los píxeles en la zona del borde. 34

14. Segunda derivada de la intensidad de los píxeles en la zona del borde. 34

15. Cómo calcular el código LBP original y una medida de contraste. 37

16. LBP en el campo de los operadores de análisis de texturas. . . 38

17. Esquema del sistema. 41

18. Arriba: Imagen Original. Abajo: Detección de bordes. (Sobel) 44

19. Arriba: Imagen Original. Abajo: Detección de bordes. (Sobel) 45

20. Arriba: Imagen Original. Abajo: Detección de bordes. (Sobel) 46

21. Arriba: Imagen Original. Abajo: Detección de bordes. (Sobel) 47

22. Arriba: Imagen Original. Abajo: Detección de bordes. (Sobel) 48

23. Arriba: Imagen Original. Abajo: Detección de bordes. (Scharr) 49

24. Arriba: Imagen Original. Abajo: Detección de bordes. (Scharr) 50

25. Arriba: Imagen Original. Abajo: Detección de bordes. (Scharr) 51

26. Arriba: Imagen Original. Abajo: Detección de bordes. (Scharr) 52

27. Arriba: Imagen Original. Abajo: Detección de bordes. (Scharr) 53

28. Arriba: Imagen Original. Abajo: Detección de bordes. (Laplace) 54

29. Arriba: Imagen Original. Abajo: Detección de bordes. (Laplace) 55

30. Arriba: Imagen Original. Abajo: Detección de bordes. (Laplace) 56

31. Arriba: Imagen Original. Abajo: Detección de bordes. (Laplace) 57

32. Arriba: Imagen Original. Abajo: Detección de bordes. (Laplace) 58

33. Tamaño de Bordes en Secuencia con Algas. (Sobel) 59

34. Tamaño de Bordes en Secuencia con Arena. (Sobel) 59

35. Tamaño de Bordes en Secuencia con Algas. (Scharr) 60

36. Tamaño de Bordes en Secuencia con Arena. (Scharr) 60

37. Tamaño de Bordes en Secuencia con Algas. (Laplace) 61

38. Tamaño de Bordes en Secuencia con Arena. (Laplace) 61

39. Etiquetado en Secuencia con Pradera Extensa. (Sobel) (1) . . 63

40. Etiquetado en Secuencia con Pradera Extensa. (Sobel) (2) . . 64

41. Etiquetado en Secuencia con Pradera Escasa. (Sobel) (1) . . . 65

42. Etiquetado en Secuencia con Pradera Escasa. (Sobel) (2) . . . 66

43. Etiquetado en Secuencia con Arena. (Sobel) (1) 67

44. Etiquetado en Secuencia con Arena. (Sobel) (2) 68

45. Etiquetado en Secuencia con Corte. (Sobel) (2) 69

46. Etiquetado en Secuencia con Choque. (Sobel) (1) 70

47. Etiquetado en Secuencia con Choque. (Sobel) (2) 71

48. Etiquetado en Secuencia con Pradera Extensa. (Scharr) (1) . . 72

49. Etiquetado en Secuencia con Pradera Extensa. (Scharr) (2) . . 73

50. Etiquetado en Secuencia con Pradera Escasa. (Scharr) (1) . . 74

51. Etiquetado en Secuencia con Pradera Escasa. (Scharr) (2) . . 75

52. Etiquetado en Secuencia con Arena. (Scharr) (1) 76

53. Etiquetado en Secuencia con Arena. (Scharr) (2) 77

54. Etiquetado en Secuencia con Corte. (Scharr) (2) 78

55. Etiquetado en Secuencia con Choque. (Scharr) (1) 79

56. Etiquetado en Secuencia con Choque. (Scharr) (2) 80

57. Etiquetado en Secuencia con Pradera Extensa. (Laplace) (1) . 81

58. Etiquetado en Secuencia con Pradera Extensa. (Laplace) (2) . 82

59. Etiquetado en Secuencia con Pradera Escasa. (Laplace) (1) . . 83

60. Etiquetado en Secuencia con Pradera Escasa. (Laplace) (2) . . 84

61. Etiquetado en Secuencia con Arena. (Laplace) (1) 85

62. Etiquetado en Secuencia con Arena. (Laplace) (2) 86

63. Etiquetado en Secuencia con Corte. (Laplace) (2) 87

64. Etiquetado en Secuencia con Choque. (Laplace) (1) 88

65. Etiquetado en Secuencia con Choque. (Laplace) (2) 89

66. Resultados Algas. (Vídeo 1) 91

67. Resultados Arena. (Vídeo 1) 92

68. Resultados Corte. (Vídeo 1) 92

69. Resultados Choque. (Vídeo 1) 93

70. Resultados Algas. (Vídeo 2) 93

71. Resultados Arena. (Vídeo 2) 94

72. Resultados Corte. (Vídeo 2) 94

73. Resultados Choque. (Vídeo 2) 95

74. Etiquetado en Secuencia con *Cotoniellas*. (1) 97

75. Etiquetado en Secuencia con *Cotoniellas*. (2) 98

76. Etiquetado en Secuencia con *Caulerpas*. (1) 99

77. Etiquetado en Secuencia con *Caulerpas*. (2) 100

78. Etiquetado en Secuencia con *Caulerpas* y *Cotoniellas*. (1) . . . 101

79. Etiquetado en Secuencia con *Caulerpas* y *Cotoniellas*. (2) . . . 102

Indice de tablas

1. Resultados Vídeo 1. 96

2. Resultados Vídeo 2. 96

3. Valoración realizada por expertos. 103

1. RESUMEN

En multitud de estudios en el ámbito de las ciencias marinas es necesario grabar en vídeo los fondos marinos de la zona en estudio. Estas secuencias se visionan después en el laboratorio para clasificar manualmente el tipo de hábitat bentónico y marcar su extensión.

En el transcurso de este trabajo se pretende explorar la robustez con la que se pueden aplicar técnicas automáticas tanto para detectar visualmente cambios entre fondos marinos a partir de estas secuencias de vídeo, como para clasificar algunos de estos fondos. Se pretende explorar este problema para evaluar si, mediante el empleo de técnicas de visión por computador, es posible resolver estas tareas mediante la inspección automática de vídeos.

De tener éxito, podría suponer de gran ayuda en el ámbito de las ciencias marinas, ya que podría simplificar sustancialmente parte del trabajo de algunos estudios y serviría a su vez de ejemplo de transferencia tecnológica en este ámbito.

2. INTRODUCCIÓN

Existen numerosas aplicaciones en el ámbito subacuático donde la clasificación visual de texturas y formas puede tener una gran importancia. Así, tareas de identificación y recuento de ejemplares, de clasificación de suelos o sustratos o de evaluación de hábitats requieren de esta capacidad. En la inmensa mayoría de las ocasiones, estas tareas se realizan en la actualidad mediante técnicas de conteo manual, bien in-situ con buceadores o bien sobre imágenes de vídeos, con elevado coste en términos de tiempo, capacidad de muestreo y mano de obra.

En este Trabajo de Fin de Máster se aborda el problema de la clasificación automática de fondos marinos en vídeos subacuáticos con la intención, a medio plazo, de poder facilitar los trabajos de campo que requieren este tipo de estudios.

Centrándonos en el ámbito biológico, las *fanerógamas marinas*[21] son plantas parecidas a los céspedes terrestres, con flores y semillas, adaptadas a la vida bajo el mar sobre substrato arenoso o fangoso, con un complejo sistema de anclaje al substrato y un mecanismo de polinización muy especializado. A diferencia de las algas, presentan tejidos diferenciados que forman raíces, tallos y hojas, los cuales desempeñan diferentes funciones fisiológicas. Del mismo modo, su reproducción se realiza mediante la formación de flores, frutos y semillas, que son dispersadas por las corrientes marinas. Debido a la alta energía que existe en los ambientes donde viven, la mayoría de las especies tienen hojas con forma acintada; los tallos son rizomatosos y, de trecho en trecho, producen gran número de raíces para garantizar un anclaje seguro en el sedimento.[1] La Figura 1 muestra el aspecto de estas plantas.

Las praderas que forman estas plantas marinas son conocidas como sebadales o manchones en Canarias y han evolucionado a partir de ancestros terrestres en el período Cretácico, hace aproximadamente 100 millones de años; es decir, sus parientes más cercanos son plantas terrestres de la familia de las *gramíneas*[22].

En la actualidad, se reconocen alrededor de 66 especies distribuidas por todas las zonas costeras del mundo, excepto en las antárticas. Aunque la mayoría de las praderas son monoespecíficas, algunas pueden estar formadas por 12 especies distintas; la mayor riqueza de especies se encuentra en las zonas

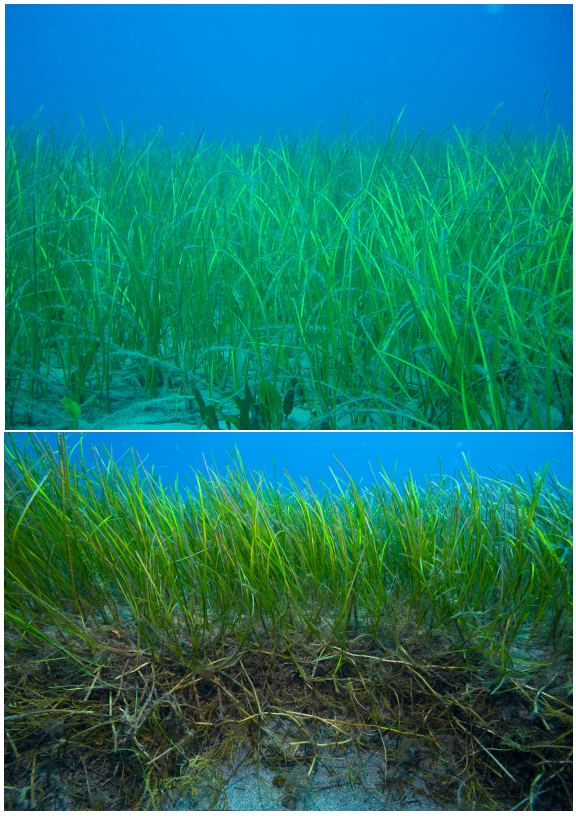

Figura 1: Aspecto de una fanerógama marina. (Gentileza de Dr. Fernando Tuya)

tropicales, disminuyendo hacia las zonas templadas del planeta. La mayoría de ellas crecen sobre substrato arenoso o fangoso, pero algunas pueden crecer sobre substrato rocoso.

Los sebadales tienen una gran importancia ecológica y económica al proporcionar, entre otros beneficios, hábitats para numerosos organismos, generar biomasa, producir oxígeno, etc. Los sebadales son ricos en especies, que pueden vivir en los diferentes estratos (raíces, rizomas, entre las hojas o sobre ellas, etc.), dando lugar a una rica comunidad biológica. Así, por ejemplo, se han recolectado hasta 53 algas creciendo sobre las hojas (*epífitas*[23]) y cerca de 70 especies de *poliquetos*[24] en un sebadal de la isla de Tenerife. Entre los peces, las mojarras[25], caballitos de mar y pejepipas[26] son algunas de las especies típicas de estos ambientes. En los sebadales canarios se concentra una gran biomasa y tienen una alta producción primaria anual, superior a 750 g/m^2 (peso seco). Es decir, los sebadales son como oasis de vida marina,

con una alta productividad, en los fondos arenosos costeros de Canarias.

De las especies de *fanerógamas marinas* presentes en las islas Canarias, la más representativa, por su abundancia y papel ecológico, es *Cymodocea nodosa*[27]. Su nombre científico deriva del griego ***Cimódoce*** —una de las "ninfa del mar" en la mitología griega— y **nodosa** —relativo a que presenta nudos—. En Canarias, se denomina popularmente "seba". *Cymodocea nodosa* se distribuye ampliamente en el Mar Mediterráneo, sin llegar a penetrar en el Mar Negro. En el Atlántico, se encuentra en las costas del sur de la Península Ibérica (costas de Portugal, Bahía de Cádiz, etc.) y en las costas del noroeste de África hasta Mauritania, alcanzando su límite meridional en Senegal. Además, está presente en Madeira y en Canarias.

Las praderas de *C. nodosa* se localizan, principalmente, en las bahías protegidas de la zona este, sureste y sur de casi todas las islas. Sin embargo, estos céspedes marinos son más abundantes en las islas orientales y centrales, por ser éstas las más antiguas, más erosionadas, con una plataforma insular sumergida de mayores dimensiones y mayor cantidad de sedimentos. Estas características geográficas hacen de las islas de La Graciosa, Lanzarote, Fuerteventura, Gran Canaria y Tenerife, un emplazamiento más favorable para el asentamiento y desarrollo de estas praderas. En las islas occidentales, los fondos son más rocosos y abruptos, con menor plataforma insular y menor cantidad de sedimentos. Por esta razón, el número y extensión de praderas disminuye en la isla de La Gomera, siendo su presencia puntual en la de El Hierro y está por confirmar la persistencia de praderas en La Palma.

Desde el punto de vista estructural, los sebadales canarios pueden desarrollarse formando un mosaico de parches de dimensiones variables, o bien formando praderas con una distribución más o menos continua en el espacio, como se puede observar en la Figura 2.

Estos dos patrones básicos de estructura espacial de las praderas dependen de los factores abióticos de cada zona. También existen sebadales que presentan una estructura mixta, con zonas de parches o "manchones" y zonas de pradera continua. Con frecuencia se observa una distribución en parches en las zonas más someras, entre los 5 y los 10 metros de profundidad; a mayor profundidad se desarrolla la pradera continua, con una cobertura cercana al 100 %. A medida que aumenta la profundidad, la pradera se va haciendo más laxa y *C. nodosa* es sustituida paulatinamente por las algas verdes *Caulerpas*[28][29] (Figura 3), existiendo una zona de transición, a profundidad variable, entre estas especies. La distribución *batimétrica*[30] de las especies de

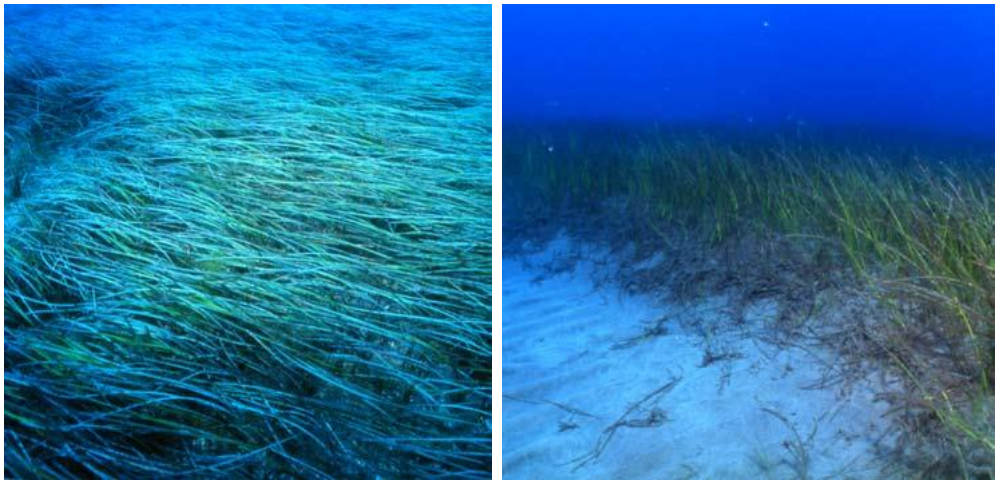

Figura 2: Aspecto de los dos tipos estructurales más importantes de las praderas de *Cymodocea nodosa* en las islas Canarias. Izq. Praderas. Der. Parches o manchones. (Gentileza de Dr. Fernando Tuya)

Caulerpa supera a la de la *fanerógama*, ya que puede alcanzar más de 50 metros de profundidad. En general, las praderas más estructuradas, con mayor densidad y cobertura, se sitúan en bahías o ensenadas más abrigadas, al resguardo del oleaje y de las corrientes. En zonas más expuestas, las praderas son más irregulares y laxas. En el caso de la formación de parches, éstos pueden estar aislados o relativamente conectados. A las zonas intermedias, donde no existe vegetación y el substrato se hace visible, se les denomina, popularmente, "calveros".

Tanto la importancia ambiental, como el valor ecológico de los sebadales, ha sido puesta de manifiesto por numerosos autores. De igual forma, en Canarias, los sebadales poseen un gran interés ecológico y económico, puesto que son el soporte estructural de una *biocenosis*[31] importante, tanto a nivel de organismos que crecen sobre sus hojas (*epífitos* como algas e *hidrozoos*[32]) como de aquellos otros que viven enterrados en el sedimento (*infauna*[33], principalmente gusanos y caracolas) y a nivel de los que se entremezclan entre las largas hojas (*epibentos*[34]: peces, chocos, etc.).

Según [1], en los siguientes párrafos y el esquema 2 se encuentran las principales funciones ecológicas que desempeñan estas praderas de hierbas marinas en Canarias:

- Amortiguan el efecto del oleaje y de las corrientes marinas sobre el fon-

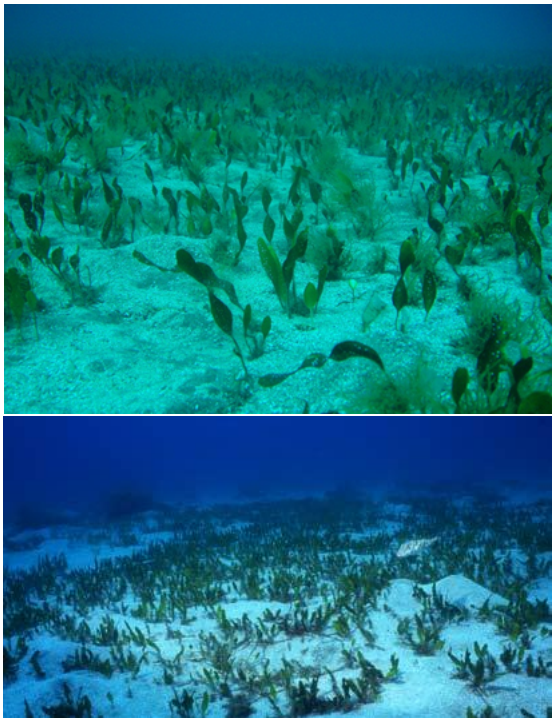

Figura 3: *Caulerpal* y *Caulerpa prolifera*. (Gentileza de Dr. Fernando Tuya)

do, estabilizando los sedimentos gracias a su sistema de raíces y rizomas. Estas dos características tienen gran importancia para la estabilización y conservación de las playas, evitando la erosión costera.

- Mejoran la calidad del agua, aumentando la transparencia y constituyendo un indicador biológico del buen estado de conservación del litoral. Es decir, son un bioindicador de la calidad de las aguas de baño.
- Son un ecosistema con una alta productividad, que exporta materia orgánica y enriquece a otros ecosistemas litorales.
- Contribuyen a la captación de la materia orgánica e inorgánica. Las plantas producen y atrapan *detritos*[35] y secretan materia orgánica disuelta, contribuyendo a la circulación de los elementos en el ecosistema. Juegan un papel importante en el reciclaje de los nutrientes. Las plantas son capaces de captar nutrientes de la columna de agua y aportar nutrientes y oxígeno en el lecho marino a través de las raíces.
- Aumentan la biodiversidad, ya que albergan mayor número de especies biológicas, tanto vegetales como animales, que los fondos desprovistos

de vegetación. Constituyen un soporte físico para un número elevado de especies de algas e invertebrados. Crean una diversidad de microhábitats tanto en sus hojas, rizomas y raíces, así como en el sedimento.

- Suministran alimento a diversas especies: mediante consumo de las hojas, de los *epífitos* y de los *detritos*.
- Son utilizadas como lugar de puesta y refugio para numerosas especies. Constituyen zonas de reclutamiento, cría y refugio de alevines y juveniles de muchas especies animales, algunos de los cuales tienen importancia comercial y recreativa, como por ejemplo muchas especies de peces. Es un ecosistema de suma importancia para las pesquerías artesanales de Canarias.

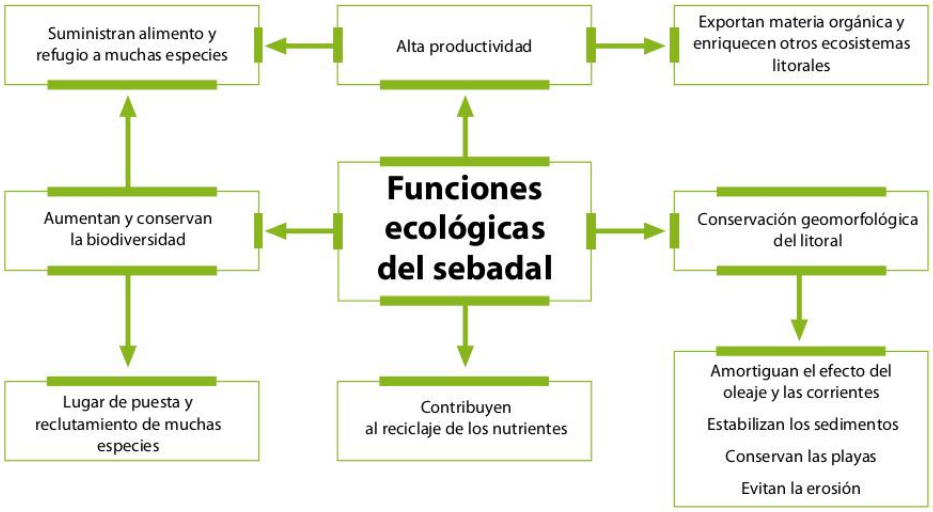

Figura 4: Funciones ecólogicas de los sebadales. (Gentileza de Dr. Fernando Tuya)

Las estimaciones realizadas sobre la productividad de las praderas de *C. nodosa* indican que entre un 48 y un 67 % de la producción total es exportada fuera del sistema por las corrientes, un 9 % es ingerido directamente

por los herbívoros y el resto es procesado por los descomponedores. Estos datos, derivados de estudios en el Mediterráneo Occidental, resaltan la importancia de esta comunidad bentónica[36] como soporte y enriquecedora de otros litorales más o menos próximos y, por ende, de las especies que habitan en ellos. Sin embargo, en las costas canarias todavía desconocemos algunos aspectos de este tipo de procesos.

Los sebadales son unos ecosistemas marinos muy importantes por su alta capacidad productiva, por ser criaderos para muchas especies de peces e invertebrados, por el mantenimiento de la biodiversidad marina, por su papel en la regulación de la calidad de las aguas costeras y por la protección del borde costero. Además, son indicadores de una buena calidad ambiental del ecosistema costero y, cuando comienzan a desaparecer, nos están señalando que algo va mal en ese tramo de costa.

Por su valor ambiental y económico, estos ecosistemas han sido mundialmente considerados como prioritarios para la conservación, siendo objeto de regulación y gestión en diversos países.

3. ESTADO DEL ARTE

En multitud de estudios en el ámbito de las ciencias marinas es necesario grabar en vídeo los fondos marinos de la zona en estudio. Estas secuencias se visionan después en el laboratorio para clasificar manualmente el tipo de hábitat bentónico y marcar su extensión.

A continuación se citan una serie de documentos ilustrativos del estado actual del tema.

1. Trabajos donde se exploran técnicas acústicas o de visión:

   - En *"Application of a digital pattern recognition system to Dinophysis acuminata and D. sacculus complexes"* [2] se desarrolla una técnica de discriminación de la imagen para mejorar la identificación específica de algunas células de *Dinophysis*[37] tóxicas (*dinoflagelados* marinos involucrados en la intoxicación diarreica por mariscos), en especial el *acuminata* y de los grupos *sacculus*, que pueden estar presentes en diferentes proporciones en muestras naturales de agua de mar recogidas durante los episodios tóxicos.
   - En el artículo *"Automatic indexing of underwater survey video: algorithm and benchmarking method"* [3] se centran en la detección de cambios significativos en los vídeos bentónicos para ayudar a hacer frente a la avalancha de datos que se enfrentan las aplicaciones de reconocimiento en vídeo.
   - En el documento *"Radiative Transfer Modeling and Analysis of Spatially Variant and Coherent Illumination for Undersea Object Detection"* [4], los autores realizan una revisión breve de los métodos disponibles de obtención de imágenes y describen una variación de la técnica de interferometría espacial que se basa en rejillas espaciales proyectadas con la posterior detección sobre una señal de retorno coherente con el propósito de reducción de ruido y mejora de la imagen.
   - En *"Comparison of Seafloor Roughness and Scattered Acoustic Temporal Decorrelation"* [5], los autores afirman que la conexión de los cambios en la dispersión acústica desde el fondo del mar con los cambios en la topografía del fondo marino es esencial para el modelado de la dependencia del tiempo de la dispersión y el

desarrollo de la acústica como una herramienta para la detección remota de actividad bentónica, obteniendo una ecuación que une a la descorrelación de potencia acústica difundida con la descorrelación de estimaciones espectrales de rugosidad del fondo marino

- En *"An evaluation of acoustic seabed classification techniques for marine biotope monitoring over broad-scales (> 1km^2) and meso-scales (10m^2–1km^2)"* [6] se centran en la evaluación de la utilidad de la clasificación acústica en este contexto usando dos métodos: mediante la descripción de los cambios naturales en la distribución temporal de los biotopos marinos a través de la amplia escala ($4km^2$), y al tratar de detectar cambios específicos experimentalmente inducidos a biotopos dominados por algas marinas en toda la meso-escala ($100m^2$).
- En *"Comments on "Principal Component Analysis of Single-Beam Echo-Sounder Signal Features for Seafloor Classification" by A. R. Amiri-Simkooei, M. Snellen, and D. G. Simons"* [7] se realiza un estudio sobre algunas de las técnicas más populares y las prácticas actuales, afirmando que la clasificación acústica de los fondos marinos con ecosondas de haz simple es a la vez un proceso establecido y un tema de investigación. Un artículo reciente ([8]) resume algunas de las técnicas más populares, lo que demuestra que pueden generar mapas de sedimentos realistas. En la conclusión de ese documento, se afirma que los algoritmos que se encuentran en el mismo, pueden sustituir a un paquete de software comercial ampliamente usado. Esta afirmación, según los autores del artículo citado, no es correcta. Entre otras cuestiones, las técnicas en papel se quedan cortas de las prácticas actuales en dos áreas: compensación de las variaciones de profundidades de agua y la elección del mejor número de grupos en la clasificación no supervisada.

2. Trabajos que se centran en el seguimiento o reconocimiento de ciertos organismos:

   - En el documento *"Segmentation methods for visual tracking of deep-ocean jellyfish using a conventional camera"* [9], los autores realizan un examen de las cuestiones relacionadas con el seguimiento in situ de un pequeño organismo marino utilizando un vehículo operado por control remoto.
   - En el artículo *"Classification of coral reef images from underwater video using neural networks"* [10] se hace uso de una *red neuronal*

de propagación hacia atrás [38] para clasificar imágenes en primer plano de los componentes de los arrecifes de coral en tres categorías bentónicas: coral vivo, coral muerto y arena. También se desarrolla un clasificador *árbol de decisión*[39] basado en reglas como los científicos marinos clasifican los corales por textura y color.

3. Trabajos donde se abordan los problemas físicos inherentes a la iluminación y los problemas por backscattering y donde se centran en describir aplicaciones, bien mediante sistemas fondeados o instalados a bordos de vehículos submarinos:

   - En el trabajo *"Design and Tests of an Adaptive Triggering Method for Capturing Peak Samples in a Thin Phytoplankton Layer by an Autonomous Underwater Vehicle"* [11], los autores presentan un método adaptativo de activación para un AUV para capturar muestras de agua en los picos de fluorescencia de clorofila, afirmando que las finas capas de *fitoplancton*[40] tienen un importante impacto en la ecología del océano costero y que la alta variabilidad espacial y temporal de tales capas hace que los vehículos submarinos autónomos (AUV), sean ideales para su estudio.
   - En el artículo *"Stereovision imaging on submersible platforms for 3-D mapping of benthic habitats and sea-floor structures"* [12] se realiza una presentación de simulaciones de un sistema de visión estereoscópica para la asignación y seguimiento de los hábitats bentónicos.

La densidad de brotes, longitud foliar y biomasa de la *fanerógama marina Cymodocea nodosa* empezó a disminuir severamente en los últimos 17 años en la isla oceánica de Gran Canaria. Cinco praderas submarinas fueron muestreadas en el verano y el invierno de 1994-1995, y en el invierno y el verano de 2011. La disminución de *C. nodosa* estaba correlacionada con un aumento de 3 veces de la biomasa de las algas verde *rhizophytic Caulerpa prolifera* durante el mismo período de tiempo, aunque este aumento variaba notablemente entre los prados. También se documentó una correlación negativa entre la biomasa de *C. nodosa* y *C. prolifera* en 2011. Las pruebas experimentales demostraron que *C. prolifera* puede causar importantes impactos negativos en *C. nodosa*. La interferencia de *C. prolifera* parece explicar en parte la decadencia en la abundancia de las poblaciones de *C. nodosa* en Gran Canaria. Este estudio, sin embargo, no identificó los posibles procesos subyacentes y/o alteraciones ambientales que puede haber facilitado la desaparición de *C. nodosa*. [13]

En febrero de 2009 se alertaba del problema de los bosques marinos de Canarias: Las praderas submarinas de Canarias, auténticas selvas subacuáticas del océano atlántico y uno de los principales puntos calientes de la biodiversidad marina mundial, están en peligro. [41]

Una categórica afirmación en la que están completamente de acuerdo tanto las principales organizaciones ecologistas del país como la comunidad científica, pero que rechaza de plano el Gobierno canario. Para la Administración regional la extensión de los sebadales es el doble de lo que se pensaba hace unos pocos años. Y por eso ha decidido rebajar su rango de protección de la segunda categoría, "sensible a la alteración de su hábitat", a la cuarta y última, "de interés especial".

Detrás de tan sorprendente desacuerdo subyacen las dificultades de políticos y empresarios para desarrollar importantes proyectos de puertos comerciales y deportivos en el Archipiélago, entorpecidos por la presencia de estas comunidades acuáticas férreamente protegidas por la legislación española y europea.

Como podemos ver en la referencia [42], el prestigioso botánico Wolfredo Wildpret y el más de medio centenar de profesores de las dos universidades canarias que firmaron un manifiesto por la protección de los sebadales. Un informe donde se advierte que rebajarles la protección a estos frágiles ecosistemas es "condenarlos a la desaparición", pues su situación es de "clara regresión general".

En el transcurso de este trabajo se pretende explorar la robustez con la que se pueden clasificar visualmente diferentes tipos de fondos marinos a partir de secuencias de vídeo; se abordaría la clasificación de fondos marinos. Concretamente, se trataría de clasificarlos en tres grupos:

- **Pradera Extensa.** Figura 5. Esta categoría se amplió posteriormente a:
  - Pompas Rosadas (*Cotoniella sp*[43]).
  - Abundancia de *Caulerpas*.
  - Abundancia de *Caulerpas* con Pompas Rosadas.
- **Pradera Escasa.** Figura 6.

Figura 5: Pradera Extensa

Figura 6: Pradera Escasa

- **Arena.** Figura 7.

En este trabajo se pretende explorar este problema para evaluar si, mediante el empleo de técnicas de visión por computador, es posible resolver estas tareas mediante la inspección automática de vídeos.

Así pues, de tener éxito, este proyecto aportaría una ayuda a la supresión del problema medioambiental que afecta a los sebadales ya que, como se

Figura 7: Arena

ha comentado anteriormente, la tarea de identificación y recuento de estos ejemplares se realizan en la actualidad mediante técnicas de conteo manual, bien in-situ con buceadores o bien sobre imágenes de vídeos, con elevado coste en términos de tiempo, capacidad de muestreo y mano de obra.

Este proyecto puede, a su vez, suponer un interesante avance, pues además de simplificar el desarrollo de estas tareas, serviría de ejemplo de transferencia tecnológica al ámbito de las ciencias marinas.

4. REQUISITOS

Para poder llevar a cabo los objetivos del proyecto se han usado, durante el desarrollo de éste, una serie de recursos. Estos recursos se han desglosado en tres grupos: *hardware*, *software* y *otras herramientas*.

4.1. Requisitos hardware

Para la realización de este proyecto no ha sido necesario disponer de una máquina de cierto nivel de prestaciones. No obstante, se ha usado un portátil con 4GB de RAM y una tarjeta gráfica de 1 GB.

4.2. Requisitos software

Se ha utilizado el programa Matlab para las representaciones gráficas y comparación de estadísticos.

También se ha usado en las siguientes fases de desarrollo un editor ligero denominado *Gedit* para generar y utilizar los clasificadores. Para compilar los programas escritos en el editor *Gedit*, se ha optado por el *g++*.

Para utilizar las herramientas necesarias para la generación de los clasificadores se ha instalado la librería *OpenCV*, una librería muy utilizada en *Visión por Computador*.

Para la realización de la memoria se ha utilizado LaTeX[44].

Sistema Operativo

Para las fases en las que se ha utilizado *Matlab*, se ha usado el sistema operativo *Windows*. Concretamente, se ha optado por la distribución *Windows 7 Professional*.

Para las demás fases se ha utilizado el Sistema Operativo *Linux*, siendo

éste un poderoso y sumamente versátil Sistema Operativo de 32-64 bits, multiusuario y multitarea. Fue creado en 1991 por Linus Torvalds, siendo entonces un estudiante de la Universidad de Helsinki. Linus se basó sobre *Unix*.

Linux y toda la comunidad que gira alrededor de él hacen que sea una buena plataforma de desarrollo. Por un lado, se dispone de un sistema operativo estable, seguro y en constante evolución. Por otro lado, existen las herramientas gratuitas de todo tipo y que además son de alta calidad.

Las distribuciones utilizadas para la realización del proyecto han sido *Ubuntu 11.10* y *Ubuntu 12.04*.

4.3. Otras herramientas utilizadas

Colección de vídeos

Se ha utilizado una colección de vídeos de calidad media para la generación de los clasificadores y la puesta a prueba de éstos. Dichas secuencias de vídeos proporcionadas, tienen una resolución de 640x480 y sufren un fuerte cabeceo de la cámara. Teniendo en cuenta la poca calidad de dichos vídeos, la dificultad para poder llevar a cabo este proyecto aumenta enormemente.

Conexión a Internet

Ha sido necesaria conexión a Internet para obtener cierta información para la generación de la memoria del proyecto y el aprendizaje necesario para llevar a cabo este proyecto.

5. ANÁLISIS

Este capítulo está destinado al análisis, uno de los puntos más importantes antes de comenzar con el desarrollo del software. Concretamente, se identifican los objetivos y las dificultades inherentes para su consecución.

El escenario en el que nos encontramos es el de un sistema embarcado en un vehículo que inspecciona una cierta área del fondo.

El material visual proporcionado, mediante la técnica de videoarrastre, ha sido una cámara submarina *MARISCOPE*. El aparato va insertado en un bastidor de acero con estabilizador y lastre para el correcto equilibrado (Figura 8, izquierda). La señal de la cámara se transmite a un pequeño monitor de televisión, mediante un cable coaxial de 5 mm, resistente a la tracción y a la presión. Esta pantalla es como un aparato *MP4*, modelo *ARCHOS AV500 Mobile DVR*, de 60 GB de capacidad, para recopilar toda la información gráfica que se va obteniendo. Al sistema de televisión se le adapta un aparato que incrusta los datos de posicionamiento (*GEOSTAMP, Intuitive Circuits Inc.*) aportados por un *GPS* (*Garmin 12*) (Figura 8, derecha).

Figura 8: Izquierda: cámara de vídeo *MARISCOPE*. Derecha: monitor de televisión, *GEOSTAMP*, *GPS Garmin 12* y fuente de alimentación de la cámara. (Gentileza de Dr. Fernando Tuya)

En este escenario nos encontramos las siguientes características:

- Los cambios de fondos se realizan gradualmente. Esto ha llevado a proponer un esquema donde exista un filtro de mediana.
- La disposición de la cámara supone la supresión de la zona superior de la imagen, dada la cantidad de partículas en suspensión que se encuentran

en el agua que imposibilita la visión en dicha zona. Así pues, se toma la zona central de la imagen para el estudio del fondo marino.

- La cámara a menudo choca contra el fondo o se producen unos cortes, lo que ha llevado a realizar detectores de estos eventos.

Para llevar a cabo la evaluación de si, mediante el empleo de técnicas de visión por computador, es posible resolver la tarea propuesta mediante la inspección automática de vídeos, se han utilizado varios detectores de bordes, incluyéndose a continuación una breve explicación de cada uno de ellos y de las herramientas *OpenCV* y *MATLAB*.

5.1. Fundamentos Teóricos

En este apartado se da una breve descripción de cada uno de los métodos utilizados para la realización de este proyecto.

5.1.1. Operador Sobel

El *operador Sobel*[45] es utilizado en procesamiento de imágenes, especialmente en algoritmos de detección de bordes. Técnicamente es un operador diferencial discreto que calcula una aproximación al gradiente de la función de intensidad de una imagen. Para cada punto de la imagen a procesar, el resultado del operador Sobel es tanto el vector gradiente correspondiente como la norma de éste vector.

El *operador Sobel* calcula el gradiente de la intensidad de una imagen en cada punto (píxel). Así, para cada punto, este operador da la magnitud del mayor cambio posible, la dirección de éste y el sentido desde oscuro a claro. El resultado muestra cuán abruptamente o suavemente cambia una imagen en cada punto analizado y, en consecuencia, cuánto probable es que éste represente un borde en la imagen y, también, la orientación a la que tiende ese borde. En la práctica, el cálculo de la magnitud -probabilidad de un borde- es más fiable y sencillo de interpretar que el cálculo de la dirección y sentido.

Matemáticamente, el gradiente de una función de dos variables (en este caso, la función de intensidad de la imagen) para cada punto es un vector bidimensional cuyos componentes están dados por las primeras derivadas de las direcciones verticales y horizontales. Para cada punto de la imagen, el vector gradiente apunta en dirección del incremento máximo posible de la intensidad, y la magnitud del vector gradiente corresponde a la cantidad de cambio de la intensidad en esa dirección.

Todo esto implica que el resultado de aplicar el *operador Sobel* sobre una región con intensidad de imagen constante es un vector cero, y el resultado de aplicarlo en un punto sobre un borde es un vector que cruza el borde (perpendicular) cuyo sentido es de los puntos más oscuros a los más claros.

Matemáticamente, el operador utiliza dos *kernels*[46] de 3×3 elementos para aplicar convolución a la imagen original para calcular aproximaciones a las derivadas, un kernel para los cambios horizontales y otro para las verticales. Si definimos $\mathbf{A}$ como la imagen original, el resultado, que son las dos imágenes $\mathbf{G_x}$ y $\mathbf{G_y}$ que representan para cada punto las aproximaciones horizontal y vertical de las derivadas de intensidades, es calculado como[14]:

$$\mathbf{G_x} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} * \mathbf{A} \quad \text{y} \quad \mathbf{G_y} = \begin{bmatrix} +1 & +2 & +1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} * \mathbf{A} \tag{1}$$

En cada punto de la imagen, los resultados de las aproximaciones de los gradientes horizontal y vertical pueden ser combinados para obtener la magnitud del gradiente, mediante:

$$\mathbf{G} = \sqrt{\mathbf{G_x}^2 + \mathbf{G_y}^2} \tag{2}$$

Con esta información, podemos calcular también la dirección del gradiente:

$$\mathbf{\Theta} = \arctan\left(\frac{\mathbf{G_y}}{\mathbf{G_x}}\right) \tag{3}$$

donde, por ejemplo, Θ es 0 para bordes verticales con puntos más oscuros

al lado izquierdo.

Debido a que la función de intensidad de una imagen digital sólo se conoce mediante puntos discretos, las derivadas de estas funciones no pueden ser definidas a menos que asumamos que existe una función continua que ha sido muestreada en los puntos de la imagen. Con algunas suposiciones adicionales, la derivada de la función continua de intensidad puede ser calculada como una función de la función de intensidad muestreada, es decir, de la imagen digital. De lo anterior resulta que las derivadas en cualquier punto particular son funciones de los valores de intensidad, virtualmente, en todos los puntos de la imagen. Sin embargo, aproximaciones a estas funciones diferenciales pueden ser definidas con el nivel de precisión requerido teniendo en cuenta únicamente una pequeña región de puntos alrededor del estudiado.

El *operador Sobel* representa una primera aproximación imprecisa del gradiente de la imagen, pero es de calidad suficiente para ser de uso práctico en muchas aplicaciones. Más precisamente, este operador utiliza sólo valores de intensidad en una región de 3x3 alrededor de cada punto analizado para calcular el gradiente correspondiente, además de que utiliza sólo números enteros para los coeficientes que indican la aproximación del gradiente.

Como una consecencia de su definición, el *operador Sobel* puede ser implementado mediante simples definiciones tanto en hardware como en software: sólo son utilizados ocho puntos de la imagen alrededor del punto a analizar para calcular el punto correspondiente de la imagen resultante, además sólo se requiere aritmética con números enteros para calcular una aproximación del vector gradiente. Además, los dos filtros discretos descritos anteriormente pueden ser separados:

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} +1 & +2 & +1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

y las dos derivadas $\mathbf{G_x}$ y $\mathbf{G_y}$ pueden ser calculadas con:

$$\mathbf{G_x} = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} * \mathbf{A} \quad \text{y} \quad \mathbf{G_y} = \begin{bmatrix} +1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} * \mathbf{A} \tag{5}$$

En ciertas implementaciones, estos cálculos separados dan buena ventaja ya que implican menos operaciones aritméticas para cada punto.

Ya que el resultado del *operador Sobel* es un mapeo de dos dimensiones del gradiente de cada punto, éste puede ser procesado y ser visto como una imagen, con las áreas de gradiente elevado (equivalentes a bordes) en negro y con los demás como blanco (el fondo de la imagen generada). Las Figuras 9, 10, 11 y 12 ilustran lo anterior, se muestra el cálculo del *operador Sobel* sobre una imagen. Obsérvese las diferencias de gradiente (zonas negras) dadas al aplicar únicamente un gradiente.

Figura 9: Imagen original en escala de grises.

Figura 10: Cálculo del gradiente X con el *operador Sobel*.

5.1.2. Operador Scharr

El *operador Scharr*[15] es una alternativa al *operador Sobel*.

Figura 11: Cálculo del gradiente Y con el *operador Sobel*.

Figura 12: Imagen resultante del gradiente calculado por el *operador Sobel* sobre la imagen original.

H. Scharr optimizó los *kernels* con el fin de minimizar el error cuadrático medio ponderado angular en dominio de Fourier[16].

Estos *kernels* son realmente derivados en lugar de simplemente mantener las restricciones de simetría. Los gradientes unidimensionales corresponden a las derivadas parciales de las coordenadas X e Y de la imagen. Los kernels resultantes son los siguientes:

$$\mathbf{K}_\theta = \begin{bmatrix} -3 & 0 & 3 \\ -10 & 0 & 10 \\ -3 & 0 & 3 \end{bmatrix} \quad \text{y} \quad \mathbf{K}_\phi = \begin{bmatrix} -3 & -10 & -3 \\ 0 & 0 & 0 \\ 3 & 10 & 3 \end{bmatrix} \tag{6}$$

5.1.3. Operador Laplaciano

Anteriormente se explicó el *operador Sobel*. Se basa en el hecho de que en la zona del borde, la intensidad de los píxeles muestra un "salto" o una alta variación de intensidad. Obteniendo la primera derivada de la intensidad, un borde se caracteriza por un máximo, como se puede ver en la Figura 13.

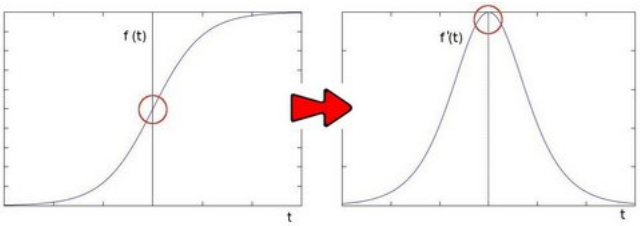

Figura 13: Primera derivada de la intensidad de los píxeles en la zona del borde.

Si se obtiene la segunda derivada el resultado es el que muestra la Figura 14

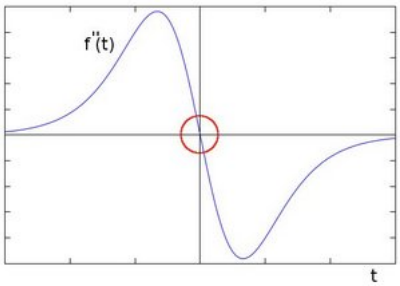

Figura 14: Segunda derivada de la intensidad de los píxeles en la zona del borde.

Se puede observar que la segunda derivada es cero. Por lo tanto, también se puede utilizar este criterio para tratar de detectar los bordes de una imagen. Sin embargo, nótese que los ceros no solamente aparecerán en los bordes (que de hecho pueden aparecer en otros lugares sin sentido); esto puede ser resuelto mediante la aplicación de un filtro cuando sea necesario.

El *operador Laplaciano* [47] [48] se define como:

$$Laplace(f) = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \tag{7}$$

El *operador Laplaciano* es computado filtrando la imagen con el siguiente *kernel* de 3×3 elementos:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \tag{8}$$

5.1.4. Filtro de mediana

En el procesamiento de señales, a menudo es deseable ser capaz de realizar algún tipo de reducción de ruido en una imagen o señal. El *filtro de mediana*[49] es una técnica de filtrado digital no lineal, a menudo utilizada para eliminar el ruido. Tal reducción de ruido es un típico tratamiento previo paso para mejorar los resultados del procesamiento posterior (por ejemplo, detección de bordes en una imagen). El filtro de mediana es muy ampliamente utilizado en el procesamiento digital de la imagen, ya que, en determinadas condiciones, conserva los bordes mientras se elimina ruido.

La idea principal del *filtro de mediana* es, a través de la señal de entrada, para cada entrada, sustituirla con la mediana[50] de las entradas vecinas. El patrón de vecinos se llama la "ventana", que se desliza, para cada entrada, a través de toda la señal. Para señales 1D, la ventana más obvia es simplemente las entradas precedentes y siguientes, mientras que para 2D (o más dimensiones) señales, tales como imágenes, patrones de ventana más complejas son posibles (tales como "caja" o patrones de "cruz"). Hay que tener en cuenta que si la ventana tiene un número impar de entradas, la mediana es fácil de definir: es sólo el valor medio después de que todas las entradas de la ventana están ordenadas numéricamente. Para un número par de entradas, hay más de una mediana posible.

Como ejemplo, usando un tamaño de ventana de tres con una entrada inmediatamente anterior y posterior a cada entrada, un filtro de la mediana se aplica a la señal 1D simple siguiente:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} 2 & 80 & 6 & 3 \end{bmatrix} \tag{9}$$

La mediana y la señal filtrada de salida será:

$$\mathbf{y}[\mathbf{1}] = \text{Mediana de} \begin{bmatrix} 2 & 2 & 80 \end{bmatrix} = 2 \tag{10}$$

$$\mathbf{y}[\mathbf{2}] = \text{Mediana de} \begin{bmatrix} 2 & 80 & 6 \end{bmatrix} = \text{Mediana de} \begin{bmatrix} 2 & 6 & 80 \end{bmatrix} = 6 \tag{11}$$

$$\mathbf{y}[\mathbf{3}] = \text{Mediana de} \begin{bmatrix} 80 & 6 & 3 \end{bmatrix} = \text{Mediana de} \begin{bmatrix} 3 & 6 & 80 \end{bmatrix} = 6 \tag{12}$$

$$\mathbf{y}[\mathbf{4}] = \text{Mediana de} \begin{bmatrix} 6 & 3 & 3 \end{bmatrix} = \text{Mediana de} \begin{bmatrix} 3 & 3 & 6 \end{bmatrix} = 3 \tag{13}$$

es decir,

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} 2 & 6 & 6 & 3 \end{bmatrix} \tag{14}$$

Nótese que, en el ejemplo anterior, dado que no hay ninguna entrada anterior al primer valor, el primer valor se repite, como con el último valor, para obtener entradas suficientes para llenar la ventana. Esta es una manera de manejar las entradas que faltan en los límites de la ventana de la señal, pero hay otros sistemas que tienen propiedades diferentes que podrían preferirse en determinadas circunstancias:

- Evitar el procesamiento de los límites.
- Obtención de las entradas de otros lugares de la señal.
- Disminución de la ventana, cerca de los límites, para que cada ventana esté llena.

Dado que, como se comentó anteriormente, los cambios de fondos se realizan gradualmente, se justifica el uso del filtro de mediana para hacer que la clasificación re realice en base a varias muestras y no sólo con una. Así, el clasificador etiquetará el fondo que se encuentra en cada momento y el filtro de mediana se encargará de validarlo con las anteriores clasificaciones, generando el etiquetado final de dicho fondo.

5.1.5. Local Binary Patterns

El operador de textura *Local Binary Patterns* (*LBP*) [17] [18] [19] [20] fue introducido por primera vez como una medida complementaria para el

contraste de la imagen local. La primera versión operaba con los ocho vecinos de un píxel, utilizando el valor del píxel central como umbral. Un código *LBP* para un "vecindario" se genera multiplicando los valores límite con las ponderaciones asignadas a los píxeles correspondientes y sumando el resultado.

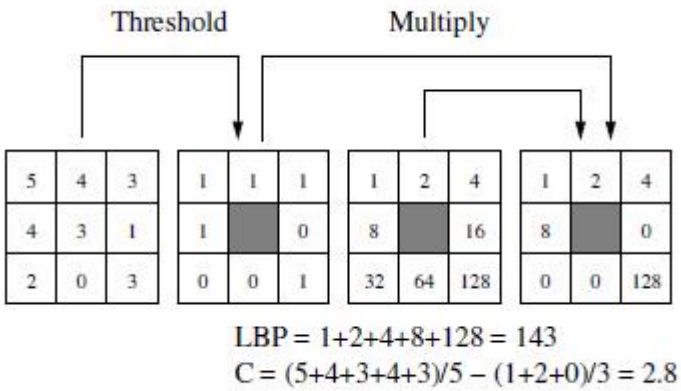

Figura 15: Cómo calcular el código LBP original y una medida de contraste.

Dado que el *LBP* es, por definición, invariante a los cambios monotónicos en escala de grises, se complementó con una medida independiente de contraste local. La figura 15 muestra cómo se obtiene la medida de contraste (C). El promedio de los niveles de gris por debajo del píxel central se resta del de los niveles de gris igual o por encima que el píxel central.

En la forma actual del operador *LBP* de la versión básica, la definición original se extiende a "vecindarios" circulares arbitrarios. Se han desarrollado varias variantes de esta idea básica. Ésta es, sin embargo, la misma: un código binario que describe el patrón de la textura local es construido mediante el umbral de un "vecindario" por el valor de gris de su centro. El operador está relacionado con muchos métodos de análisis de texturas conocidos. Estas relaciones se resumen en la figura 16.

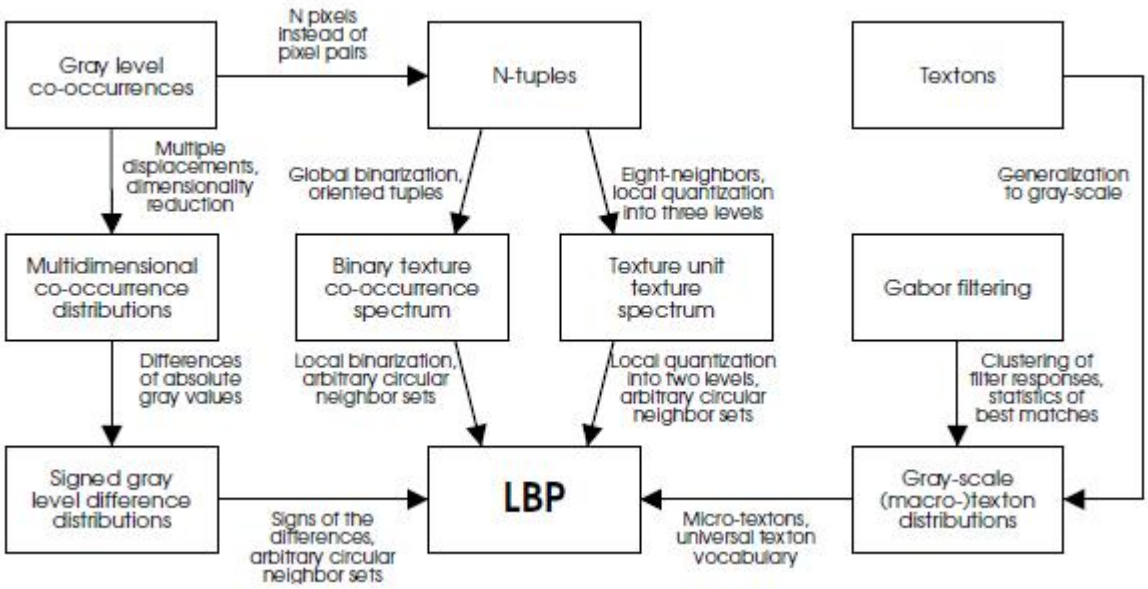

Figura 16: LBP en el campo de los operadores de análisis de texturas.

5.2. OpenCV

OpenCV es una librería de visión por computador de código abierto disponible en `http://SourceForge.net/projects/opencvlibrary`. Está escrito en *C* y *C++* y corre bajo *Linux*, *Windows* y *Mac OS X*. Hay un desarrollo activo de las interfaces para *Python*, *Ruby*, *Matlab* y otros lenguajes.

OpenCV ha sido diseñado para la eficiencia computacional y con un fuerte enfoque en aplicaciones de tiempo real. Está escrito en *C* optimizado y puede aprovechar los procesadores multinúcleo.

Uno de los objetivos de *OpenCV* es proporcionar una infraestructura de visión por computador fácil de utilizar, que ayuda a crear rápidamente aplicaciones de visión bastante sofisticadas. La librería *OpenCV* contiene más de 500 funciones que abarcan muchas áreas de la visión, incluyendo el reconocimiento de productos de fábricas, imágenes médicas, seguridad, interfaz de usuario, calibración de cámara, visión estéreo y robótica. Debido a que la visión por computador y el aprendizaje automático aparecen a menudo juntos, *OpenCV* contiene también una completa *Librería de Aprendizaje Au-*

tomático o, en inglés, *Machine Learning Library* (*MLL*). Esta librería se centra en el reconocimiento de patrones estadísticos y de agrupamiento. La *MLL* es de gran utilidad para las tareas de visión que se encuentran en el núcleo de la misión de *OpenCV*, pero es lo suficientemente general como para ser utilizada para cualquier problema de aprendizaje automático.

5.3. MATLAB

MATLAB (abreviatura de MAtrix Laboratory) es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (*IDE*) con un lenguaje de programación propio (lenguaje *M*). Está disponible para las plataformas *Unix*, *Windows* y *Apple Mac OS X*.

Entre sus prestaciones básicas se hallan:

- Manipulación de matrices.
- Representación de datos y funciones.
- Implementación de algoritmos.
- Creación de interfaces de usuario (GUI).
- Comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware.

El paquete *MATLAB* dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, a saber, *Simulink* (plataforma de simulación multidominio) y *GUIDE* (editor de interfaces de usuario). Además, se pueden ampliar las capacidades de *MATLAB* con los *toolboxes*; y las de *Simulink* con los *blocksets*.

Es un software muy utilizado en universidades y centros de investigación y desarrollo. En los últimos años, ha aumentado el número de prestaciones, como la de programar directamente procesadores digitales de señal o crear código *VHDL* (lenguaje utilizado para describir circuitos digitales).

MATLAB es un programa de cálculo numérico orientado a matrices. Por lo tanto, será más eficiente si se diseñan los algoritmos en términos de matrices y vectores.

6. DESARROLLO

Tras la realización del análisis de necesidades, así como de los requisitos hardware y software, se comienza con el desarrollo del software. Para ello, se realiza el diseño y planteamiento del sistema de detección y se continúa con la implementación de dicho planteamiento.

6.1. Diseño

Como se ha explicado anteriormente, se ha utilizado un esquema donde existe un filtro de mediana junto con los detectores de choque y corte de cámara. El sistema en cuestión se comportaría de la siguiente manera:

1. Se utiliza el detector de corte. Si hay corte ésta es la etiqueta que se asigna, si no hay corte se pasa al siguiente paso.
2. Se hace uso del detector de choque. Si hay choque se notifica, si no hay choque se pasa al siguiente paso.
3. Se pone en funcionamiento el clasificador de fondos marinos.
4. El filtro de mediana hace uso del resultado de la clasificación dada en el paso anterior junto con las anteriores correspondientes (dependiendo del tamaño de la ventana). El resultado de éste será la etiqueta asignada finalmente.

   Dado que el etiquetado no se realizó por un experto, se enseñaron los resultados a un experto, tomando nota de su evaluación y posteriormente se ajustó el detector, así como se amplió la detección de la clase "Pradera Extensa" para que abarcara las subclasificaciones siguientes:

   - Pompas Rosadas (*Cotoniella sp*).
   - Abundancia de *Caulerpas*.
   - Abundancia de *Caulerpas* con Pompas Rosadas.

La figura 17 muestra la relación existente entre los distintos clasificadores, sirviendo como resumen de lo expuesto anteriormente.

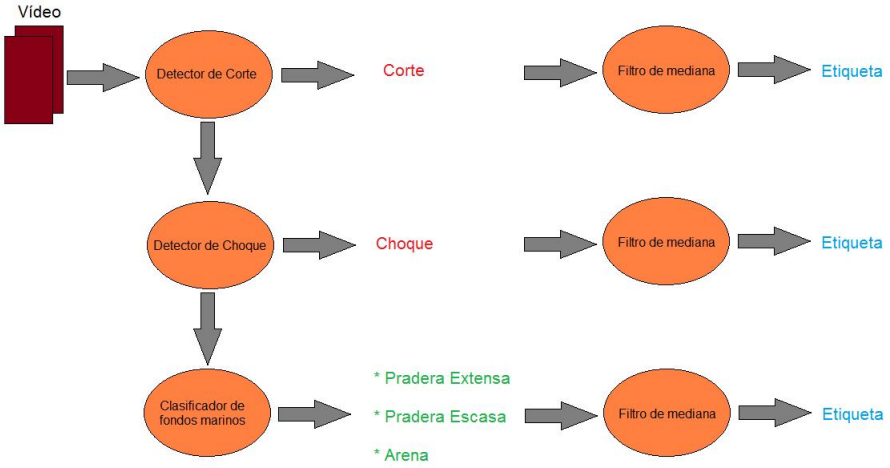

Figura 17: Esquema del sistema.

6.2. Implementación

En este apartado se explica cómo se ha implementado cada una de las funciones y los clasificadores. Las funciones correspondientes a la obtención de datos posiblemente discriminativos, así como los clasificadores se han implementado en *C++*, haciendo uso de las herramientas de *OpenCV*. Las funciones que utilizan los datos obtenidos para su estudio se han implementado en *MATLAB*.

Num_Bordes

Este programa está escrito en *C++*. Toma un vídeo y crea un fichero donde guarda el número de bordes detectado y el tamaño del borde mayor para cada frame.

Tam_Bordes

Este programa está escrito en *C++*. Toma un vídeo y crea un fichero donde guarda el tamaño de cada borde detectado para cada frame.

Bordes.m

Este programa se ha implementado en *MATLAB*. Se muestran los resultados de **Bordes_cuenta_Escribe**.

Num_Bordes.m

Este programa se ha implementado en *MATLAB*. Se dibujan los resultados de **Bordes_cuenta_Escribe** en diferentes ventanas (Algas y Arena).

Tam_Bordes.m

Este programa se ha implementado en *MATLAB*. Se muestran los resultados de **Tam_Bordes_Escribe**.

Tam_Bordes_Frames.m

Este programa se ha implementado en *MATLAB*. Se muestran los resultados de **Tam_Bordes_Escribe** para un frame concreto.

Num_Bordes_Final

Este programa está escrito en *C++*. Toma un vídeo y crea un fichero donde guarda el número de bordes detectado para cada frame, omitiendo los que sean menor que un cierto umbral.

Etiqueta_Video

Este programa está escrito en *C++*. Toma un vídeo y guarda los frames con las detecciones del fondo marino. Además, crea un fichero donde guarda el número de bordes detectado, la media de los bordes y la etiqueta asignada para cada frame.

Dentro de este programa encontramos los siguientes módulos:

- Detección de "Corte". Toma el frame y calcula el área negra y el área blanca; si alguna de estas áreas es mayor o igual que la mitad del área de la imagen se considera "Corte".
- Detección de "Choque". Si la imagen no tiene detalles (contornos) y al menos un 50 % del área de ésta es roja se considera "Choque".
- Detección de "Pradera Extensa", "Pradera Escasa" y "Arena". Se detectan los contornos de la imagen y se filtran los más pequeños que un cierto umbral, que dependerá del tipo de detector de bordes que se esté utilizando. Posteriormente, se cuenta el número de bordes que han superado dicho umbral y dependiendo de dicho número se etiqueta como una de las tres clases, considerando la "Pradera Extensa" como la que mayor número de bordes tiene y la "Arena" la clase con menor número de bordes. Si se considera "Pradera Extensa", se pasa a los siguientes módulos:
    - Detección de *Caulerpas*. Se realiza un clúster en base al color de la imagen y se buscan las zonas oscuras. Posteriormente, se analiza su estructura, haciendo una prueba de "circularidad" (forma de raqueta) tomando los momentos de cada contorno y comprobando la relación que existe entre el perímetro de dicho contorno y su área.
    - Detección de *Cotoniella*. Se calcula el histograma[51] de la imagen *LBP* y se compara, mediante alguno de los métodos disponibles (correlación [52], chi-cuadrado [53] y distancia de Bhattacharyya [54]) con el histograma *LBP* de una imagen con abundancia de *Cotoniella* tomada como referencia.

Contabiliza_Aciertos

Este programa está escrito en *C++*. Compara cada etiqueta asignada por el clasificador con la etiqueta que se le dió originalmente (manualmente) al vídeo.

7. RESULTADOS

En este capítulo se expone un resumen de los resultados obtenidos.

7.1. Detección de bordes

Se muestran, a nivel ilustrativo, algunos de los resultados obtenidos en imágenes en la detección de bordes.

Sobel

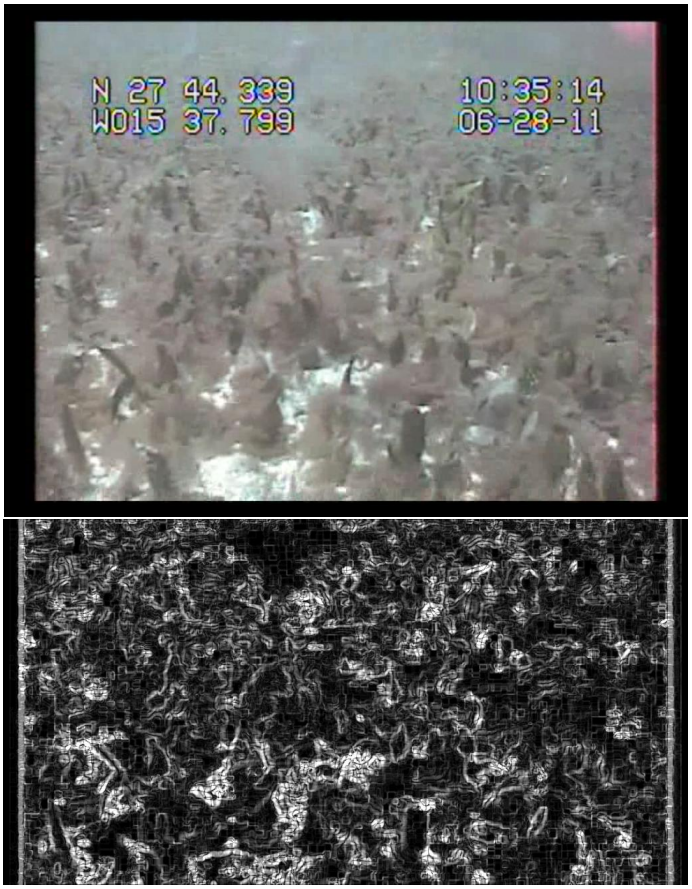

Figura 18: Arriba: Imagen Original. Abajo: Detección de bordes. (Sobel)

Figura 19: Arriba: Imagen Original. Abajo: Detección de bordes. (Sobel)

Figura 20: Arriba: Imagen Original. Abajo: Detección de bordes. (Sobel)

Figura 21: Arriba: Imagen Original. Abajo: Detección de bordes. (Sobel)

Figura 22: Arriba: Imagen Original. Abajo: Detección de bordes. (Sobel)

Scharr

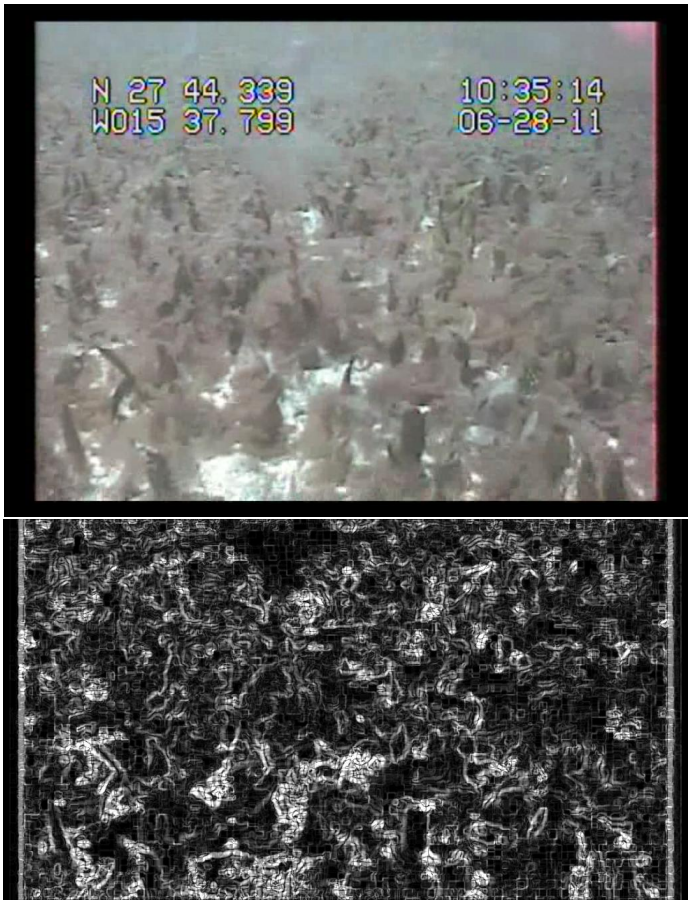

Figura 23: Arriba: Imagen Original. Abajo: Detección de bordes. (Scharr)

Figura 24: Arriba: Imagen Original. Abajo: Detección de bordes. (Scharr)

Figura 25: Arriba: Imagen Original. Abajo: Detección de bordes. (Scharr)

Figura 26: Arriba: Imagen Original. Abajo: Detección de bordes. (Scharr)

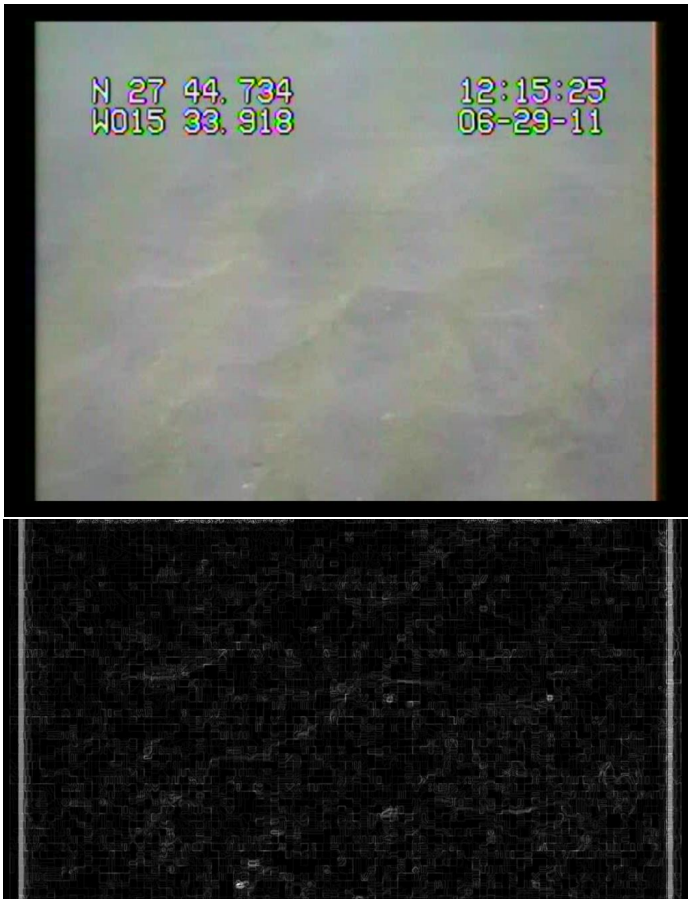

Figura 27: Arriba: Imagen Original. Abajo: Detección de bordes. (Scharr)

Laplace

Figura 28: Arriba: Imagen Original. Abajo: Detección de bordes. (Laplace)

Figura 29: Arriba: Imagen Original. Abajo: Detección de bordes. (Laplace)

Figura 30: Arriba: Imagen Original. Abajo: Detección de bordes. (Laplace)

Figura 31: Arriba: Imagen Original. Abajo: Detección de bordes. (Laplace)

Figura 32: Arriba: Imagen Original. Abajo: Detección de bordes. (Laplace)

7.2. Tamaño de bordes

Se muestran, las gráficas obtenidas en *MATLAB* a la hora de comparar el tamaño de bordes en los distintos escenarios, entendiendo como tamaño de bordes la longitud en píxeles.

Sobel

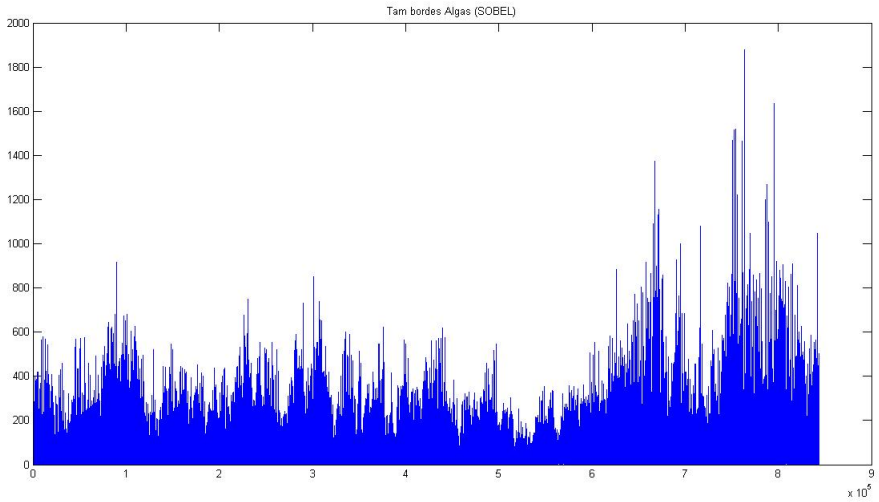

Figura 33: Tamaño de Bordes en Secuencia con Algas. (Sobel)

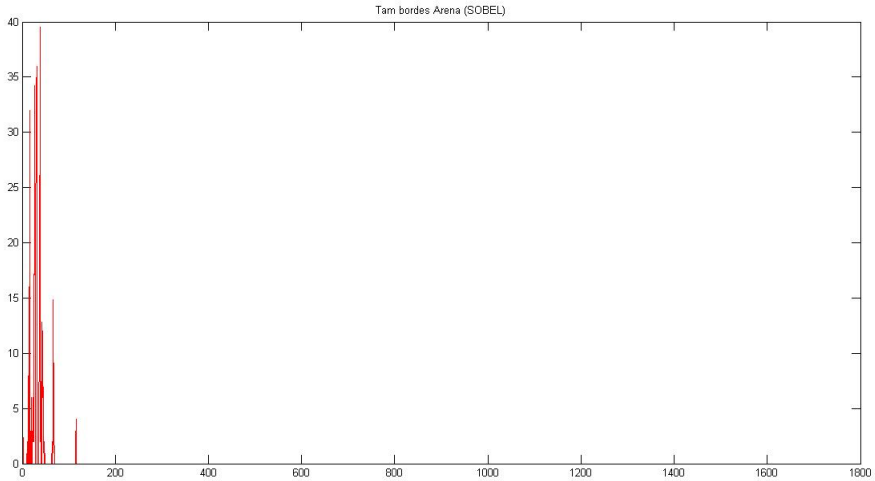

Figura 34: Tamaño de Bordes en Secuencia con Arena. (Sobel)

Scharr

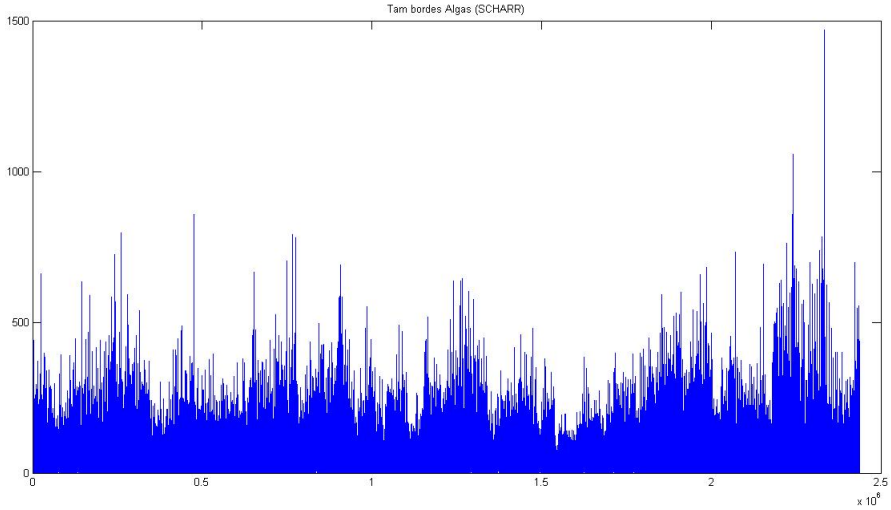

Figura 35: Tamaño de Bordes en Secuencia con Algas. (Scharr)

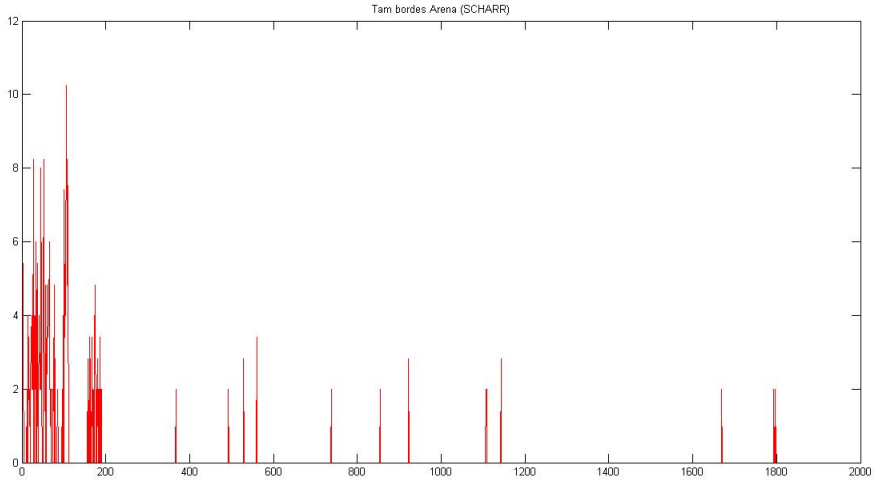

Figura 36: Tamaño de Bordes en Secuencia con Arena. (Scharr)

Laplace

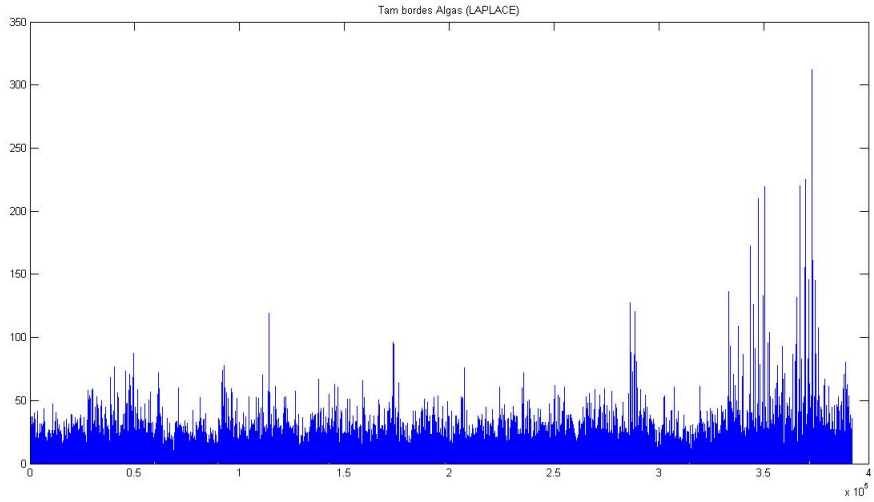

Figura 37: Tamaño de Bordes en Secuencia con Algas. (Laplace)

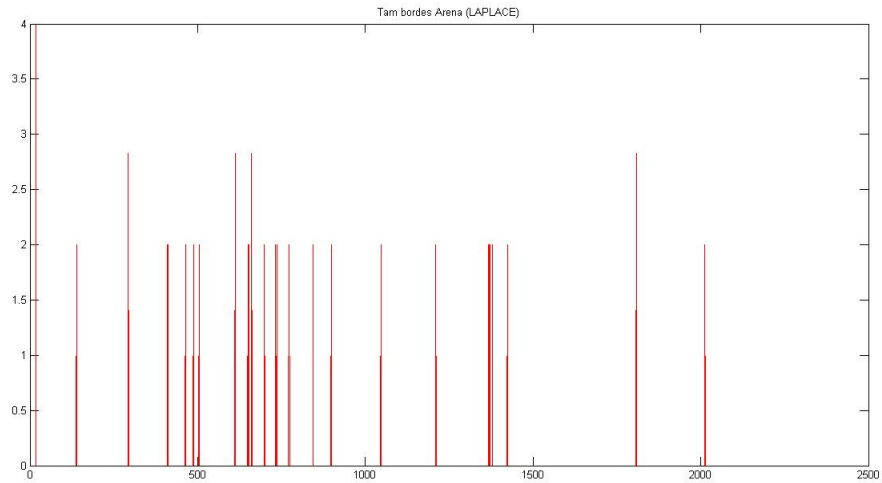

Figura 38: Tamaño de Bordes en Secuencia con Arena. (Laplace)

Como se puede ver en las gráficas 33, 34, 35, 36, 37 y 38, se puede realizar una distinción en base a esta variable entre "Algas" y "Arena", si bien para

cada uno de los operadores habrá que tomar distintas medidas. El valor tomado para el filtrado de los bordes, en cada uno de los casos, es el máximo de los correspondientes a "Arena".

7.3. Etiquetado del vídeo

A continuación se muestran algunos frames resultantes del etiquetado en secuencias de vídeo.

Sobel

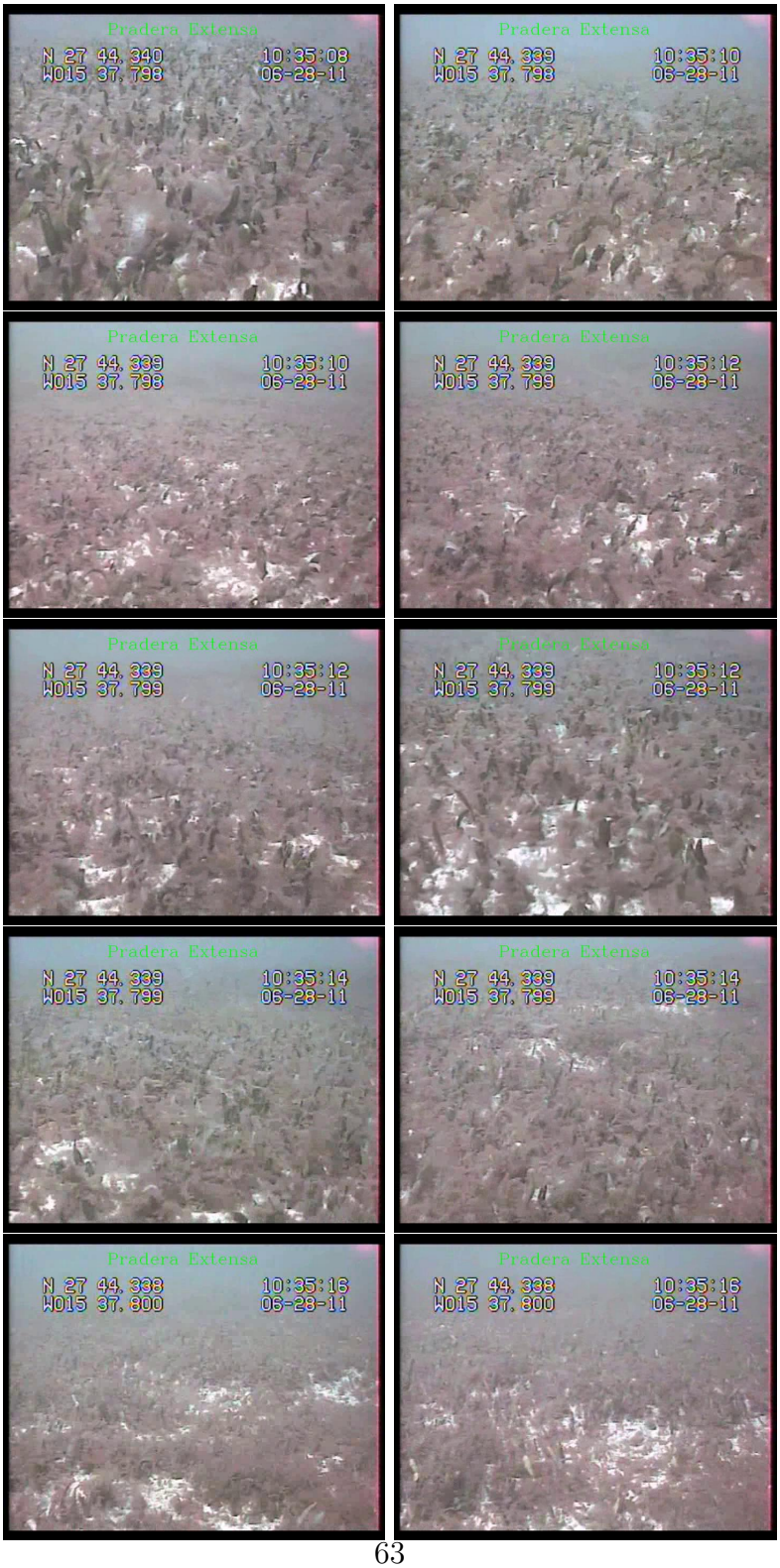

Figura 39: Etiquetado en Secuencia con Pradera Extensa. (Sobel) (1)

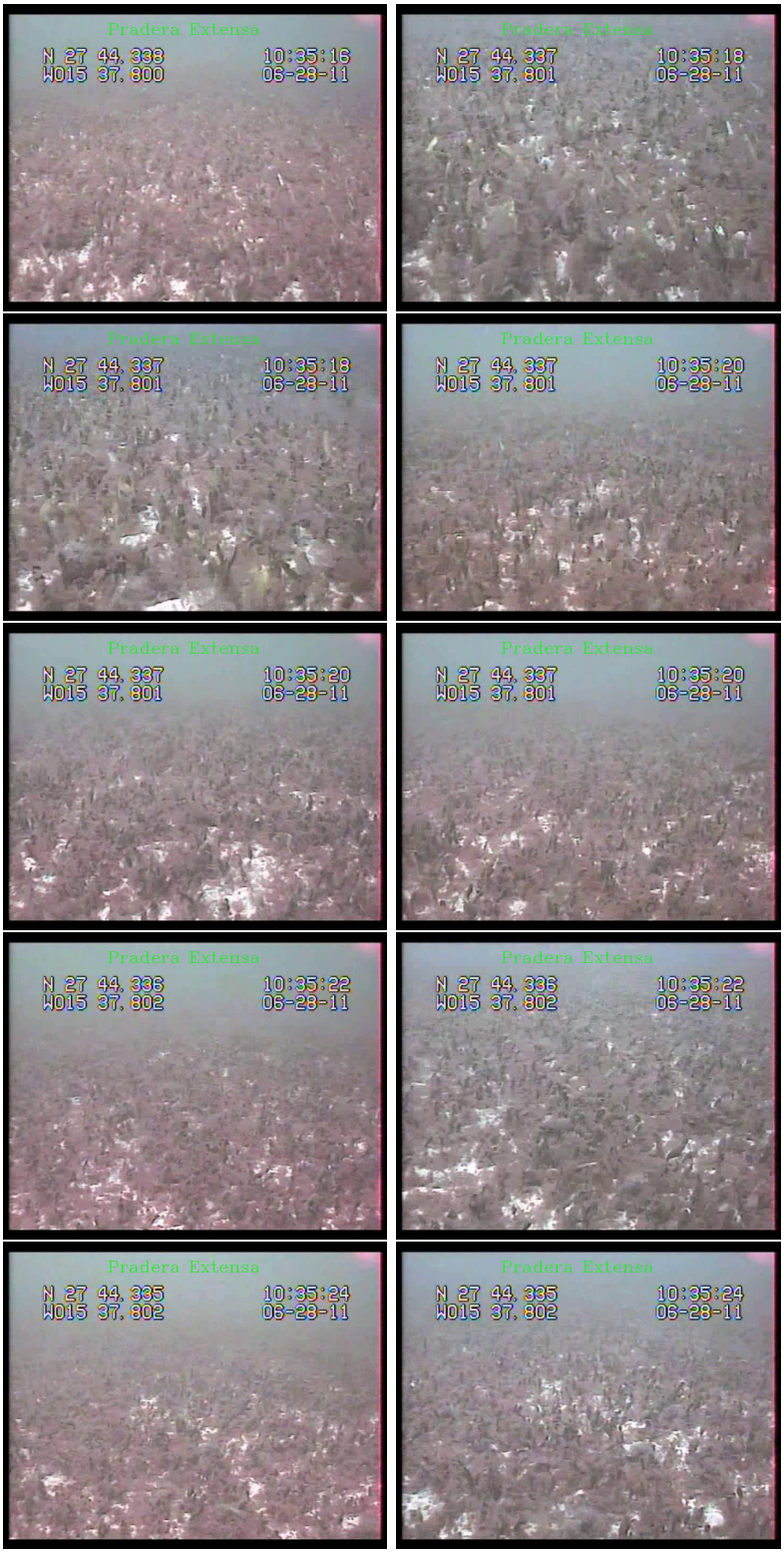

Figura 40: Etiquetado en Secuencia con Pradera Extensa. (Sobel) (2)

Figura 41: Etiquetado en Secuencia con Pradera Escasa. (Sobel) (1)

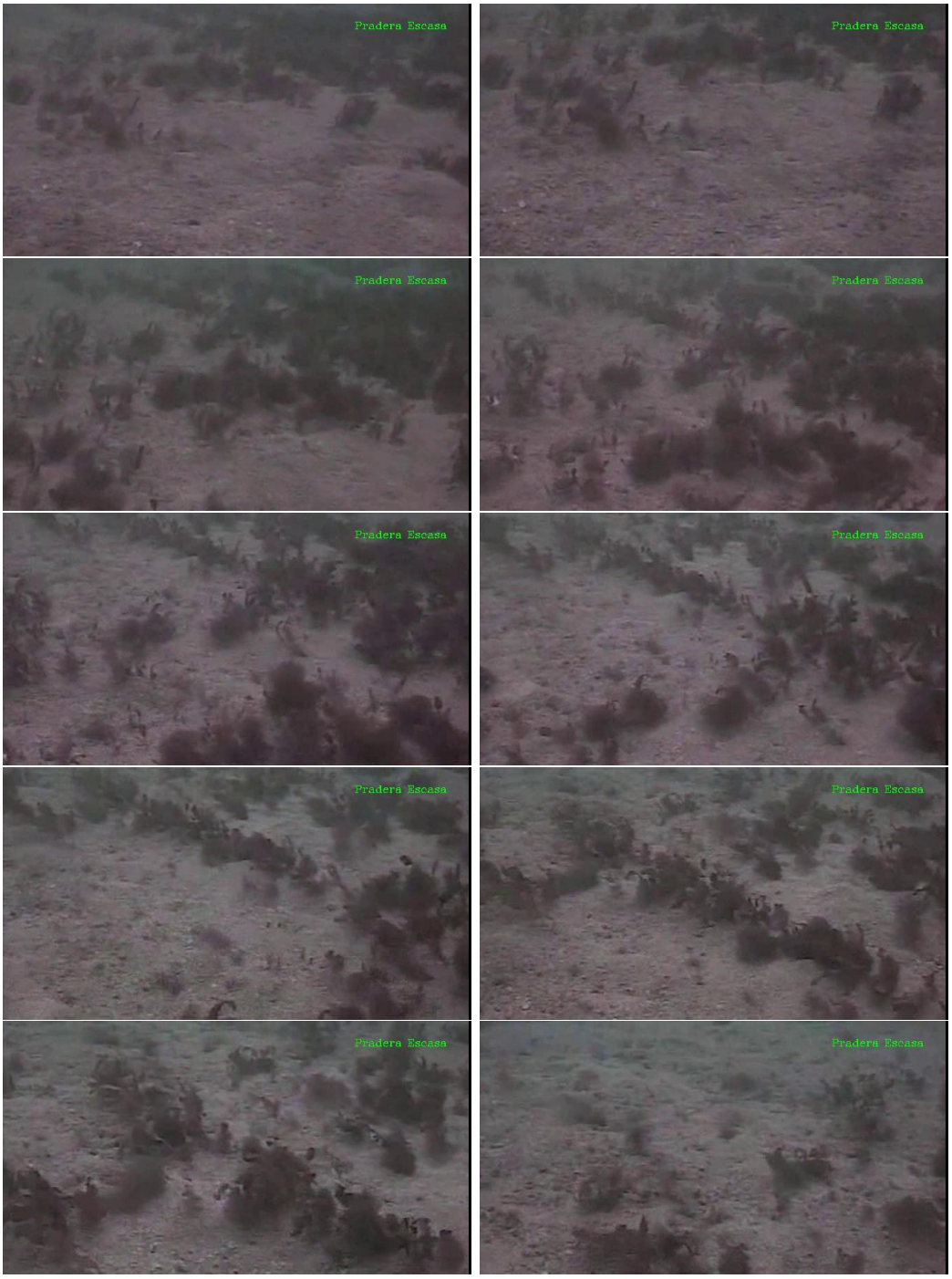

Figura 42: Etiquetado en Secuencia con Pradera Escasa. (Sobel) (2)

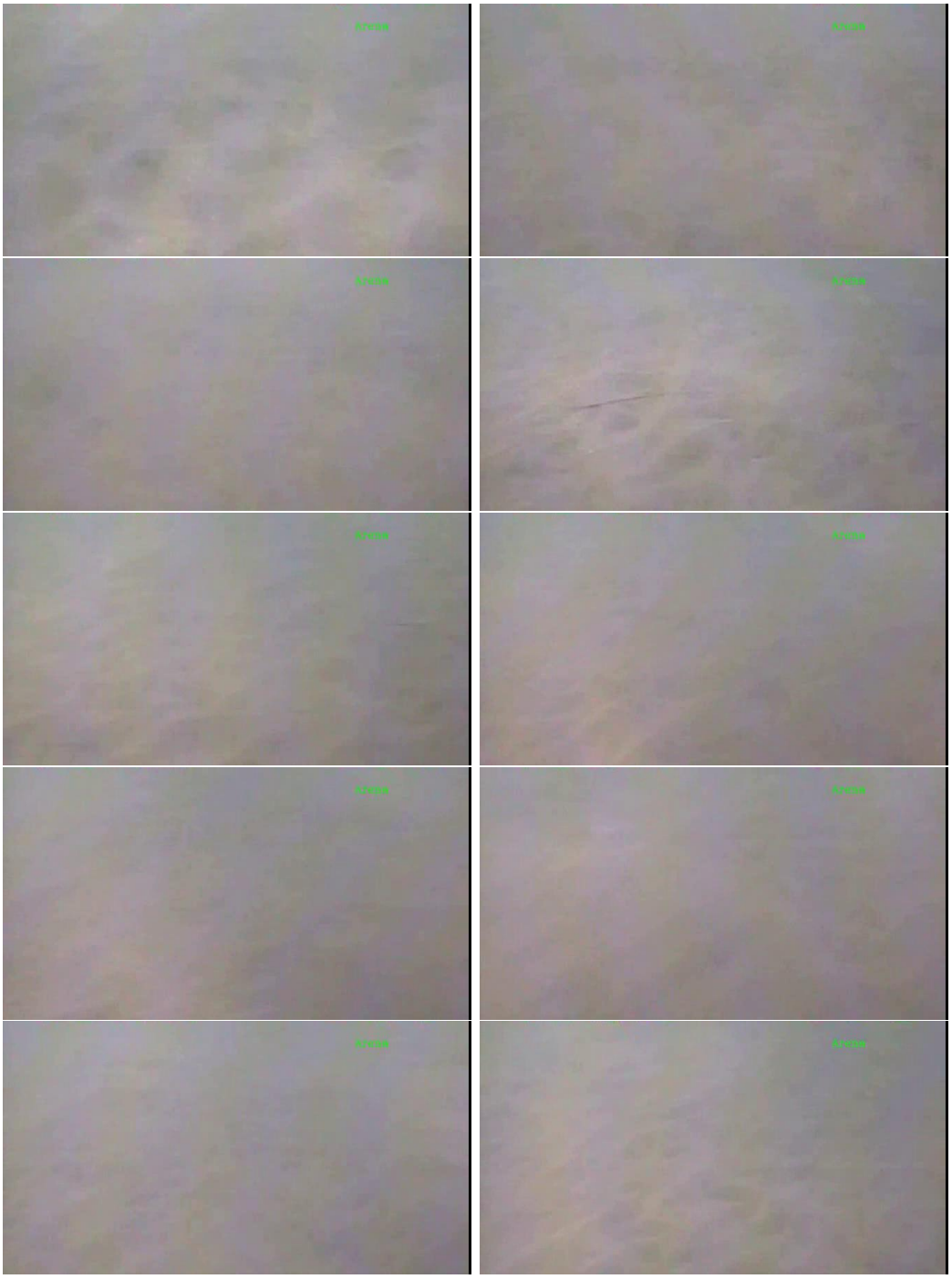

Figura 43: Etiquetado en Secuencia con Arena. (Sobel) (1)

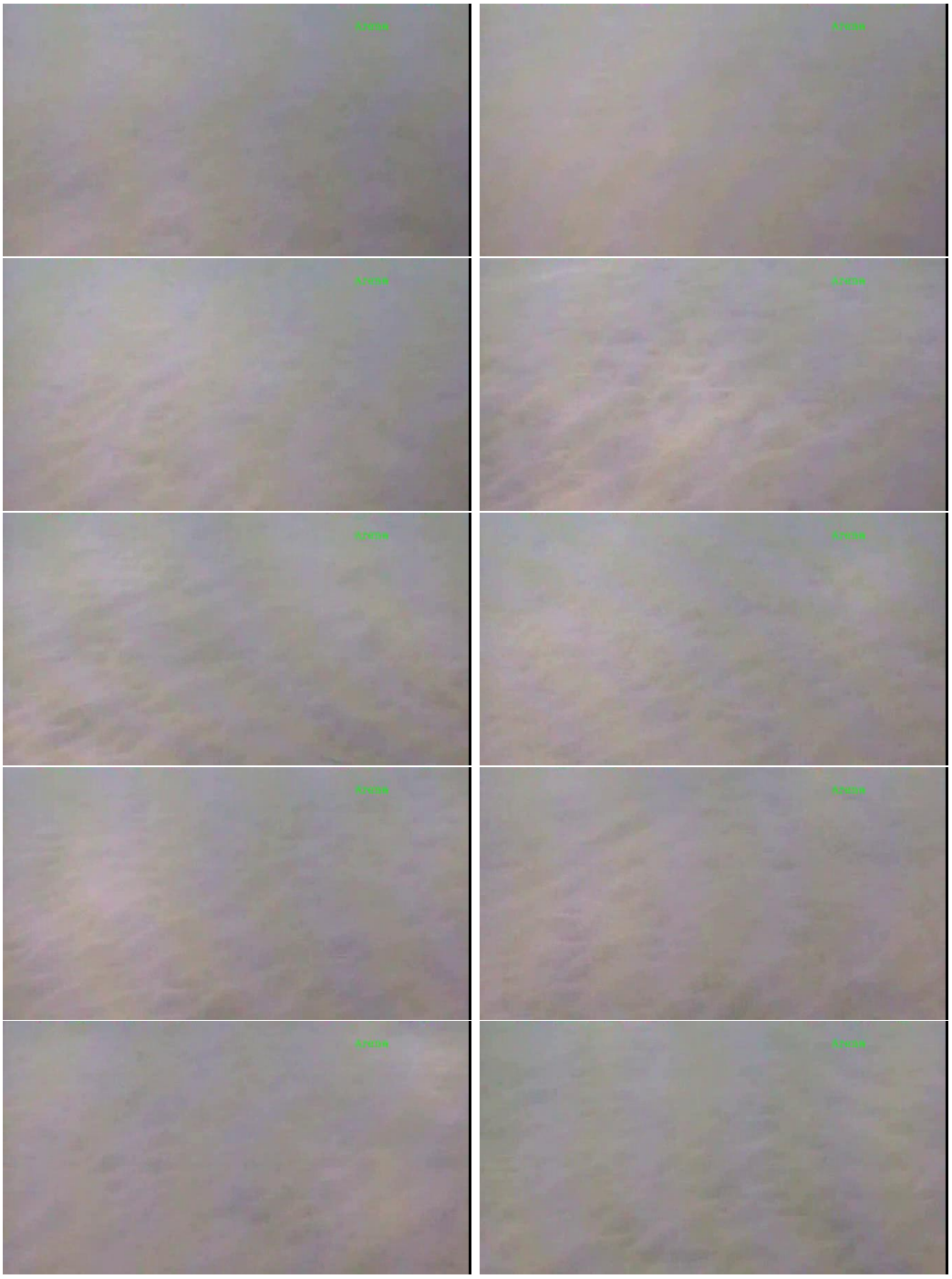

Figura 44: Etiquetado en Secuencia con Arena. (Sobel) (2)

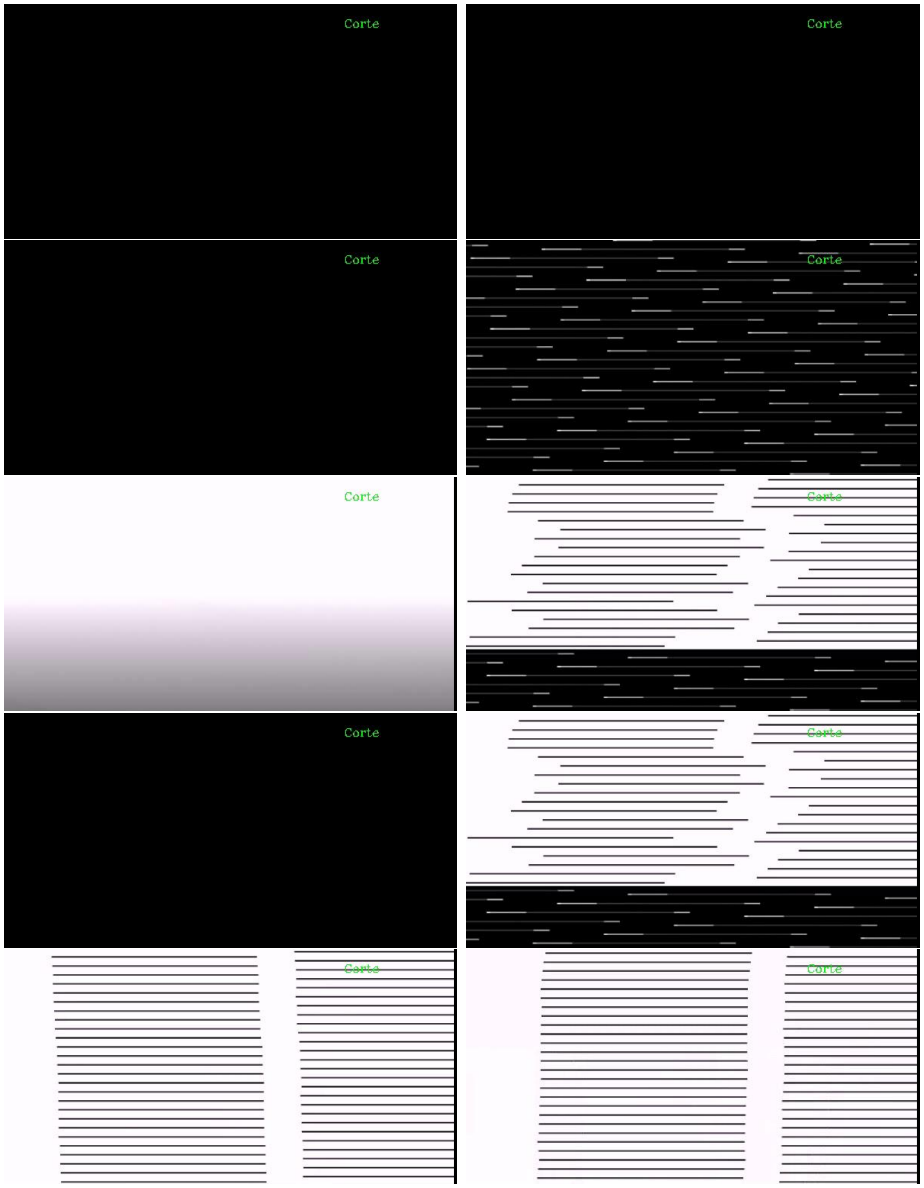

Figura 45: Etiquetado en Secuencia con Corte. (Sobel) (2)

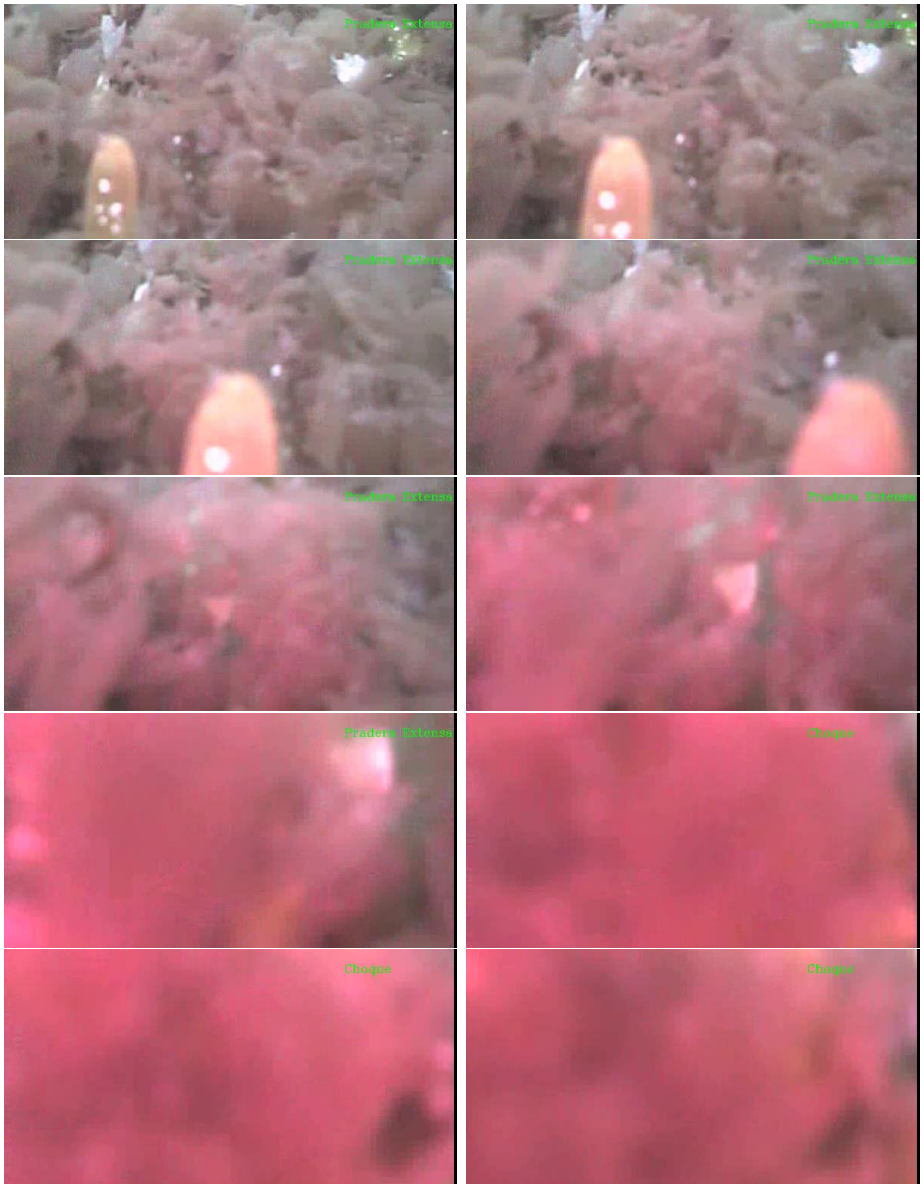

Figura 46: Etiquetado en Secuencia con Choque. (Sobel) (1)

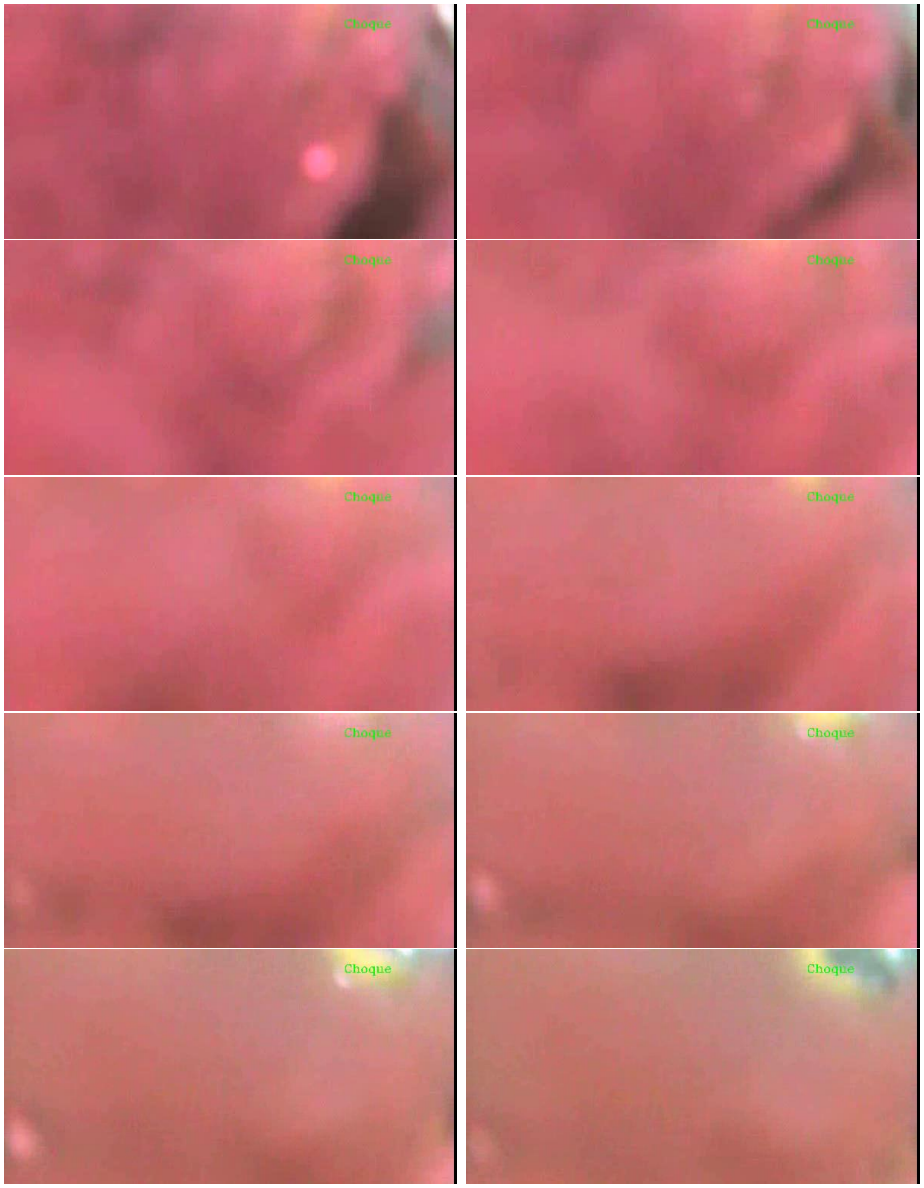

Figura 47: Etiquetado en Secuencia con Choque. (Sobel) (2)

Scharr

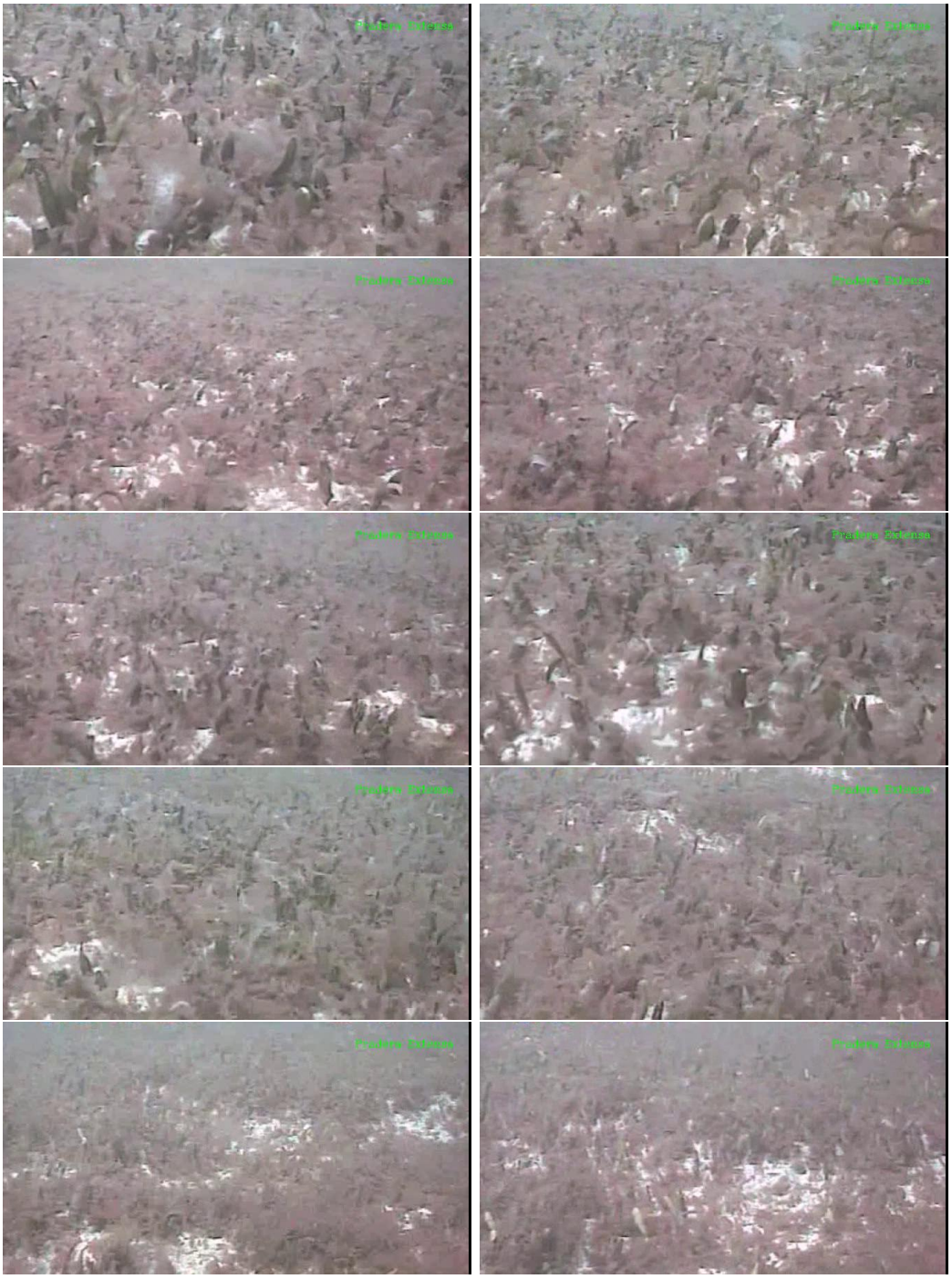

Figura 48: Etiquetado en Secuencia con Pradera Extensa. (Scharr) (1)

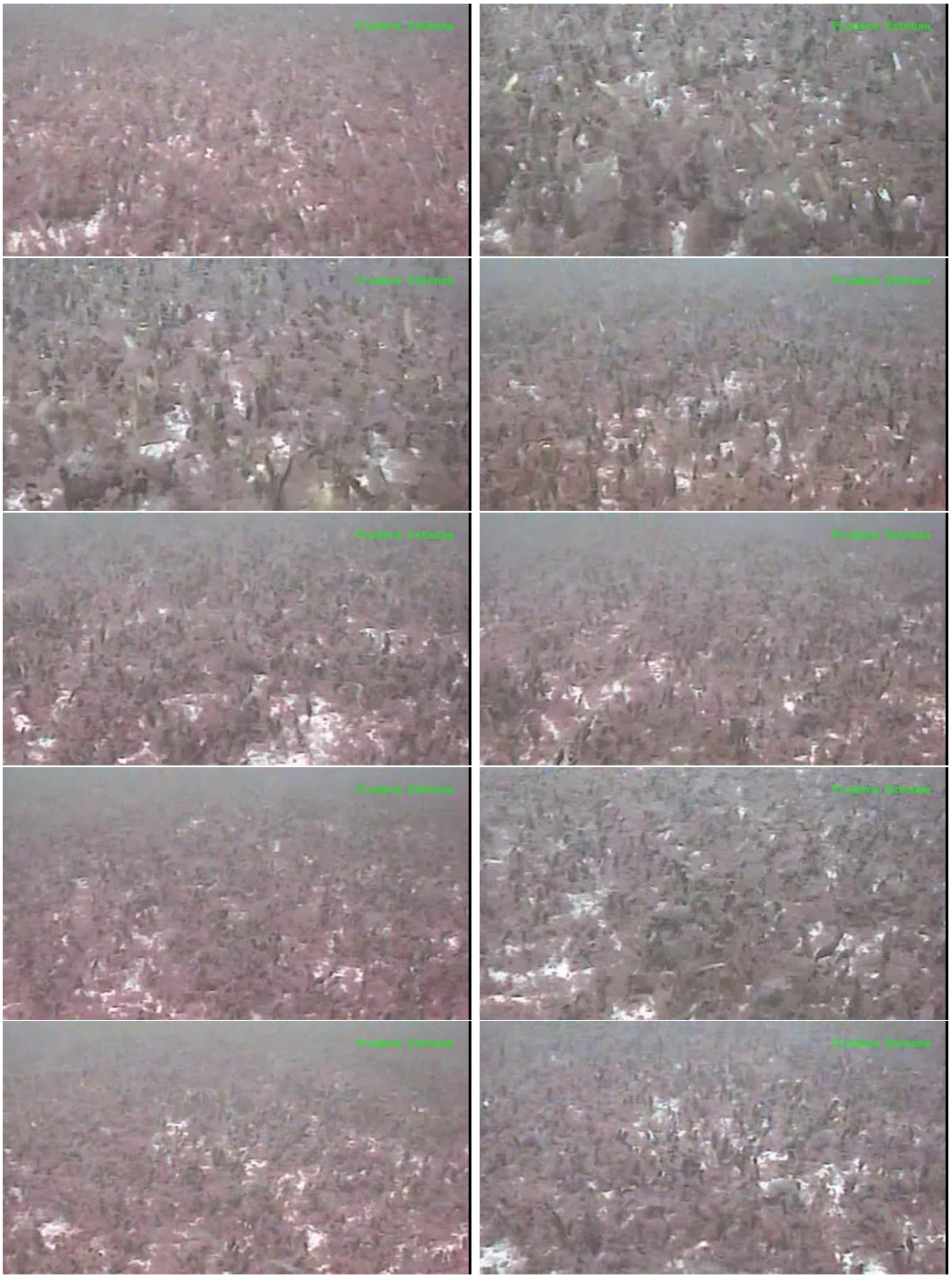

Figura 49: Etiquetado en Secuencia con Pradera Extensa. (Scharr) (2)

Figura 50: Etiquetado en Secuencia con Pradera Escasa. (Scharr) (1)

Figura 51: Etiquetado en Secuencia con Pradera Escasa. (Scharr) (2)

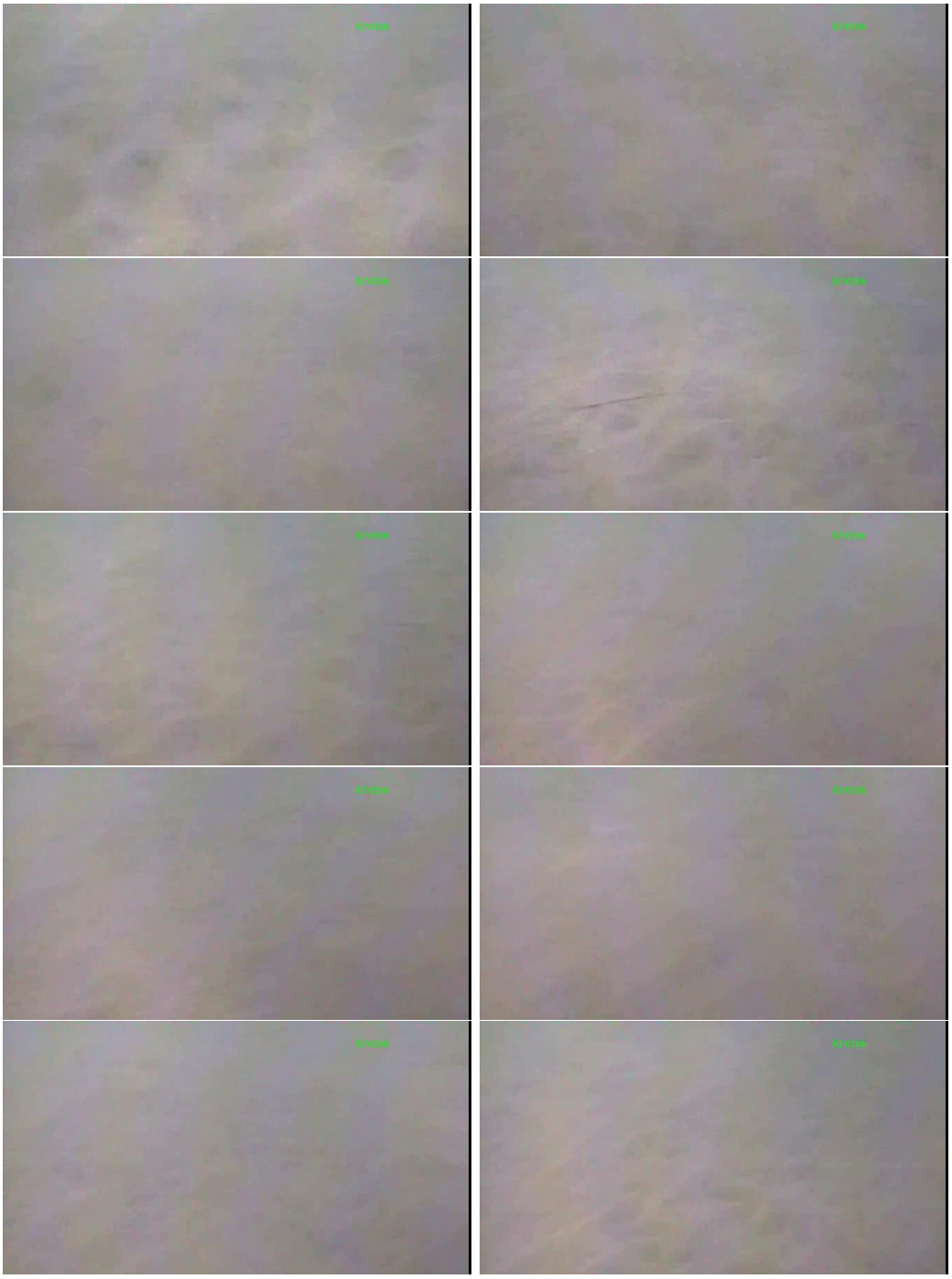

Figura 52: Etiquetado en Secuencia con Arena. (Scharr) (1)

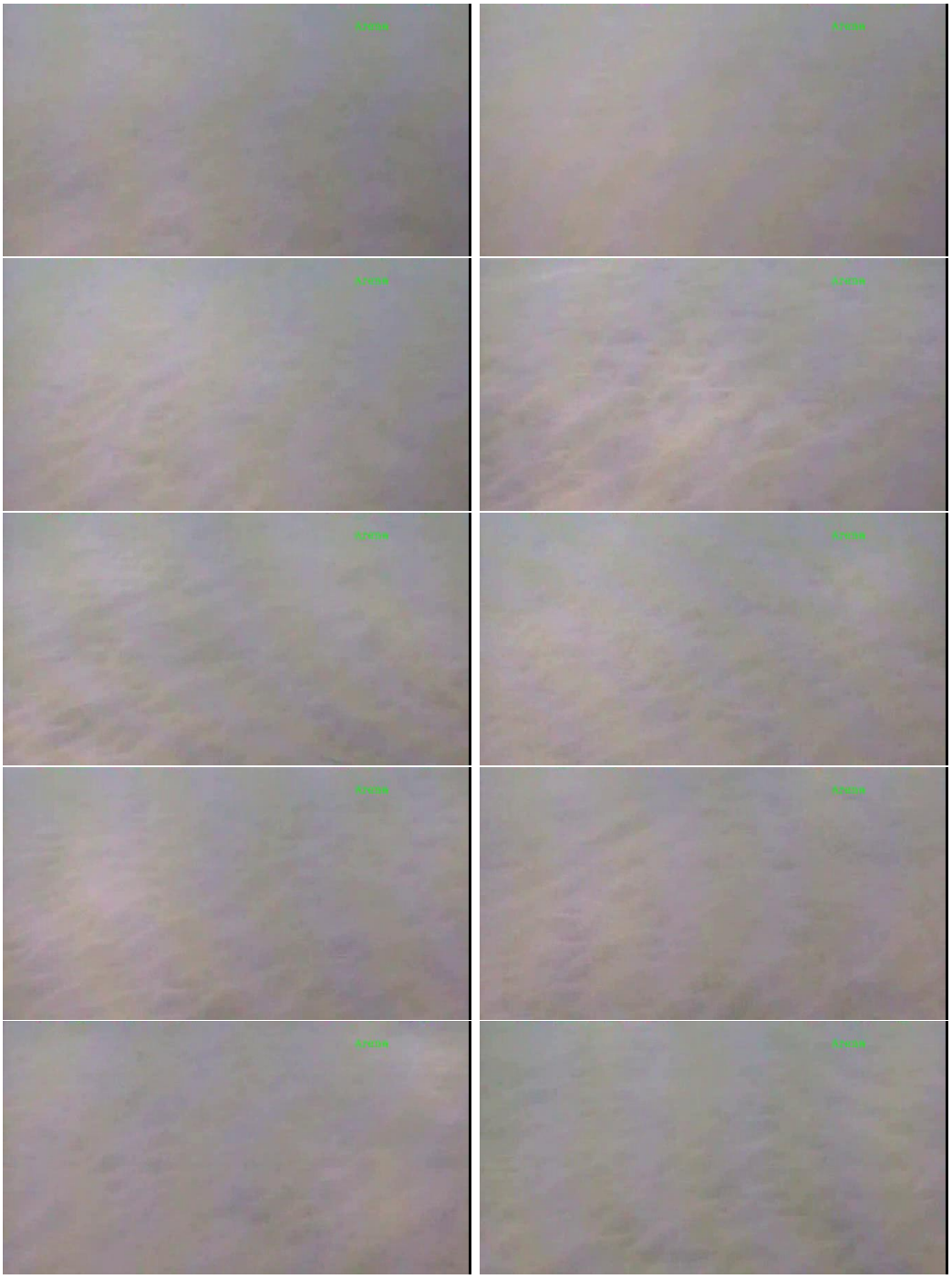

Figura 53: Etiquetado en Secuencia con Arena. (Scharr) (2)

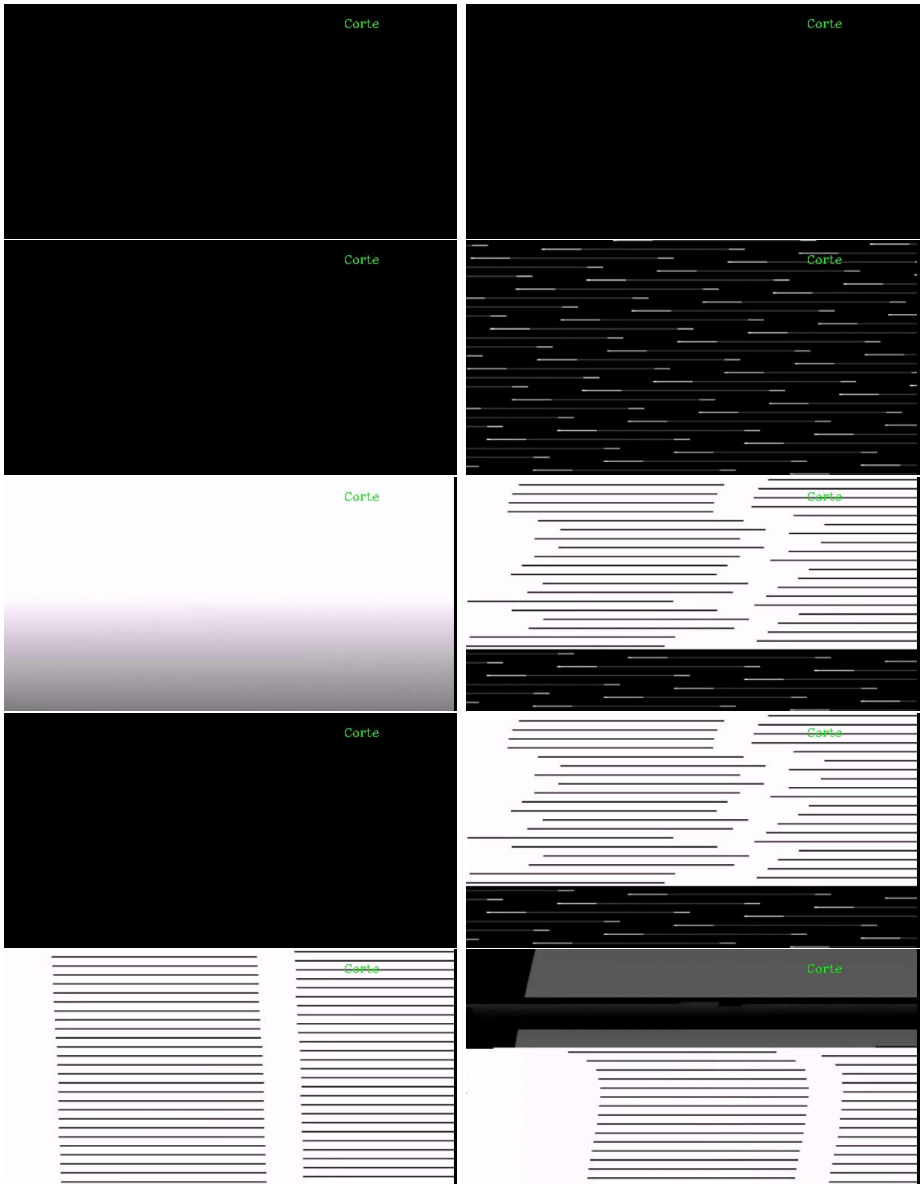

Figura 54: Etiquetado en Secuencia con Corte. (Scharr) (2)

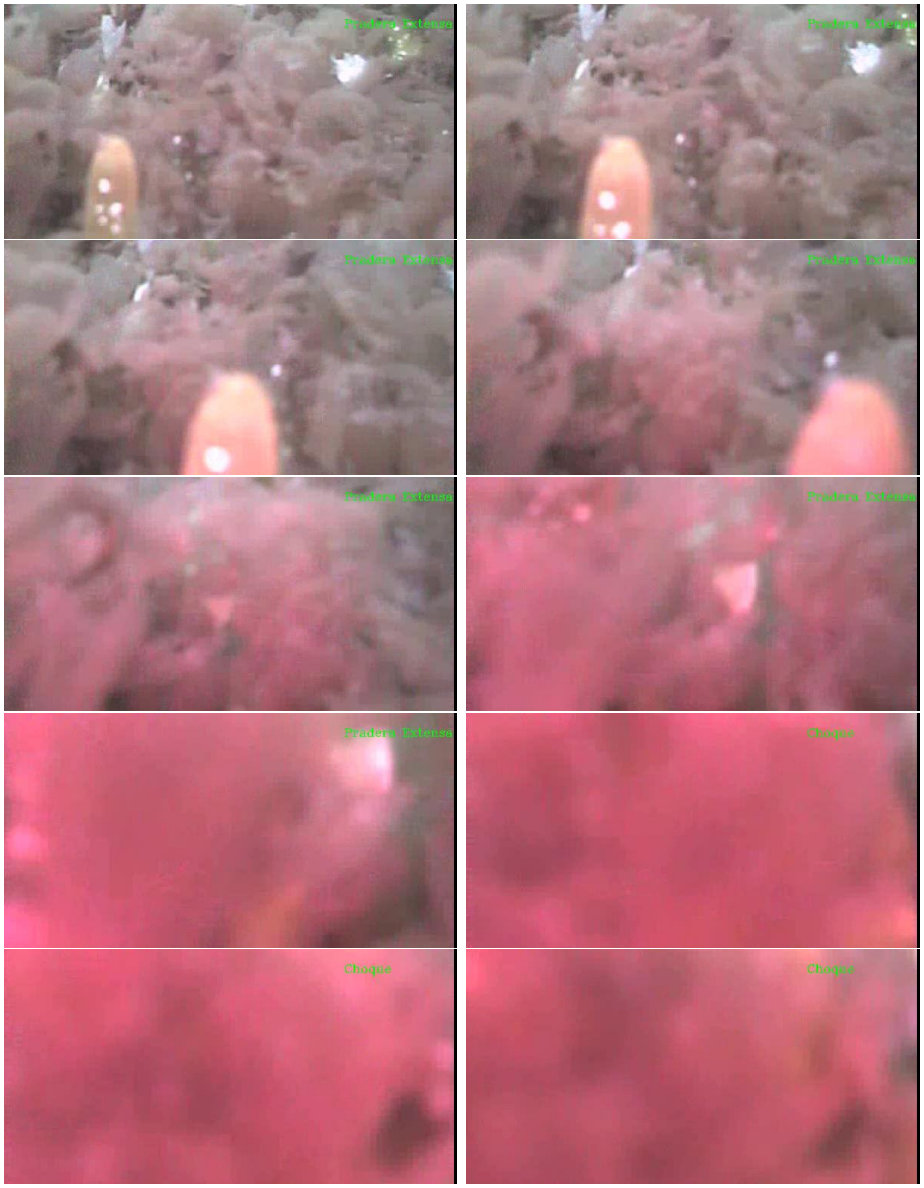

Figura 55: Etiquetado en Secuencia con Choque. (Scharr) (1)

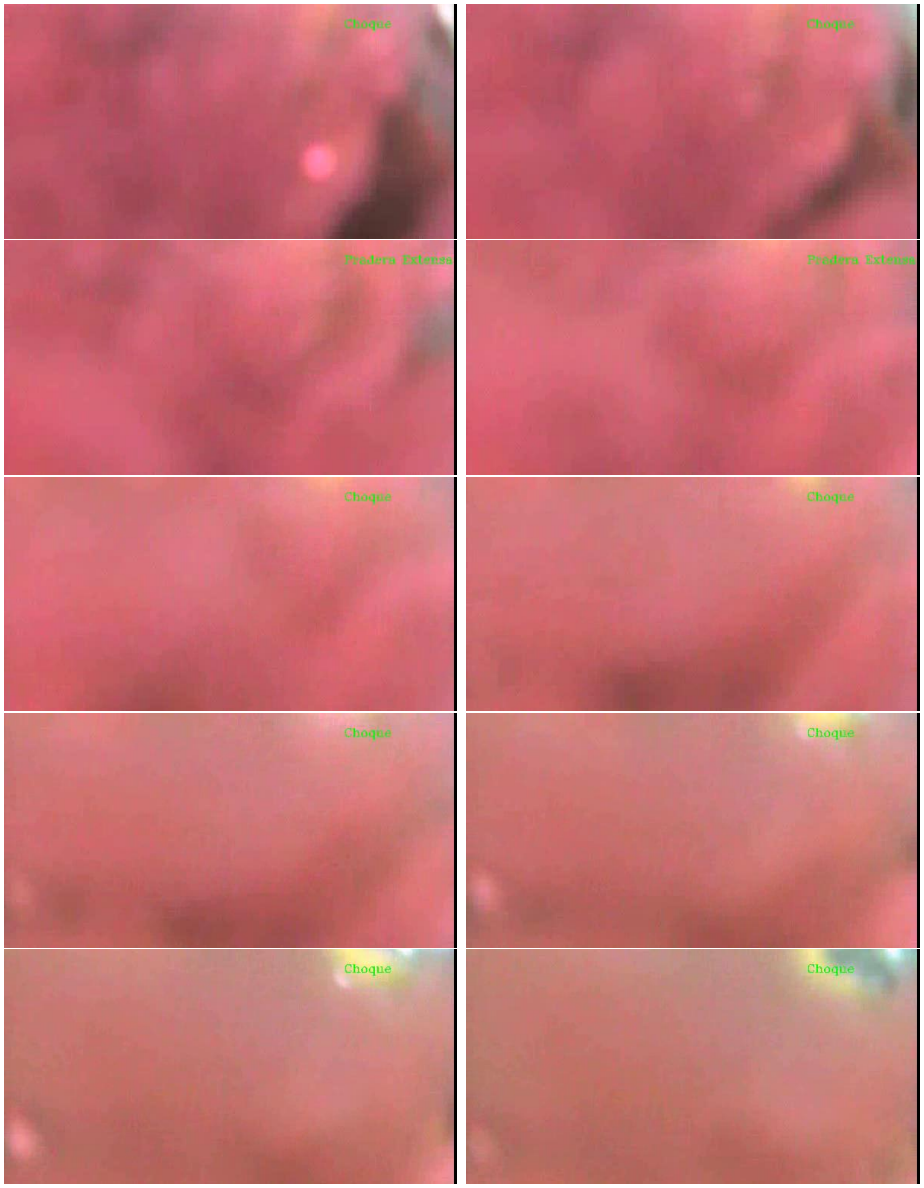

Figura 56: Etiquetado en Secuencia con Choque. (Scharr) (2)

Laplace

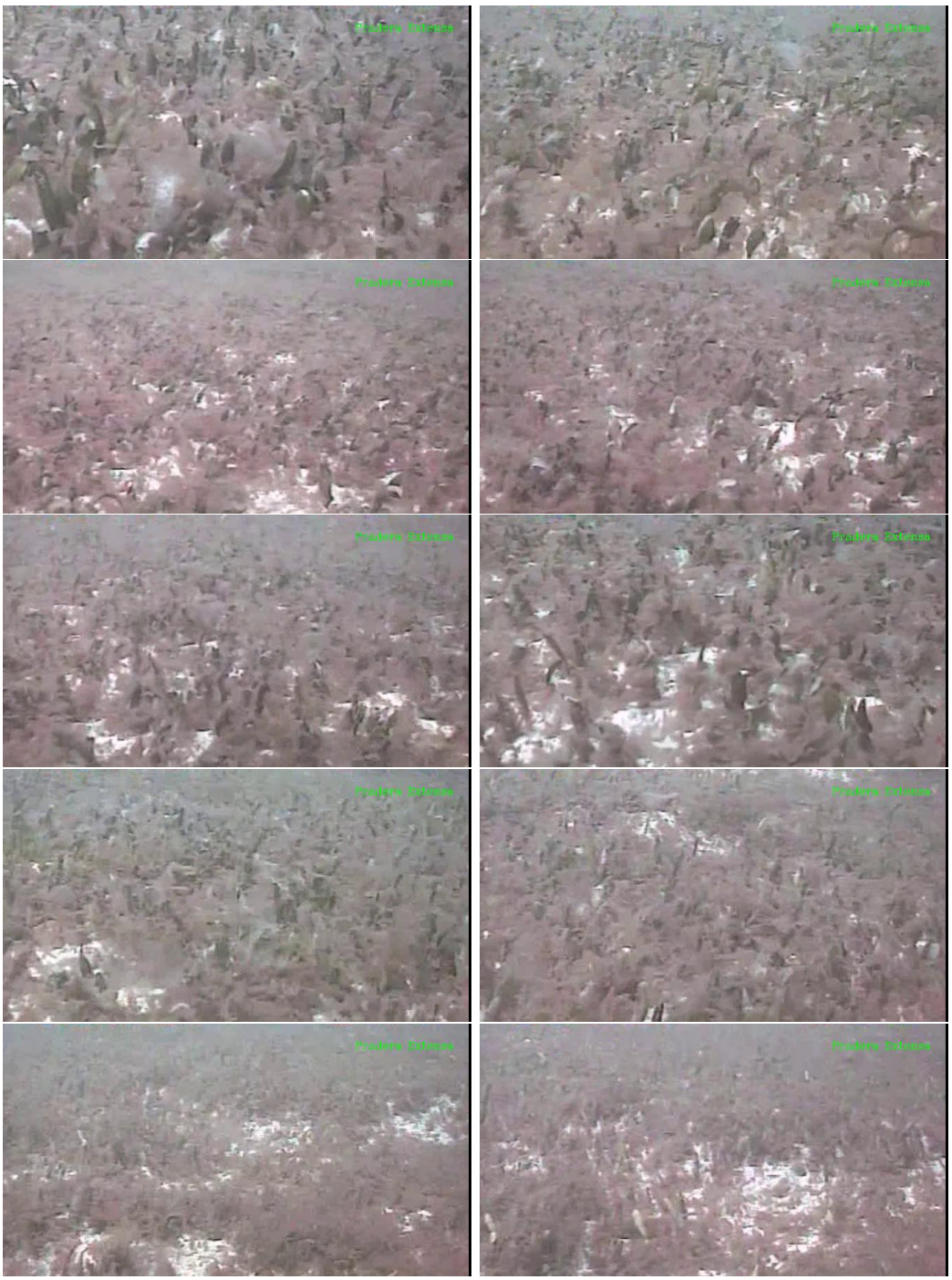

Figura 57: Etiquetado en Secuencia con Pradera Extensa. (Laplace) (1)

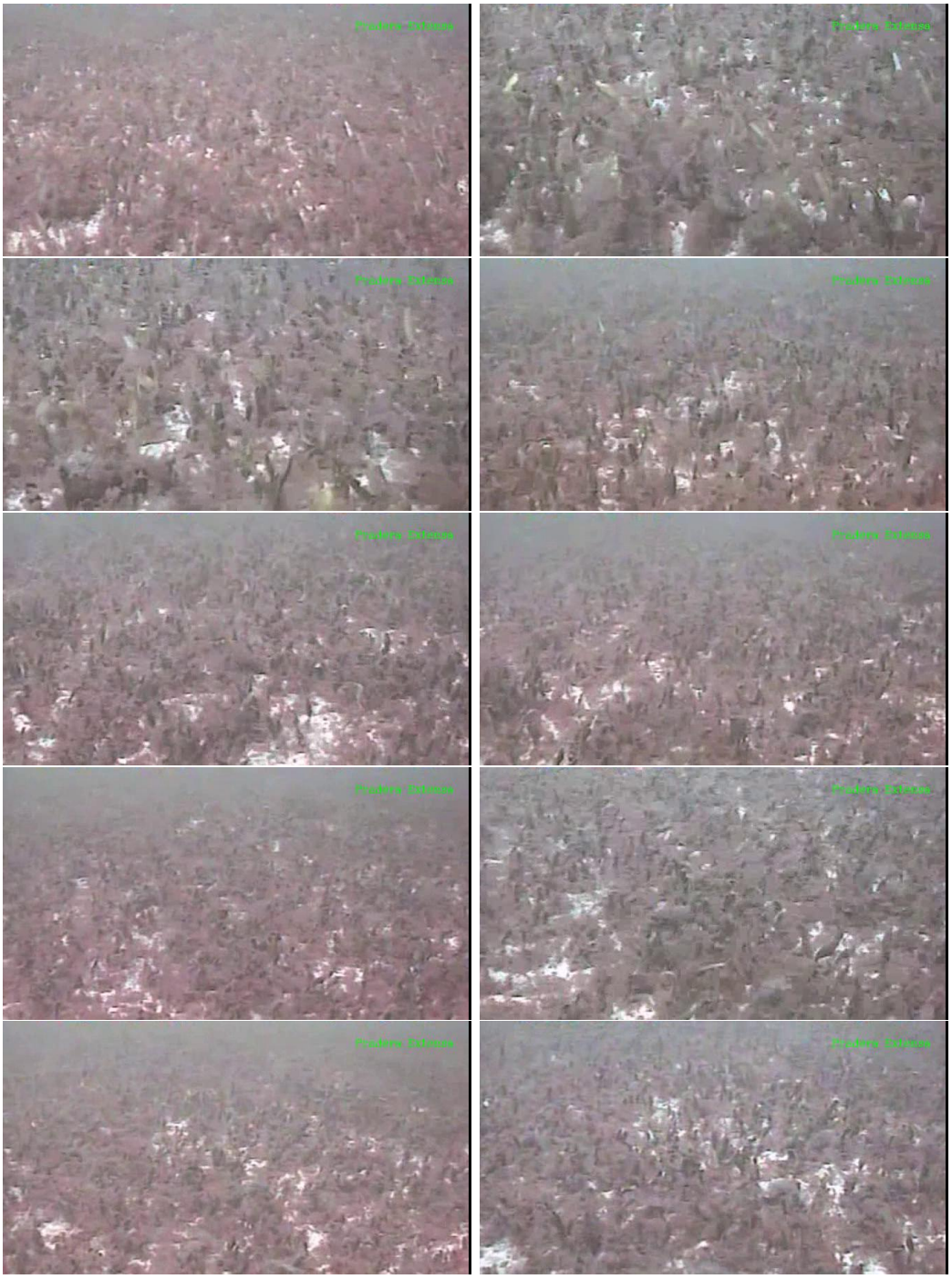

Figura 58: Etiquetado en Secuencia con Pradera Extensa. (Laplace) (2)

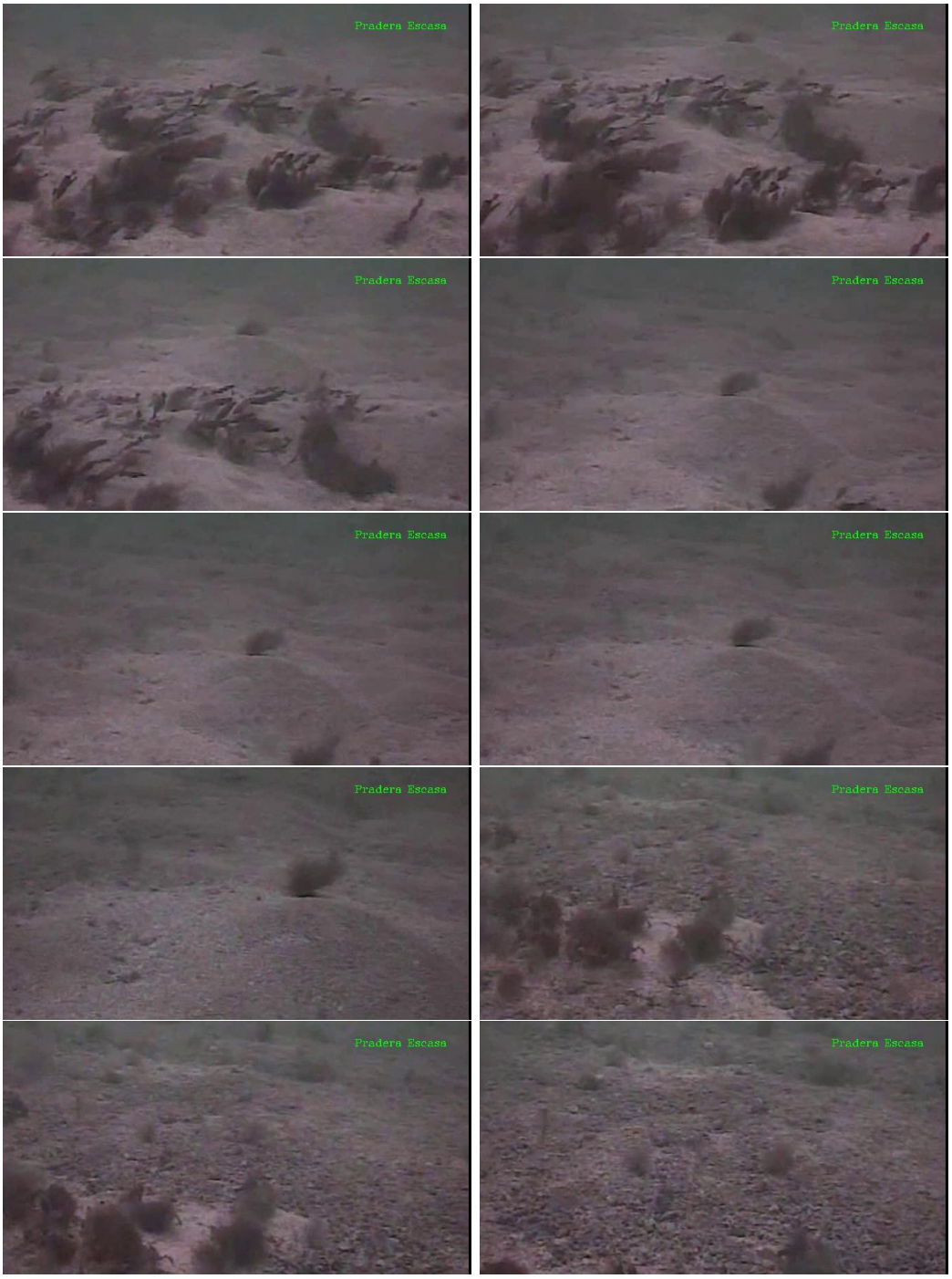

Figura 59: Etiquetado en Secuencia con Pradera Escasa. (Laplace) (1)

Figura 60: Etiquetado en Secuencia con Pradera Escasa. (Laplace) (2)

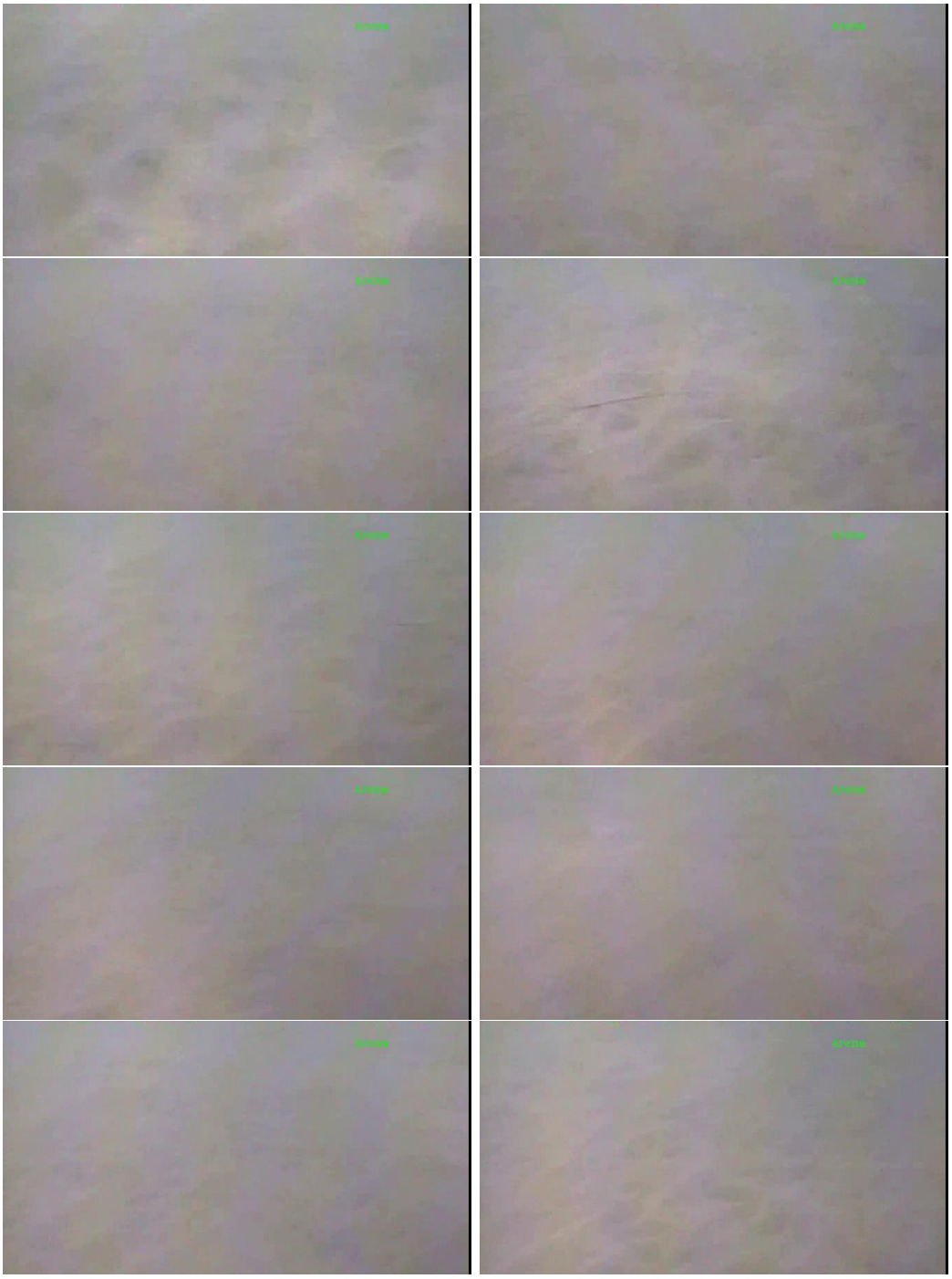

Figura 61: Etiquetado en Secuencia con Arena. (Laplace) (1)

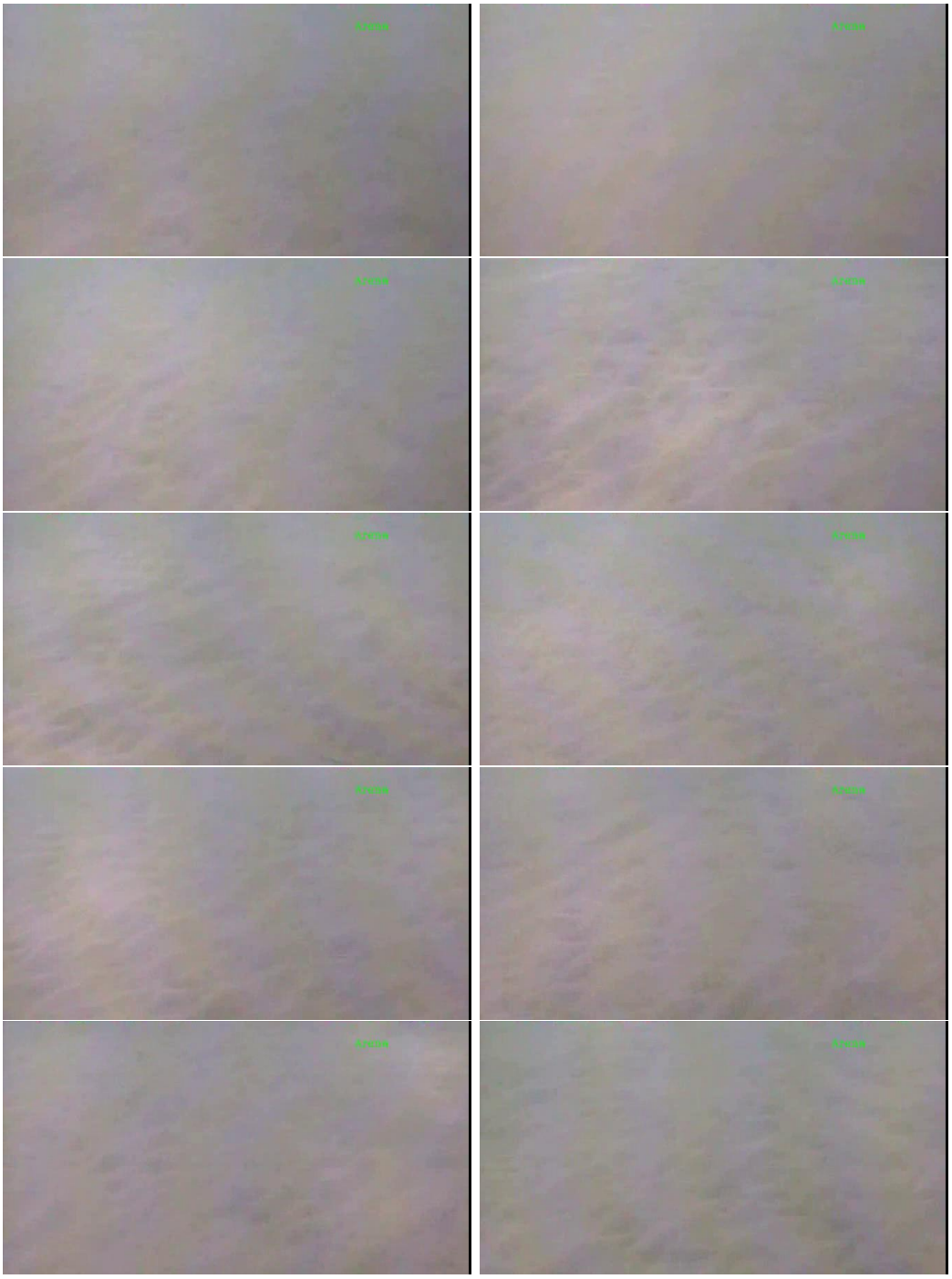

Figura 62: Etiquetado en Secuencia con Arena. (Laplace) (2)

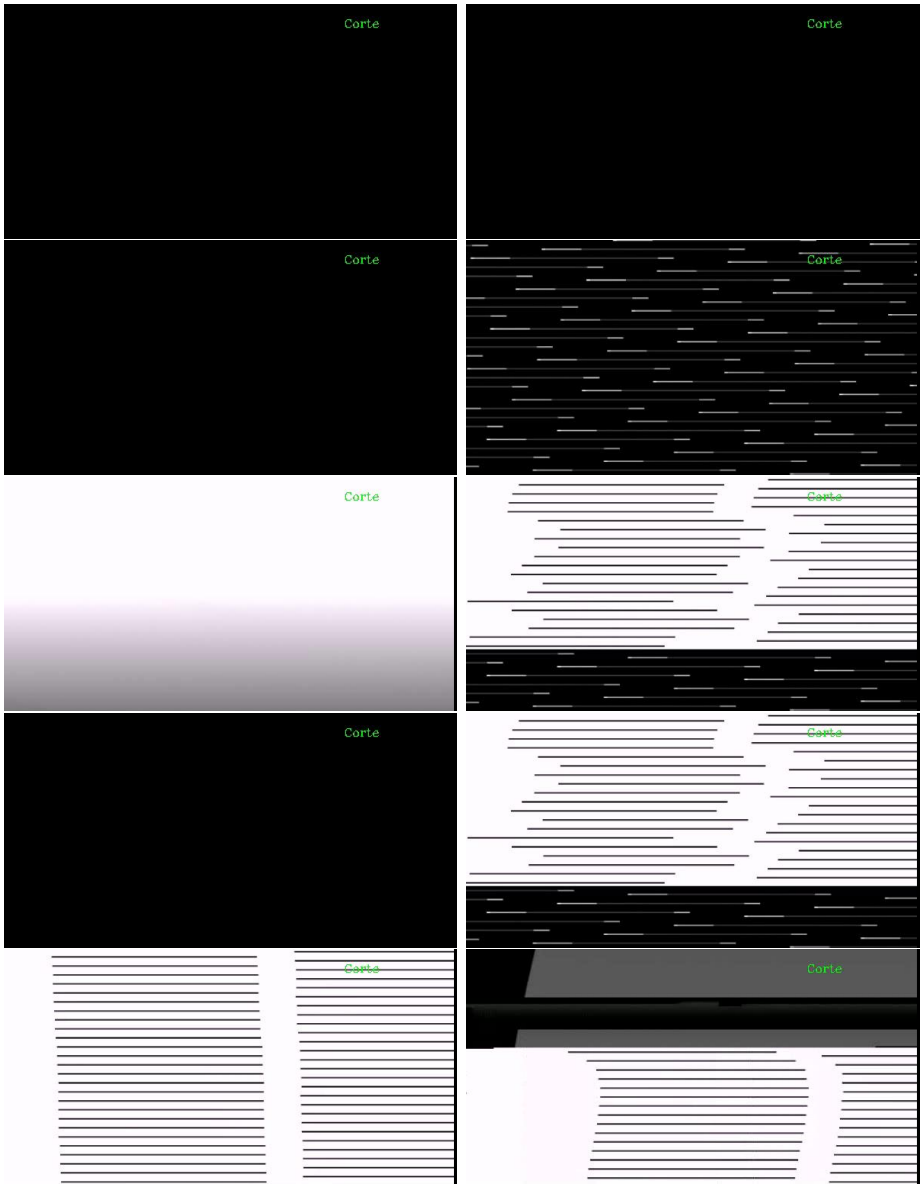

Figura 63: Etiquetado en Secuencia con Corte. (Laplace) (2)

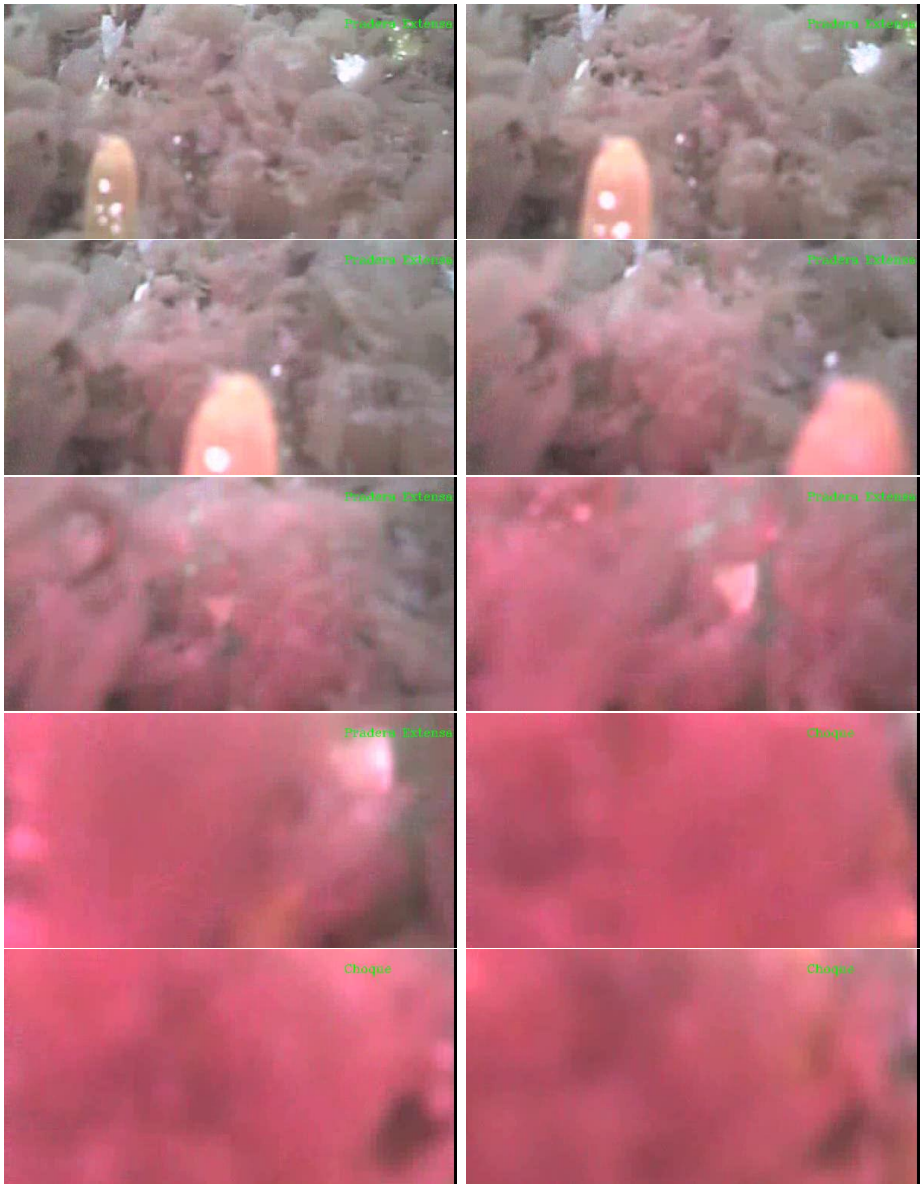

Figura 64: Etiquetado en Secuencia con Choque. (Laplace) (1)

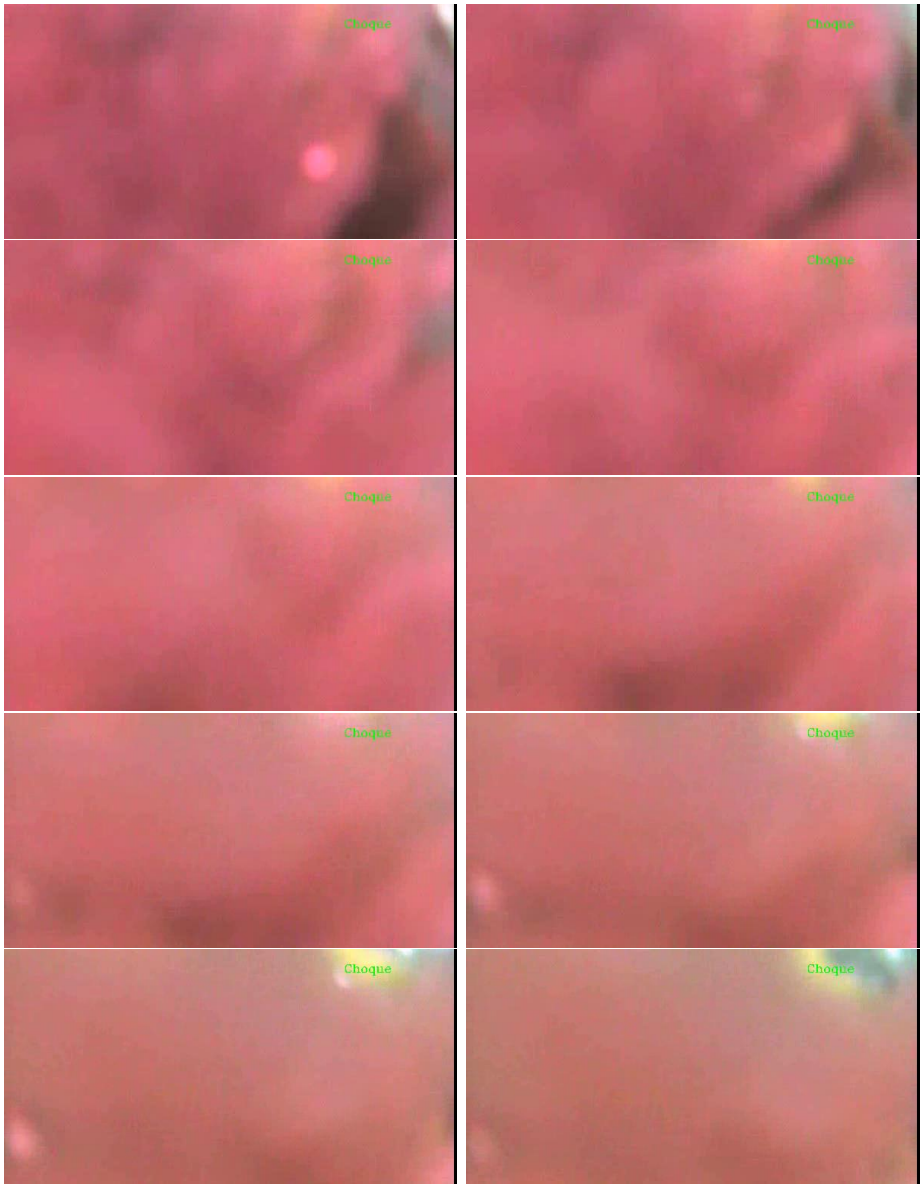

Figura 65: Etiquetado en Secuencia con Choque. (Laplace) (2)

7.4. Estadísticos

A continuación se muestran unas tablas y gráficas resumen de los primeros resultados obtenidos para cada una de las detecciones. Los resultados se han obtenido al comparar la etiqueta que ha asignado el detector a cada frame

con el etiquetado original, comprendiendo éste las clases "Alga", "Arena", "Corte" y "Choque".

En este apartado se introducen algunos términos que se explican a continuación.

Dado un estimador para una variable estadística discreta binaria se definen los siguientes valores asociados importantes:

- **Sensibilidad**[55]: Indica la capacidad del estimador para dar como casos positivos los casos realmente positivos. Se define como:

$$Sensibilidad = \frac{TP}{P} = \frac{TP}{TP + FN} \tag{15}$$

  Donde TP es *Verdaderos Positivos* (*True Positives*) y FN es *Falsos Negativos* (*False Negatives*).

- **Tasa de Falsos Positivos**[56]: Indica los casos que el estimador da como positivos cuando realmente son casos negativos. Se define como:

$$FPR = \frac{FP}{N} = \frac{FP}{FP + TN} \tag{16}$$

  Donde FP es *Falsos Positivos* (*False Positives*) y TN es *Verdaderos Negativos* (*True Negatives*).

- **Accuracy**[57]: Indica la proporción de los buenos resultados. Se define como:

$$ACC = \frac{TP + TN}{P + N} \tag{17}$$

- **Especificidad**[55]: Indica la capacidad del estimador para dar como casos negativos los casos realmente negativos. Se define como:

$$Especificidad = \frac{TN}{N} = \frac{TN}{FP + TN} = 1 - FPR \tag{18}$$

- **Precisión**[57]: Indica la proporción de los verdaderos positivos frente a todos los resultados positivos. Se define como:

$$Precisión = \frac{TP}{TP + FP} \tag{19}$$

- **Negative Predictive Value**[58]: Indica la proporción de los negativos clasificados correctamente. Se define como:

$$NPV = \frac{TN}{TN + FN} \tag{20}$$

Seguidamente se muestran las gráficas mencionadas anteriormente. En éstas se representa la razón de verdaderos positivos frente a la razón de falsos positivos, variando el tamaño de la ventana del filtro de mediana.

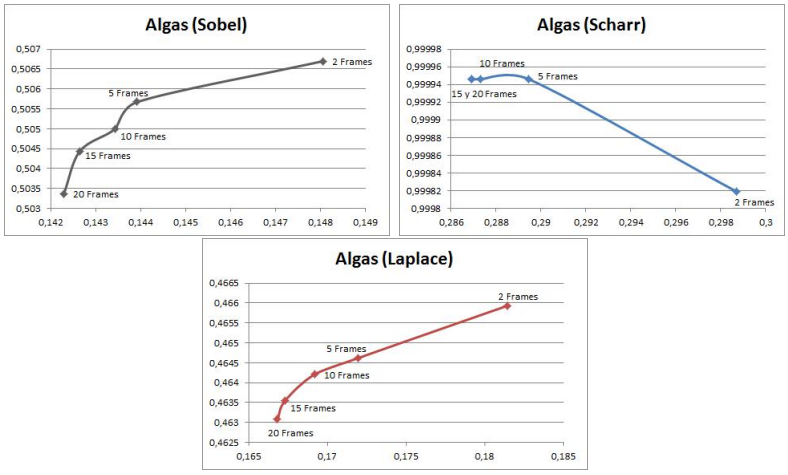

Figura 66: Resultados Algas. (Vídeo 1)

Como se puede observar en la figura 66, el detector de *Scharr* muestra un comportamiento "inverso" al de los otros detectores, así como se detecta también en el resto de las figuras una variabilidad de los resultados en función del detector utilizado.

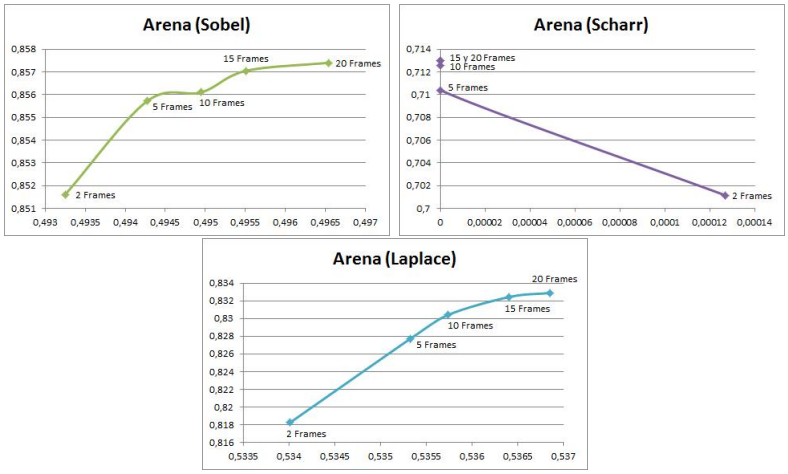

Figura 67: Resultados Arena. (Vídeo 1)

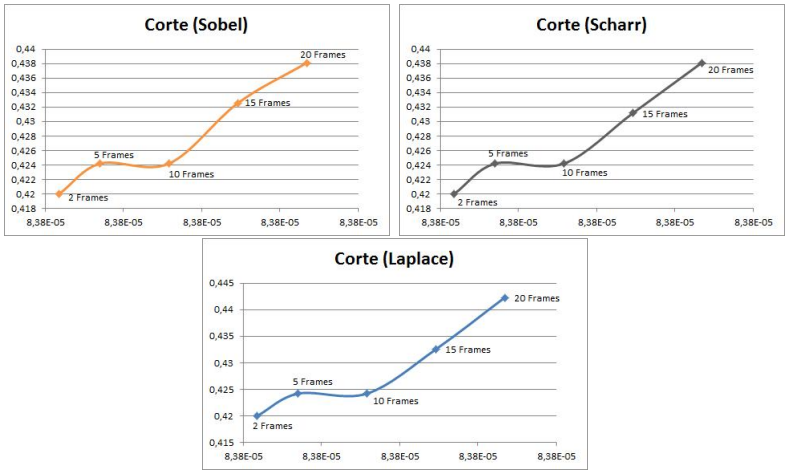

Figura 68: Resultados Corte. (Vídeo 1)

Figura 69: Resultados Choque. (Vídeo 1)

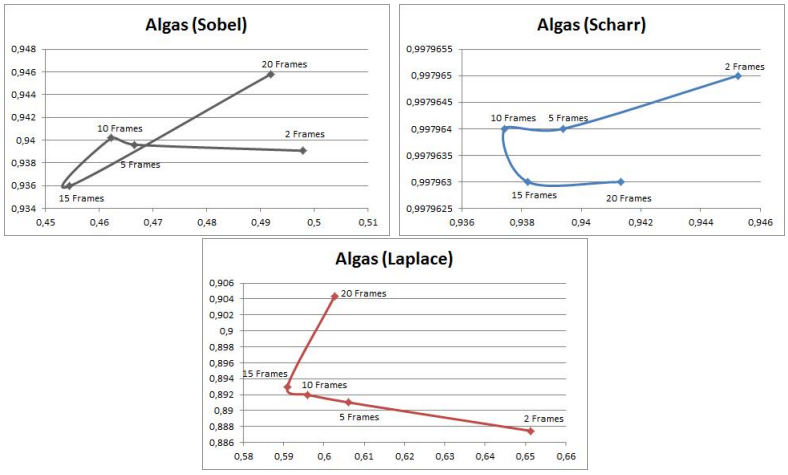

Figura 70: Resultados Algas. (Vídeo 2)

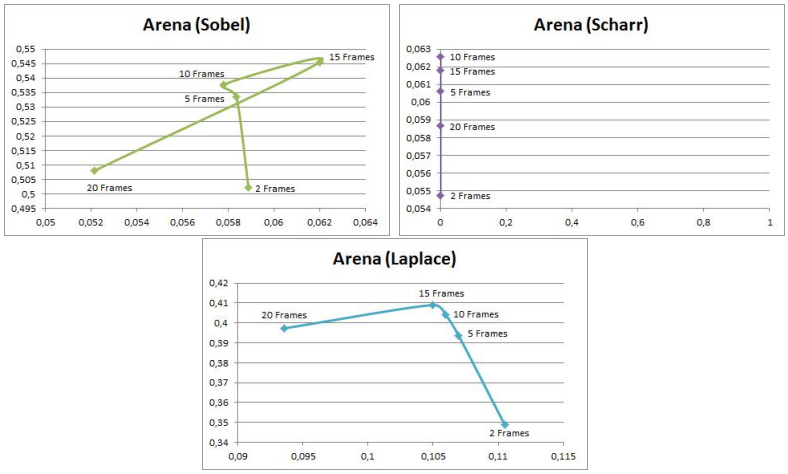

Figura 71: Resultados Arena. (Vídeo 2)

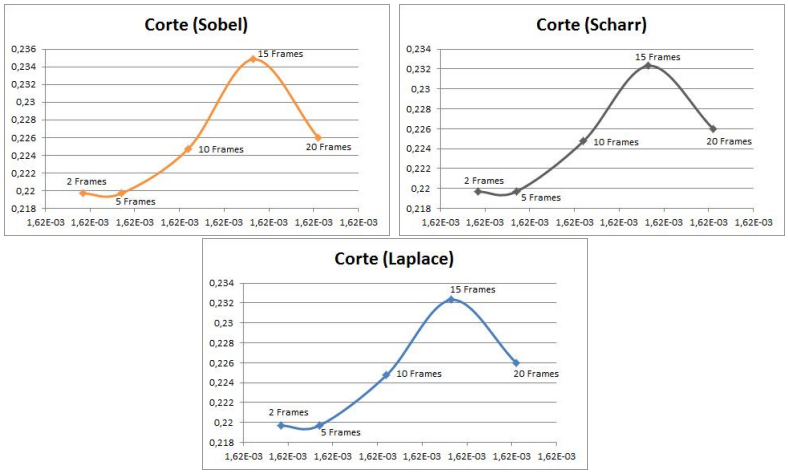

Figura 72: Resultados Corte. (Vídeo 2)

Figura 73: Resultados Choque. (Vídeo 2)

En las figuras 66 y 67 se observa que el detector *Scharr* da mejores resultados que los otros detectores para el primer vídeo, dada su alta tasa de acierto y su baja tasa de falsos positivos.

Sin embargo, las figuras 70 y 71 muestran que el detector *Sobel* obtiene mejores resultados, ya que el detector *Scharr* da una tasa de falsos positivos bastante alta en el caso de las "Algas".

Los resultados muestran también que es más fácil clasificar los escenarios "Arena" y "Pradera Extensa", si bien éste último es más complicado a medida que la cámara se aleja, debido a que la imagen no tiene apenas detalles. La "Pradera Escasa" es más complicada de detectar, debido a que es un escenario intermedio entre los dos mencionados anteriormente.

Los cortes y los choques no tienen muy buena tasa de acierto, si bien los choques se logran detectar muchas veces en el momento en el que suceden, fallando en los frames posteriores.

A continuación, las tablas 1 y 2 muestran algunos de los mejores resultados obtenidos.

Vídeo 1 (Scharr Ventana 20 Frames)

Etiqueta	TPR	FPR	ACC	TNR	PPV	NPV
Algas	99,99 %	28,69 %	88,64 %	71,31 %	84,19 %	100 %
Arena	71,30 %	0 %	88,64 %	100 %	100 %	84,19 %
Corte	43,81 %	0,01 %	84,60 %	99,99 %	97,52 %	99,58 %
Choque	3,33 %	0.03 %	84,60 %	99,97 %	83,23 %	95,80 %

Tabla 1: Resultados Vídeo 1.

Vídeo 2 (Sobel Ventana 15 Frames)

Etiqueta	TPR	FPR	ACC	TNR	PPV	NPV
Algas	93,60 %	45,44 %	89,55 %	54,56 %	94,68 %	50,45 %
Arena	54,56 %	6,20 %	89,55 %	93,79 %	50,45 %	94,68 %
Corte	23,48 %	0,16 %	79,21 %	99,84 %	80,52 %	97,86 %
Choque	10,42 %	0,06 %	79,21 %	99,94 %	95,22 %	90,26 %

Tabla 2: Resultados Vídeo 2.

Las tablas anteriores muestran que los resultados son en algunos casos bastante buenos, si bien son solamente datos orientativos, ya que se le da mayor importancia a la valoración de los expertos.

7.5. Experimentos

A continuación se muestran algunos frames resultantes del etiquetado final, con las subclasificaciones de la categoría “Pradera Extensa” en secuencias de vídeo.

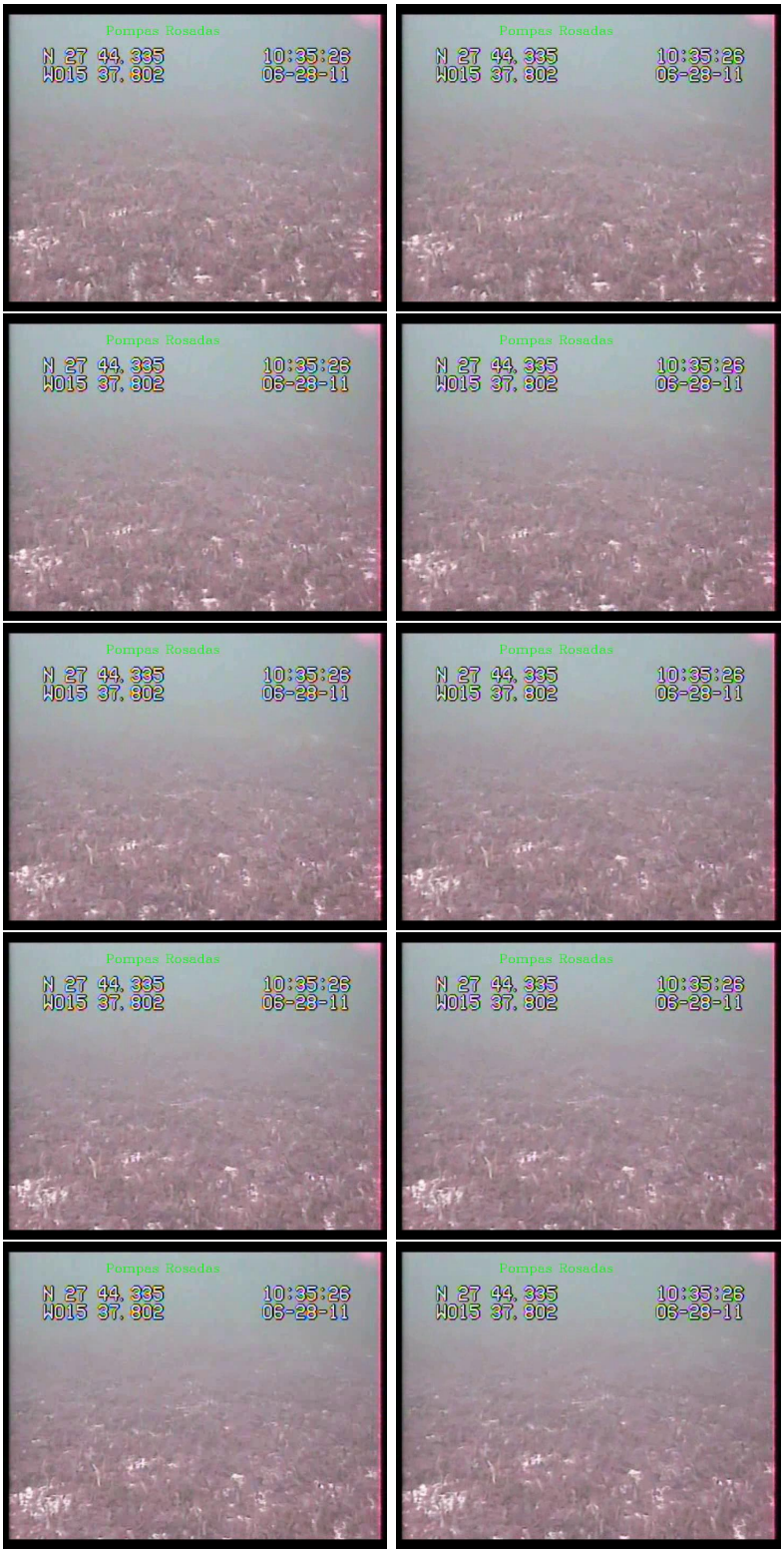

Figura 74: Etiquetado en Secuencia con *Cotoniellas*. (1)

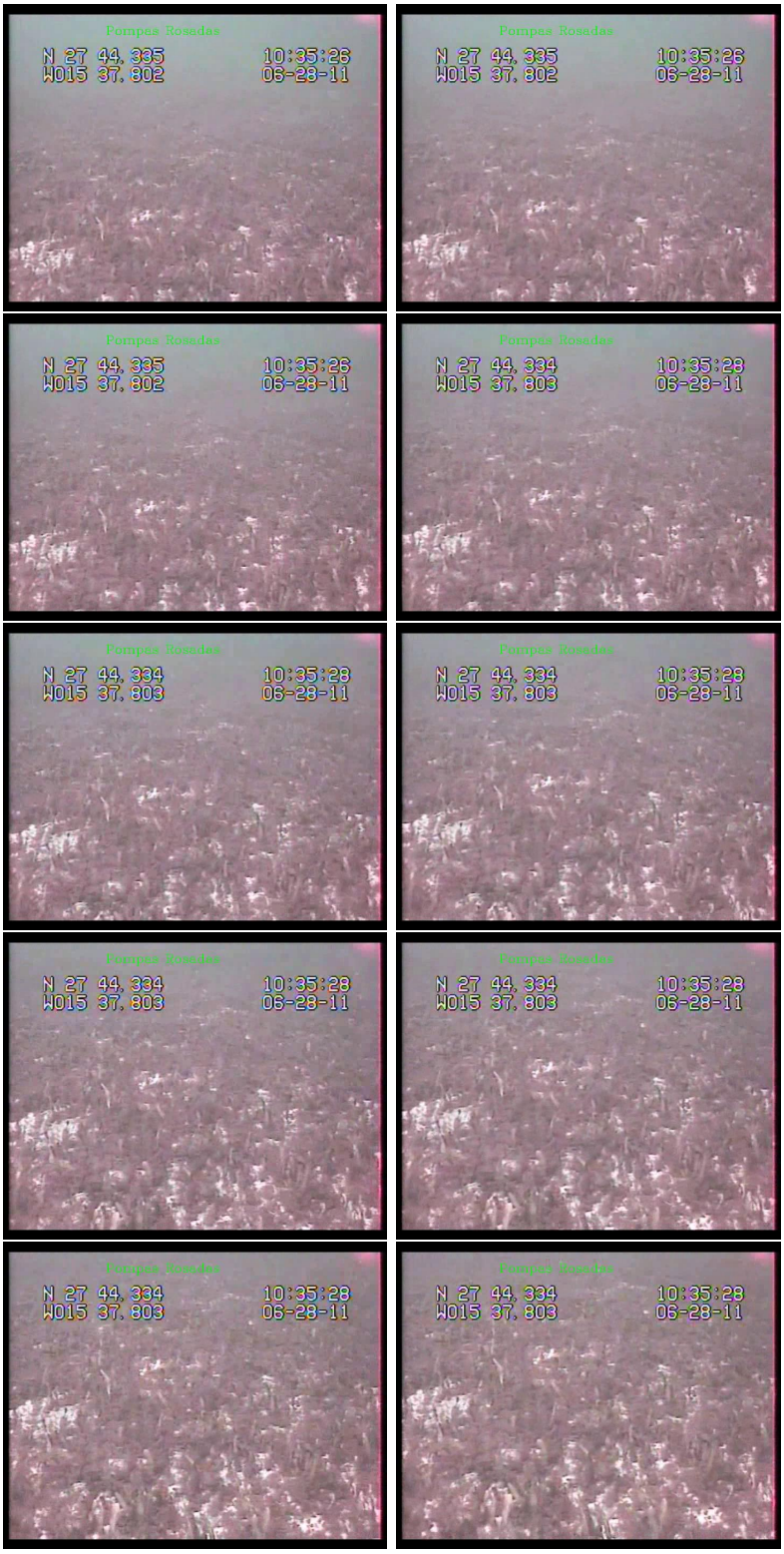

Figura 75: Etiquetado en Secuencia con *Cotoniellas*. (2)

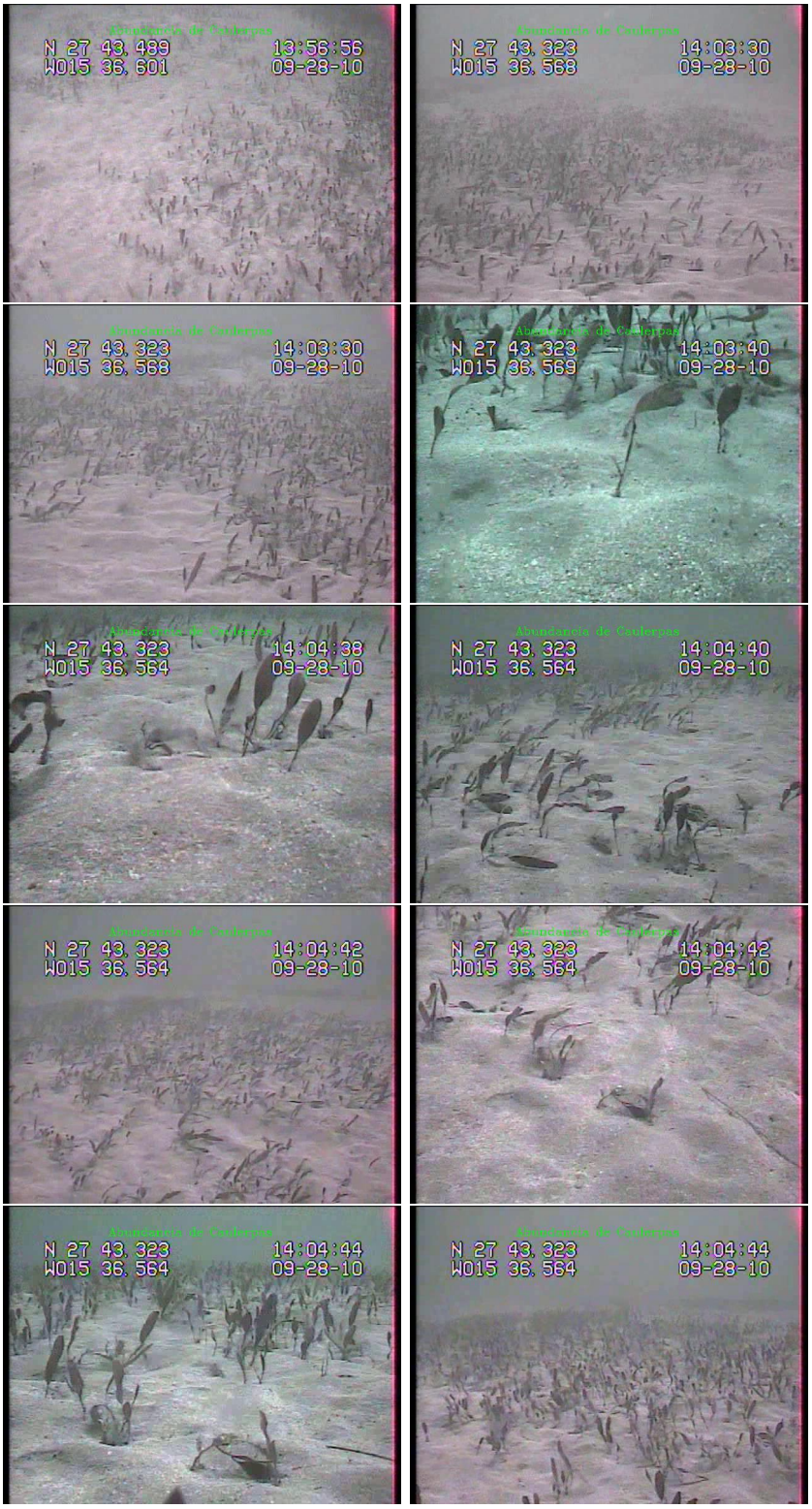

Figura 76: Etiquetado en Secuencia con *Caulerpas*. (1)

Figura 77: Etiquetado en Secuencia con *Caulerpas*. (2)

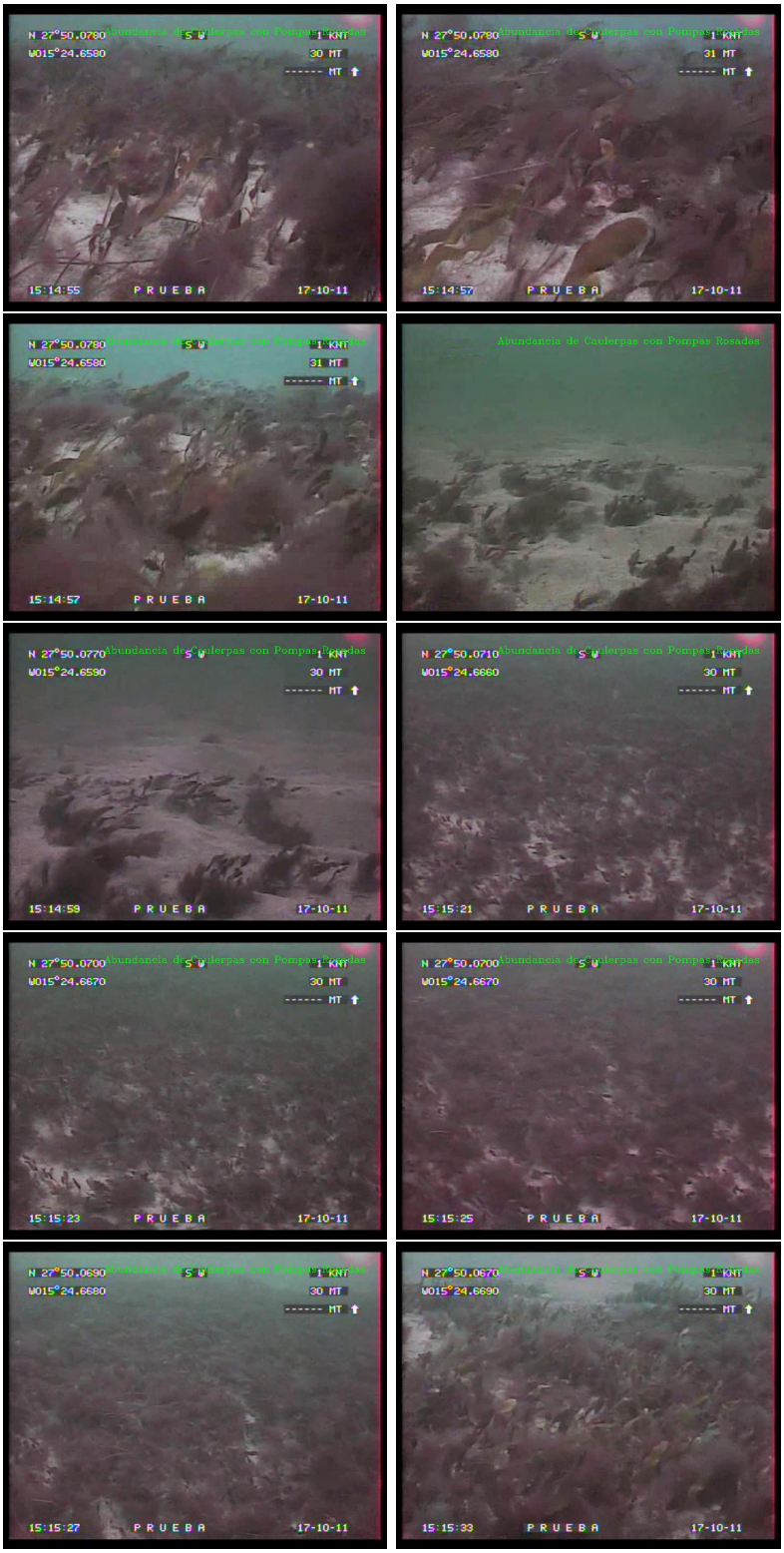

Figura 78: Etiquetado en Secuencia con *Caulerpas* y *Cotoniellas*. (1)

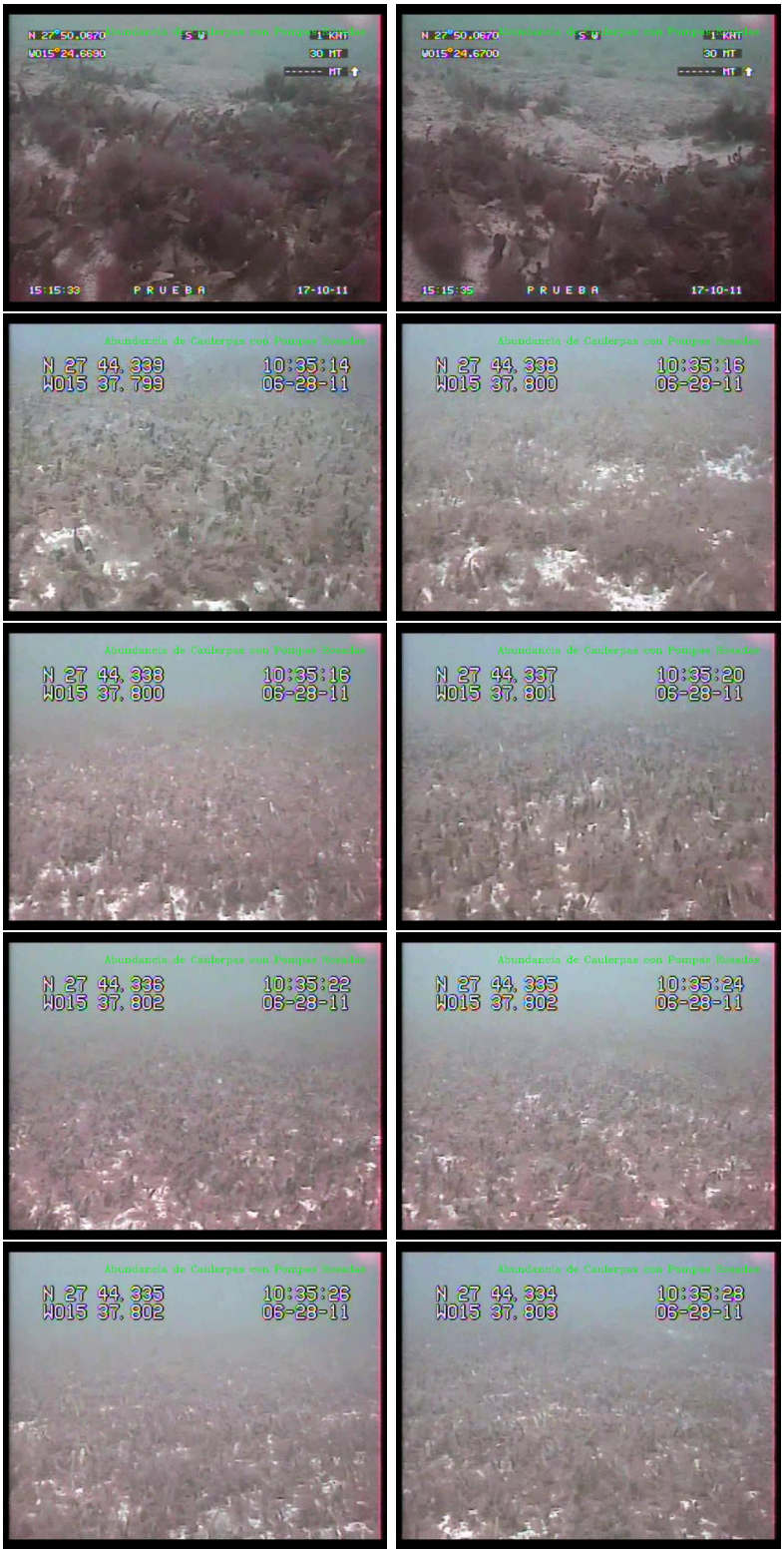

Figura 79: Etiquetado en Secuencia con *Caulerpas* y *Cotoniellas*. (2)

Los resultados obtenidos se mostraron a expertos y se les pidió que valorasen el etiquetado, obteniéndose la tabla 3.

Etiquetado	**Valoración de 1 (mala) a 5 (excelente)**
Caulerpas	4-5-5
Pompas Rosadas	4-4-5
Caulerpas con Pompas Rosadas	4-5-5
Arena	5-5-5
Pradera Escasa	3-5-5
Choque	–5-5

Tabla 3: Valoración realizada por expertos.

8. CONCLUSIONES

El desarrollo de este Trabajo de Fin de Máster ha llevado a diversas conclusiones como:

- Los métodos de clasificación pueden ser útiles en el campo de estudio, si bien tiene como limitación la no disponibilidad de un conjunto de muestras de aprendizaje más amplio y representativo.
- En cuanto a los resultados obtenidos por cada detector se observa que los detectores *Sobel* y *Scharr* dan mejores resultados que el detector *Laplace*, si bien el detector *Scharr* da una tasa de falsos positivos bastante alta para algunos escenarios.
- Se observa que es más fácil clasificar los escenarios "Arena" y "Pradera Extensa", si bien éste último es más complicado a medida que la cámara se aleja, debido a que la imagen no tiene apenas detalles. La "Pradera Escasa" es más complicada de detectar, debido a que es un escenario intermedio entre los dos mencionados anteriormente.
- La valoración de los expertos ha sido muy favorable, por lo que se considera que se ha logrado un éxito notable.
- Se ha descubierto que las condiciones ópticas de operación a larga distancia dificultan de forma importante la detección. Por ello, sería interesante tener algún método para saber la distancia a la que se encuentra la cámara del fondo como, por ejemplo, un altímetro.
- Facilita el trabajo en estudios que requieren un esfuerzo adicional por el uso de buceadores.
- Puede abrir las puertas a otro tipo de estudios o facilitarlos si contribuye a eliminar la necesidad de la anotación manual de los vídeos.
- Se percibe la dificultad que presenta el cabeceo de la cámara. Esto se podría mejorar equilibrando el trineo que lleva dicha cámara, logrando un trineo "estable" en pose y en altura sobre el fondo.
- También se podrían conseguir mejores resultados con unas secuencias de vídeos de mejor calidad en cuanto a imagen, por lo que podría ser interesante también una cámara de mejor calidad.

9. PROPUESTAS FUTURAS

Como posibles ideas futuras se proponen:

- Intentar mejorar los detectores empleando un conjunto de entrenamiento y test más amplio y de mejor calidad.
- Posibilidad de detectar también otro tipo de algas marinas, como por ejemplo, las sebas, o animales marinos que puedan resultar de interés en estudios de relación o asociación entre especies.
- Estudio de otras técnicas de visión por computador y posible combinación con las estudiadas en este trabajo.
- Reconocer, mediante técnicas de *OCR* [59], los caracteres de latitud/longitud sobreimpuestos por el *OSD* [60] en el vídeo para poder producir la trayectoria del trineo.

Apéndices

A. INSTALACIÓN DE OPENCV

El sitio principal de *OpenCV* se encuentra en **SourceForge** en http://sourceforge.net/projects/opencvlibrary/ y la página de *Wiki* de *OpenCV* está en http://opencvlibrary.sourceforge.net/. Para *Linux*, la última distribución que se usó fue la 2.4.2, de la página http://sourceforge.net/projects/opencvlibrary/files/opencv-unix/2.4.2/. Seleccionando el archivo **OpenCV-2.4.2.tar.bz2**. Sin embargo, la versión más actualizada está siempre en el servidor *CVS*[61] (*Concurrent Versions System*) en **SourceForge**.

Una vez descargadas las librerías, se deben instalar. Para obtener instrucciones detalladas de instalación en *Linux* o *Mac OS*, se puede consultar el archivo de texto llamado **INSTALL** que se encuentra en el directorio **.../opencv/**. Este archivo también describe cómo compilar y ejecutar las rutinas de prueba de *OpenCV*. El fichero enumera los programas adicionales que se necesitan para convertirse en un desarrollador de *OpenCV*, como **autoconf**, **automake**, **libtool** y **swig**.

En la versión de *OpenCV* para *Linux* no están incluidos los binarios precompilados, debido a la gran variedad de versiones de **gcc** y **glibc** en las diferentes distribuciones (**SuSE**, **Debian**, **Ubuntu**, etc.) Si la distribución que se utiliza no ofrece *OpenCV*, será necesario compilarlo a partir de los fuentes, como se detalla en el archivo **.../opencv/INSTALL**.

Para compilar las librerías y las demos, se necesita **GTK+2.x** o superior, incluyendo las cabeceras. También son necesarios **pkgconfig**, **libpng**, **zlib**, **libjpeg**, **libtiff** y **libjasper**. También son necesarias **libavcodec** y las demás librerías **libav** (incluidas las cabeceras) de **ffmpeg**.

ffmpeg se puede descargar de http://ffmpeg.mplayerhq.hu/download.html. El programa **ffmpeg** tiene una licencia *LGPL*[62] (*Lesser General Public License*). Para usarla con software de tipo no *GPL*[63] (como *OpenCV*), hay que compilarlo y usar una librería de **ffmpeg** compartida:

```
./configure –enable-shared
make
sudo make install
```

Para compilar *OpenCV* una vez descargado:

```
./configure
make
sudo make install
sudo ldconfig
```

Una vez completa la instalación, la ruta de instalación por defecto es **/usr/local/lib/** y **/usr/local/include/opencv/**. Por lo tanto, es necesario añadir **/usr/local/lib** a **/etc/ld.so.conf** (y ejecutar **ldconfig** después) o añadirla a la variable de entorno **LD_LIBRARY_PATH**; después ya se ha terminado.

Alternativamente, se puede añadir **<ruta_de_instalación>/bin** y **<ruta_de_instalación>/bin/linux32**, uno por línea a **/etc/ld.so.conf** y luego ejecutar **ldconfig** como **root** (o usando el comando **sudo**).

Eso es todo, si se quieren más detalles, se puede ver **.../opencv/INSTALL**.

Obtener el último OpenCV mediante CVS

OpenCV está en constante desarrollo y los errores se arreglan a menudo rápidamente cuando los informes de errores contienen descripciones precisas y el código que muestra el error. Sin embargo, las versiones oficiales de *OpenCV* se lanzan sólo una o dos veces al año. Si se está desarrollando seriamente un proyecto o producto, es probable que se deseen correcciones de código y actualizaciones tan pronto como estén disponibles. Para ello, se tendrá que acceder al *Sistema de Versiones Concurrentes* de *OpenCV* (*Concurrent Versions System* o *CVS*) en **SourceForge**.

En *Linux* se pueden usar los siguientes comandos:

```
cvs -d:pserver:anonymous@opencvlibrary.cvs.sourceforge.net:/cvsroot/opencvlibrary
login
```

Cuando se pregunte por una clave, se presiona la tecla **ENTER**. A continuación se usa:

```
cvs -z3 -d:pserver:anonymous@opencvlibrary.cvs.sourceforge.net:/cvsroot/opencvlibrary
co -P opencv
```

Referencias

[1] Espino, F., F. Tuya, I. Blanch y R. J. Haroun, 2008. Los sebadales en Canarias. Praderas de fanerógamas marinas. BIOGES, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 68 pp. 2, 2

[2] Truquet P., P. Lassus, G. Honscll, L. Le Déan. Application of a digital pattern recognition system to *Dinophysis acuminata* and D. sacculus complexes; Aquat. living Resour., Volume 9, 1996, Pages 273-279. 1

[3] Lebart, K., C. Smith, E. Trucco, and D.M. Lane. Automatic indexing of underwater survey video: algorithm and benchmarking method; JOE Oct 2003 673-686. 1

[4] Bailey Bernard C., Joel H. Blatt, Frank M. Caimi. Radiative Transfer Modeling and Analysis of Spatially Variant and Coherent Illumination for Undersea Object Detection; JOE Oct 2003 570-582. 1

[5] Gerig, Anthony L., Anthony P. Lyons, E. Pouliquen, Kevin L. Williams. Comparison of Seafloor Roughness and Scattered Acoustic Temporal Decorrelation; JOE Oct 2009 423-430. 1

[6] H. van Rein, C.J. Brown, R. Quinn, J. Breen, D. Schoeman, An evaluation of acoustic seabed classification techniques for marine biotope monitoring over broad-scales ($> \mathbf{1km^2}$) and meso-scales ($\mathbf{10m^2}$–$\mathbf{1km^2}$), Estuarine, Coastal and Shelf Science, Volume 93, Issue 4, 20 July 2011, Pages 336-349, ISSN 0272-7714. 1

[7] Preston, Jon M., Ben R. Biffard. Comments on "Principal Component Analysis of Single-Beam Echo-Sounder Signal Features for Seafloor Classification" by A. R. Amiri-Simkooei, M. Snellen, and D. G. Simons; JOE Oct 2012 764-765. 1

[8] Amiri-Simkooei, A. R., M. Snellen, D. G. Simons. Principal Component Analysis of Single-Beam Echo-Sounder Signal Features for Seafloor Classification"; JOE Abr 2011, vol. 36, no. 2, pp 259-271. 1

[9] Rife, J., and S.M. Rock. Segmentation methods for visual tracking of deep-ocean jellyfish using a conventional camera; JOE Oct 03 595-608. 2

[10] Ma. Shiela Angeli C. Marcos, Maricor N. Soriano and Caesar A. Saloma. Classification of coral reef images from underwater video using neural networks; 31 Oct 2005, Opt. Express, Volume 13 No. 22. 2

[11] Zhang, Yanwu, Robert S. McEwen, John P. Ryan, James G. Bellingham. Design and Tests of an Adaptive Triggering Method for Capturing Peak Samples in a Thin Phytoplankton Layer by an Autonomous Underwater Vehicle; JOE Oct 2010 785-796. 3

[12] Negahdaripour, S., and H. Madjidi. Stereovision imaging on submersible platforms for 3-D mapping of benthic habitats and sea-floor structures; JOE Oct 03 625-650. 3

[13] Fernando Tuya, Harue Hernandez-Zerpa, Fernando Espino, Ricardo J. Haroun, Drastic decadal decline of the seagrass Cymodocea nodosa at Gran Canaria (eastern Atlantic): interactions with the green algae Caulerpa prolifera. 3

[14] Patnaik, S. and Yang, Y.M. (2012). Soft Computing Techniques in Vision Science. 395. Springer. 5.1.1

[15] Vladimir Komsiyski, Dr. Andreas Nüchter, (Mayo 2012). Bachelor's Thesis. Fast and Accurate Computation of Surface Normals. School of Engineering and Science, Jacobs University. 5.1.2

[16] H.Scharr. Optimal Operators in Digital Image Processing. PhD thesis, German, Interdisciplinary Center for Scientific Computing, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2000. 5.1.2

[17] P. Viola, M. J. Jones, Robust Real-time Object Detection, Second International Workshop on Statistical and Computational Theories of Vision, 2001. 5.1.5

[18] P. Viola, M. J. Jones, Robust Real-time Face Detection, International Journal of Computer Vision, Volume 57(2), Mayo 2004. 5.1.5

[19] M. Pietikäinen, Image analysis with local binary patterns, SCIA 2005 Proceedings, Lecture Notes in Computer Science 3540, Springer, p. 115-118, 2005. 5.1.5

[20] S. Liao, W.K. Law, A. Chung, Dominant local binary patterns for texture classification, IEEE transactions on image processing, v. 18, no. 5, Mayo 2009, p. 1107-1118. 5.1.5

Referencias web

[21] http://www.cram.org/eco_fanerogama.php 2

[22] http://es.wikipedia.org/wiki/Poaceae 2

[23] http://es.wikipedia.org/wiki/Epifita 2

[24] http://es.wikipedia.org/wiki/Polychaeta 2

[25] http://es.wikipedia.org/wiki/Diplodus_vulgaris 2

[26] http://es.wikipedia.org/wiki/Syngnathus_typhle 2

[27] http://es.wikipedia.org/wiki/Cymodocea_nodosa 2

[28] www.aquaterraria.com/atlas/caulerma-prolifera.htm 2

[29] http://www.marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=144472 2

[30] http://en.wikipedia.org/wiki/Bathymetry 2

[31] http://es.wikipedia.org/wiki/Biocenosis 2

[32] http://es.wikipedia.org/wiki/Hydrozoa 2

[33] http://www.krustycat.net/2007/07/arena-viva-la-infauna.html 2

[34] http://www.utm.csic.es/hesperides_diario.asp?id={07E71408-67CA-48E5-8F75-987D34CBFB64} 2

[35] http://es.wikipedia.org/wiki/Detrito 2

[36] http://es.wikipedia.org/wiki/Bentos 2

[37] http://en.wikipedia.org/wiki/Dinophysis 1

[38] http://es.wikipedia.org/wiki/Red_neuronal_artificial 2

[39] http://en.wikipedia.org/wiki/Decision_tree 2

[40] http://es.wikipedia.org/wiki/Fitoplancton 3

[41] http://blogs.20minutos.es/cronicaverde/2009/02/12/los-bosques-marinos-canarias-estaan-peligro/ 3

[42] http://www.ecologistasenaccion.org/spip.php?article12973&artsuite=0#sommaire_1 3

[43] http://www.mardefoto.com/photo/16079.html 3

[44] http://www.latex-project.org/ 4.2

[45] http://es.wikipedia.org/wiki/Operador_Sobel 5.1.1

[46] http://en.wikipedia.org/wiki/Kernel_(linear_algebra) 5.1.1

[47] http://docs.opencv.org/doc/tutorials/imgproc/imgtrans/laplace_operator/laplace_operator.html#laplace-operator 5.1.3

[48] http://docs.opencv.org/modules/imgproc/doc/filtering.html?highlight=laplace#cv.Laplace 5.1.3

[49] http://en.wikipedia.org/wiki/Median_filter 5.1.4

[50] http://es.wikipedia.org/wiki/Median 5.1.4

[51] http://es.wikipedia.org/wiki/Histograma 6.2

[52] http://en.wikipedia.org/wiki/Correlation_and_dependence 6.2

[53] http://en.wikipedia.org/wiki/Chi-squared_test 6.2

[54] http://en.wikipedia.org/wiki/Bhattacharyya_distance 6.2

[55] http://en.wikipedia.org/wiki/Sensitivity_(test) 7.4, 7.4

[56] http://en.wikipedia.org/wiki/Information_retrieval#Fall-out 7.4

[57] http://en.wikipedia.org/wiki/Accuracy 7.4, 7.4

[58] http://en.wikipedia.org/wiki/Negative_predictive_value 7.4

[59] http://en.wikipedia.org/wiki/Optical_character_recognition 9

[60] http://es.wikipedia.org/wiki/On_screen_display 9

[61] http://en.wikipedia.org/wiki/Concurrent_Versions_System A

[62] http://www.gnu.org/copyleft/lesser.html A

[63] http://www.gnu.org/licenses/gpl.html A