



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Estudios Superiores “Zaragoza”

Sistema para la evaluación de variables indicadoras de cambio climático en comunidades coralinas

TESIS

Que para obtener el título de:

BIÓLOGO

Presenta

Yael Uriel Rico Gómez

Director

Dr. Antonio Valencia Hernández

Sinodales

M. en C. German Calva Vásquez

M. en C. Armando Cervantes Sandoval

Dr. Isaias Hazarmabeth Salgado Ugarte

Dra. Patricia Rivera García

Ciudad de México, 2023





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México y en especial a la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza por brindarme la oportunidad no solo de estudiar una carrera científica, sino una forma de vida. A la DGAPA, por el apoyo financiero brindado al proyecto PAPIIT IT203017 “Principales variables indicadores de cambio climático y especies coralinas: rangos de variación y momentos críticos” sin el cual no podría haber realizado mi trabajo de tesis.

A la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) del Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan y al Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano por permitirnos el acceso a los arrecifes para su estudio y monitoreo, además de las pruebas de profundidad del multiparametro

Les doy las gracias a todos mis maestros que han formado parte de mi vida como estudiante, ya que sus enseñanzas siempre me acompañaran en mi vida profesional y personal. Al Dr. Antonio Valencia Hernández, por ser mi mentor y gran amigo, por brindarme no solo enseñanzas académicas o profesionales sino también personales y de la vida diaria. Gracias por siempre insistirme en superarme y ser mejor cada día.

A todos mis compañeros que conocí en la FES ZARAGOZA por dejar en mi grandes recuerdos y enseñanzas, en especial a Mau, Thelma y Alan por ser más que mis amigos, llegándolos a considerar mis hermanos, gracias por vivir conmigo una de las etapas más brillantes de mi vida. Por compartir camiones y caminos, kilómetros recorridos, experiencias inolvidables, por todos los recuerdos que hemos construidos juntos, por tantas horas de estudios, lágrimas y risas, por las preocupaciones y angustias superadas. Gracias por todo el apoyo y amor. Los quiero mucho.

A Ponny, Laurita y Xitla por su amistad desde el CCH, por brindarme su apoyo, comprensión y mucho amor.

A toda mi familia, la cual siempre me apoyo en el camino que escogí recorrer. A mi mamá, por siempre darme su amor y apoyo incondicional, Por siempre ser un ejemplo de fortaleza, decisión y superación, mi logro es tu logro también porque siempre me acompañaste en mis noches

de desvelo y estudio. A mis hermanas Montse y Yare, y mi sobrina Yoali, por su amor y apoyo incondicional, por cuidarme y brindarme mucha felicidad.

A mi papá, que siempre fue un ejemplo a seguir, no solo personal sino profesional, por enseñarme que las peores cosas siempre se superan con amor y decisión, porque nunca me tengo que dar por vencido, siempre luchar por lo que quiero y deseo. Por siempre brindarme su amor y apoyo incondicional. Por llevarme a mi primera clase de buceo la cual significo el inicio de mi sueño y de mi vida profesional. Gracias por ser el mejor Padre. Te amo mucho y te extraño mucho más.

Tabla de contenido

Resumen	1
Introducción	3
Marco teórico.....	7
Problema de estudio.....	14
Justificación del estudio.....	15
Hipótesis.....	16
Objetivos	18
Objetivo general	18
Objetivos Particulares.....	18
Material y metodo	19
Determinación de los principales sensores requeridos	20
Prototipo del núcleo para el control de los sensores.....	21
Especificaciones técnicas	25
Calibración.....	28
Pruebas de funcionalidad.....	32
Resultados	34
Funcionamiento del prototipo.....	34
Desempeño de sensores	38
Calibración.....	123
Discusión.....	124
Conclusiones	125
Perspectivas y Sugerencias.....	127
Anexo	128
Referencias	133

Índice de figuras

Figura 1. Proyecciones futuras del aumento de temperatura. Entre 1960 y 2017 se observó un incremento de temperatura de 0.25 a 1.0, proyectándose para el 2030 según esta tendencia, un aumento de hasta 1.5 °C (imagen de IPCC, 2019).	5
Figura 2. Metodología para estaciones de monitoreo <i>in situ</i>. En el diagrama de flujo se observa dos colores de flechas, flecha azul: secuencia a flujo; flecha naranja: secuencia en retroceso al flujo. El retroceso del diagrama se da porque en una fase no se ha completado por error o falta de información lo que hace que se regrese a una fase anterior.....	19
Figura 3. Instrumentos de referencia. La comprobación del funcionamiento del multiparámetro AQ_FESZ se utilizaron instrumentos de referencia, los cuales contemplan lecturas estándares en un sistema arrecifal.	20
Figura 4. Prototipo desarrollado en la FES Zaragoza. El prototipo cuenta con módulos desmontables, con la finalidad de cambiar algún componente electrónico en el caso de daño....	21
Figura 5. Ruido en la comunicación. Se utilizó un multiplexor para reducir el número de pines en la comunicación, lo cual, complicó cambiar de un sensor a otro generando ruido en las lecturas. Para solucionar este problema, se utilizó optoacopladores, los cuales ayudaron a aislar las señales de cada sensor.	22
Figura 6. Segundo nivel. El microcontrolador Arduino se utilizó por el libre acceso a las bibliotecas para desarrollar el Software para cada uno de los sensores utilizados. El funcionamiento correcto de cada sensor de Atlas Scientific se verifica con el encendido de LED amarillo.	23
Figura 7. Sin error en el circuito. Los tres niveles se comunican entre sí por medio de pines. Una vez inicializado correctamente el dispositivo, los LED permanecen encendidos. Si existe algún error se apagaron los LED.	24
Figura 8. “Librerías”. Se incluyeron todas aquellas bibliotecas externas en el código de programación. Estas darán acceso a códigos prefabricados y específicos para cada uno de los componentes electrónicos. Como es el caso de la tarjeta SD; Termómetro 18B20; Sensores de luz, Modulo de reloj en tiempo real, por decir algunos.	34
Figura 9. Definición de valores. El programa de Arduino utiliza el comando para nombrar valores de las constantes y sus respectivos valores que después se utilizaran en el código principal.	35
Figura 10. Inicialización. El código fue diseñado a prueba de fallos, esto quiere decir que, automáticamente el código hace una inicialización en cascada inicializando sensor por sensor de cada sensor, si uno de ellos no está funcionando correctamente, no se puede seguir la inicialización. Lo cual se podrá identificar de manera física en luces indicadoras piloto de funcionamiento (LED y LED en sensores).	36
Figura 11. Rutina de los sensores. El código se encuentra ordenado de arriba-abajo, izquierda-derecha.	37
Figura 12. Tendencias entre lecturas de los electrodos de pH en referencia a un buffer. Las tendencias aparecen lineales en todos los casos. Cada lectura se distribuye homogéneamente en todo el intervalo de variación.....	39
Figura 13. Modelo ajustado de dispersión. El modelo ajustado resultante de la relación entre las lecturas de pH tomadas por el electrodo de AZ 86031 y las soluciones Buffer, siguen tendencia lineal con baja variabilidad de los datos, ya que para cada “x” corresponde una “y”.	39

Figura 14. Análisis de los residuales de observados contra predichos. Los residuos estudentizados se observan agrupan en múltiples nubes de datos, lo que significa que existe variabilidad, pero no es estadísticamente significativa.....	41
Figura 15. Similitud de datos predichos por el modelo ajustado y los obtenidos experimentalmente. Los datos obtenidos como predichos surgieron de la ecuación de la línea recta ($y= a+bx$). Se puede observar que existe similitud y relación entre los datos observados y predichos ya que siguen una tendencia lineal con poca variabilidad del modelo ajustado. Lo cual refuerza lo observado de la gráfica anterior.....	41
Figura 16. Modelo ajustado de dispersión. El modelo ajustado resultante de la relación entre las lecturas de pH tomadas por el electrodo de AQ_FESZ y las soluciones Buffer, siguen tendencia lineal con baja variabilidad de los datos, ya que para cada x corresponde una y.	43
Figura 17. Análisis de los residuales de observados contra predichos. Los residuos estudentizados se observan agrupan en múltiples nubes de datos, lo que significa que existe variabilidad, pero no es estadísticamente significativa. Los residuos estudentizados no se consideran influyentes para el modelo.....	44
Figura 18. Similitud de datos predichos por el modelo ajustado y los obtenidos experimentalmente. Los datos obtenidos como predichos surgieron de la ecuación de la línea recta ($y= a+bx$). Se puede observar que existe similitud y relación entre los datos observados y predichos ya que siguen una tendencia lineal con poca variabilidad del modelo ajustado. Lo cual refuerza lo observado de la gráfica anterior.....	45
Figura 19. Modelo ajustado de dispersión. El modelo ajustado resultante de la relación entre las lecturas de pH tomadas por el electrodo de AZ 86031 y AQ_FESZ, siguen tendencia lineal con baja variabilidad de los datos, ya que no se observan lecturas fuera de los límites de variabilidad.	47
Figura 20. Análisis de los residuales de observados contra predichos. Los residuos estudentizados se observan agrupan en múltiples nubes de datos, lo que significa que existe variabilidad, pero no es estadísticamente significativa.....	48
Figura 21. Similitud de datos predichos por el modelo ajustado y los obtenidos experimentalmente. Los datos obtenidos como predichos surgieron de la ecuación de la línea recta ($y= a+bx$). Se puede observar que existe similitud y relación entre los datos observados y predichos ya que siguen una tendencia lineal con poca variabilidad del modelo ajustado. Lo cual refuerza lo observado de la gráfica anterior.....	49
Figura 22. Tendencias entre lecturas de los electrodos de Electro-conductividad en referencia a solución salina. Las tendencias aparecen lineales en todos los casos. Cada lectura se distribuye homogéneamente en todo el intervalo de variación.....	52
Figura 23. Modelo ajustado de dispersión. El modelo ajustado resultante de la relación entre las lecturas de Electro-conductividad tomadas por el electrodo de AZ 86031 y las soluciones salinas, siguen tendencia lineal con baja variabilidad de los datos, ya que para cada “x” corresponde una “y”.....	53
Figura 24. Análisis de los residuales de observados contra predichos. Los residuos estudentizados se observan agrupan en múltiples nubes de datos, lo que significa que existe variabilidad, pero no es estadísticamente significativa.....	54
Figura 25. Similitud de datos predichos por el modelo ajustado y los obtenidos experimentalmente. Los datos obtenidos como predichos surgieron de la ecuación de la línea recta ($y= a+bx$). Se puede observar que existe similitud y relación entre los datos observados y	

predichos ya que siguen una tendencia lineal con poca variabilidad del modelo ajustado. Lo cual refuerza lo observado de la gráfica anterior.....	55
Figura 26. Modelo ajustado de dispersión. El modelo ajustado resultante de la relación entre las lecturas de Electro-conductividad tomadas por el electrodo de AQ_FESZ y las soluciones salinas, siguen tendencia lineal con baja variabilidad de los datos, ya que para cada “x” corresponde una “y”.....	57
Figura 27. Análisis de los residuales de observados contra predichos. Los residuos estudentizados se observan agrupan en múltiples nubes de datos, lo que significa que existe variabilidad, pero no es estadísticamente significativa.....	59
Figura 28. Similitud de datos predichos por el modelo ajustado y los obtenidos experimentalmente. Los datos obtenidos como predichos surgieron de la ecuación de la línea recta ($y= a+bx$). Se puede observar que existe similitud y relación entre los datos observados y predichos ya que siguen una tendencia lineal con poca variabilidad del modelo ajustado. Lo cual refuerza lo observado de la gráfica anterior.....	59
Figura 29. Modelo ajustado de dispersión. El modelo ajustado resultante de la relación entre las lecturas de Electro-conductividad tomadas por el electrodo de AZ 86031 y AQ_FESZ, siguen tendencia lineal con baja variabilidad de los datos, ya que no se observan lecturas fuera de los límites de variabilidad.....	61
Figura 30. Análisis de los residuales de observados contra predichos. Los residuos estudentizados se observan agrupan en múltiples nubes de datos, lo que significa que existe variabilidad, pero no es estadísticamente significativa.....	63
Figura 31. Similitud de datos predichos por el modelo ajustado y los obtenidos experimentalmente. Los datos obtenidos como predichos surgieron de la ecuación de la línea recta ($y= a+bx$). Se puede observar que existe similitud y relación entre los datos observados y predichos ya que siguen una tendencia lineal con poca variabilidad del modelo ajustado. Lo cual refuerza lo observado de la gráfica anterior.....	63
Figura 32. Tendencias entre lecturas de los electrodos de TDS en referencia solución salina. Las tendencias aparecen lineales en todos los casos. Cada lectura se distribuye homogéneamente en todo el intervalo de variación.....	67
Figura 33. Modelo ajustado de dispersión. El modelo ajustado resultante de la relación entre las lecturas de TDS tomadas por el electrodo de AZ 86031 y las soluciones salinas, siguen tendencia lineal con baja variabilidad de los datos, ya que para cada “x” corresponde una “y”.....	68
Figura 34. Análisis de los residuales de observados contra predichos. Los residuos estudentizados se observan agrupan en múltiples nubes de datos, lo que significa que existe variabilidad, pero no es estadísticamente significativa.....	69
Figura 35. Similitud de datos predichos por el modelo ajustado y los obtenidos experimentalmente. Los datos obtenidos como predichos surgieron de la ecuación de la línea recta ($y= a+bx$). Se puede observar que existe similitud y relación entre los datos observados y predichos ya que siguen una tendencia lineal con poca variabilidad del modelo ajustado. Lo cual refuerza lo observado de la gráfica anterior.....	70
Figura 36. Modelo ajustado de dispersión. El modelo ajustado resultante de la relación entre las lecturas de TDS tomadas por el electrodo de AQ_FESZ y las soluciones salinas, siguen tendencia lineal con baja variabilidad de los datos, ya que para cada “x” corresponde una “y”.....	72
Figura 37. Análisis de los residuales de observados contra predichos. Los residuos estudentizados se observan agrupan en múltiples nubes de datos, lo que significa que existe variabilidad, pero no es estadísticamente significativa.....	74

Figura 38. Similitud de datos predichos por el modelo ajustado y los obtenidos experimentalmente. Los datos obtenidos como predichos surgieron de la ecuación de la línea recta ($y= a+bx$). Se puede observar que existe similitud y relación entre los datos observados y predichos ya que siguen una tendencia lineal con poca variabilidad del modelo ajustado. Lo cual refuerza lo observado de la gráfica anterior.....	74
Figura 39. Modelo ajustado de dispersión. El modelo ajustado resultante de la relación entre las lecturas de TDS tomadas por el electrodo de AZ 86031 y AQ_FESZ, siguen tendencia lineal con baja variabilidad de los datos, ya que no se observan lecturas fuera de los límites de variabilidad.	76
Figura 40. Análisis de los residuales de observados contra predichos. Los residuos estudentizados se observan agrupan en múltiples nubes de datos, lo que significa que existe variabilidad, pero no es estadísticamente significativa.	78
Figura 41. Similitud de datos predichos por el modelo ajustado y los obtenidos experimentalmente. Los datos obtenidos como predichos surgieron de la ecuación de la línea recta ($y= a+bx$). Se puede observar que existe similitud y relación entre los datos observados y predichos ya que siguen una tendencia lineal con poca variabilidad del modelo ajustado. Lo cual refuerza lo observado de la gráfica anterior.....	78
Figura 42. Tendencias entre lecturas de los electrodos de Salinidad en referencia solución salina. Las tendencias aparecen lineales en todos los casos. Cada lectura se distribuye homogéneamente en todo el intervalo de variación.....	82
Figura 43. Modelo ajustado de dispersión. El modelo ajustado resultante de la relación entre las lecturas de Salinidad tomadas por el electrodo de AZ 86031 y las soluciones salinas, siguen tendencia lineal con baja variabilidad de los datos, ya que para cada “x” corresponde una “y”..	82
Figura 44. Análisis de los residuales de observados contra predichos. Los residuos estudentizados se observan agrupan en múltiples nubes de datos, lo que significa que existe variabilidad, pero no es estadísticamente significativa.	84
Figura 45. Similitud de datos predichos por el modelo ajustado y los obtenidos experimentalmente. Los datos obtenidos como predichos surgieron de la ecuación de la línea recta ($y= a+bx$). Se puede observar que existe similitud y relación entre los datos observados y predichos ya que siguen una tendencia lineal con poca variabilidad del modelo ajustado. Lo cual refuerza lo observado de la gráfica anterior.....	84
Figura 46. Modelo ajustado de dispersión. El modelo ajustado resultante de la relación entre las lecturas de Salinidad tomadas por el electrodo de AQ_FESZ y las soluciones salinas, siguen tendencia lineal con baja variabilidad de los datos, ya que para cada “x” corresponde una “y”..	86
Figura 47. Análisis de los residuales de observados contra predichos. Los residuos estudentizados se observan agrupan en múltiples nubes de datos, lo que significa que existe variabilidad, pero no es estadísticamente significativa.	87
Figura 48. Similitud de datos predichos por el modelo ajustado y los obtenidos experimentalmente. Los datos obtenidos como predichos surgieron de la ecuación de la línea recta ($y= a+bx$). Se puede observar que existe similitud y relación entre los datos observados y predichos ya que siguen una tendencia lineal con poca variabilidad del modelo ajustado. Lo cual refuerza lo observado de la gráfica anterior.....	88
Figura 49. Modelo ajustado de dispersión. El modelo ajustado resultante de la relación entre las lecturas de Salinidad tomadas por el electrodo de AZ 86031 y AQ_FESZ, siguen tendencia lineal con baja variabilidad de los datos, ya que no se observan lecturas fuera de los límites de variabilidad.	90

Figura 50. Análisis de los residuales de observados contra predichos. Los residuos estudentizados se observan agrupan en múltiples nubes de datos, lo que significa que existe variabilidad, pero no es estadísticamente significativa.....	91
Figura 51. Similitud de datos predichos por el modelo ajustado y los obtenidos experimentalmente. Los datos obtenidos como predichos surgieron de la ecuación de la línea recta ($y= a+bx$). Se puede observar que existe similitud y relación entre los datos observados y predichos ya que siguen una tendencia lineal con poca variabilidad del modelo ajustado. Lo cual refuerza lo observado de la gráfica anterior.....	92
Figura 52. Tendencias entre lecturas de los sensores de temperatura en referencia a un termómetro de mercurio. Las tendencias aparecen lineales en todos los casos. Cada lectura se distribuye homogéneamente en todo el intervalo de variación.....	96
Figura 53. Modelo ajustado de dispersión. El modelo ajustado resultante de la relación entre las lecturas tomadas por el electrodo de AZ 86031 y la temperatura, siguen tendencia lineal con baja variabilidad de los datos, ya que para cada “x” corresponde una “y”.	96
Figura 54. Análisis de los residuales de observados contra predichos. Los residuos estudentizados se observan agrupan en múltiples nubes de datos, lo que significa que existe variabilidad, pero no es estadísticamente significativa.....	98
Figura 55. Similitud de datos predichos por el modelo ajustado y los obtenidos experimentalmente. Los datos obtenidos como predichos surgieron de la ecuación de la línea recta ($y= a+bx$). Se puede observar que existe similitud y relación entre los datos observados y predichos ya que siguen una tendencia lineal con poca variabilidad del modelo ajustado. Lo cual refuerza lo observado de la gráfica anterior.....	98
Figura 56. Modelo ajustado de dispersión. El modelo ajustado resultante de la relación entre las lecturas tomadas por el electrodo de AQ_FESZ y la temperatura, siguen tendencia lineal con baja variabilidad de los datos, ya que para cada “x” corresponde una “y”.	100
Figura 57. Análisis de los residuales de observados contra predichos. Los residuos estudentizados se observan agrupan en múltiples nubes de datos, lo que significa que existe variabilidad, pero no es estadísticamente significativa.....	102
Figura 58. Similitud de datos predichos por el modelo ajustado y los obtenidos experimentalmente. Los datos obtenidos como predichos surgieron de la ecuación de la línea recta ($y= a+bx$). Se puede observar que existe similitud y relación entre los datos observados y predichos ya que siguen una tendencia lineal con poca variabilidad del modelo ajustado. Lo cual refuerza lo observado de la gráfica anterior.....	102
Figura 59. Modelo ajustado de dispersión. El modelo ajustado resultante de la relación entre las lecturas de Temperatura tomadas por el electrodo de AZ 86031 y AQ_FESZ, siguen tendencia lineal con baja variabilidad de los datos, ya que no se observan lecturas fuera de los límites de variabilidad.	104
Figura 60. Análisis de los residuales de observados contra predichos. Los residuos estudentizados se observan agrupan en múltiples nubes de datos, lo que significa que existe variabilidad, pero no es estadísticamente significativa.....	106
Figura 61. Similitud de datos predichos por el modelo ajustado y los obtenidos experimentalmente. Los datos obtenidos como predichos surgieron de la ecuación de la línea recta ($y= a+bx$). Se puede observar que existe similitud y relación entre los datos observados y predichos ya que siguen una tendencia lineal con poca variabilidad del modelo ajustado. Lo cual refuerza lo observado de la gráfica anterior.....	106

Figura 62. Tendencias entre lecturas de los electrodos de DO en referencia a un buffer. Las tendencias no son lineales en todos los casos. En el rango de 21 °C y 35 °C las tendencias se asemejan.....	110
Figura 63. La disolución del oxígeno. Es inversamente proporcional a la temperatura, en referencia con las lecturas obtenidas, se observa que en el rango de 21 °C y 35 °C las tendencias se asemejan a las tendencias reportadas en la literatura (EEGCC, 2004).....	110
Figura 64. Modelo ajustado de dispersión. Ese utilizó el rango de 21 a 35 para realizar el modelo ajustado, resultante de la relación entre las lecturas de DO tomadas por el electrodo de AZ 86031 y AQ_FESZ en función de la Temperatura, siguen tendencia lineal con alta.	111
Figura 65. Análisis de los residuales de observados contra predichos. Los residuos estudentizados se observan agrupan en múltiples nubes de datos, lo que significa que existe variabilidad, pero no es estadísticamente significativa.	112
Figura 66. Similitud de datos predichos por el modelo ajustado y los obtenidos experimentalmente. Los datos obtenidos como predichos surgieron de la ecuación de la línea recta ($y= a+bx$). Se puede observar que existe similitud y relación entre los datos observados y predichos ya que siguen una tendencia lineal con poca variabilidad del modelo ajustado. Lo cual refuerza lo observado de la gráfica anterior.....	113
Figura 67. Tendencias entre las lecturas de los sensores de luz integrada en referencia del número de filtros. Las pruebas individuales muestran una tendencia similar, además de tener una tendencia lineal entre ambos.	117
Figura 68. Tendencia en la literatura. La tendencia es una curva exponencial negativa, esto quiere decir que a mayor profundidad menor intensidad lumínica (Pruvost, 2019). Lo cual, es similar a la tendencia que te observo en el experimento de extinción de luz con el número de filtro.	118
Figura 69. Modelo ajustado de dispersión. El modelo ajustado resultante de la relación entre las lecturas tomadas por el electrodo de AZ 86031 y la temperatura, siguen tendencia lineal con baja variabilidad de los datos, ya que para cada “x” corresponde una “y”.	119
Figura 70. Análisis de los residuales de observados contra predichos. Los residuos estudentizados se observan agrupan en múltiples nubes de datos, lo que significa que existe variabilidad, pero no es estadísticamente significativa.	120
Figura 71. Similitud de datos predichos por el modelo ajustado y los obtenidos experimentalmente. Los datos obtenidos como predichos surgieron de la ecuación de la línea recta ($y= a+bx$). Se puede observar que existe similitud y relación entre los datos observados y predichos ya que siguen una tendencia lineal con poca variabilidad del modelo ajustado. Lo cual refuerza lo observado de la gráfica anterior.....	121
Figura 72. Tabla de corrección. Corrección del valor del Buffer pH 4 según la temperatura en la que se encuentra la sustancia de calibración de Atlas Scientific	128
Figura 73. Calibración en el punto bajo. Esperar de 1-2 minutos para que se establezca las lecturas, una vez estabilizada proceder a introducir el comando.....	128
Figura 74. Tabla de corrección. Corrección del valor del Buffer pH 7 según la temperatura en la que se encuentra la sustancia de calibración de Atlas Scientific	129
Figura 75. Calibración en el punto medio. Esperar de 1-2 minutos para que se establezca las lecturas, una vez estabilizada proceder a introducir el comando.....	129
Figura 76. Tabla de corrección. Corrección del valor del Buffer pH 10 según la temperatura en la que se encuentra la sustancia de calibración de Atlas Scientific	130

Figura 77. Calibración en el punto alto. Esperar de 1-2 minutos para que se estabilice las lecturas, una vez estabilizada proceder a introducir el comando.....	130
Figura 78. Tabla de corrección. Corrección del valor de la solución de calibración para Conductividad según la temperatura en la que se encuentra la sustancia de calibración de Atlas Scientific	131
Figura 79. Calibración. Esperar de 1-2 minutos para que se estabilice las lecturas, una vez estabilizada proceder a introducir el comando.....	131
Figura 80. Calibración. Esperar de 1-2 minutos para que se estabilice las lecturas, una vez estabilizada proceder a introducir el comando.....	132

Índice de tablas

Tabla 1. Métodos utilizados para el estudio de las principales variables relacionadas con el cambio climático.	10
Tabla 2. Dispositivos de medición de parámetros hidrobiológicos. Los dispositivos comerciales operan en la superficie, sumergiendo el electrodo en una muestra de agua o directamente en el cuerpo de agua, la mayoría de los multiparametros está limitado por la longitud del cable del electrodo.	12
Tabla 3. Especificaciones de trabajo. El multiparámetro de referencia AZ 86031 cuenta con certificado de “Worldwide Testing Services” expedido en 2017, la cual acredita el óptimo funcionamiento del instrumento.	25
Tabla 4. Medidor de luz. El aparato de referencia en sus especificaciones técnicas se observa que cuenta con cuatro niveles, los cuales son autoadaptables dependiendo la luz presente. El óptimo funcionamiento del aparato puede ser influenciado por el nivel de batería disponible.	26
Tabla 5. Especificaciones técnicas de sensores utilizados en AQ_FESZ. Los sensores implementados en el desarrollo de AQ_FESZ cumplen con los requerimientos técnicos para los estudios en sistemas arrecifales. Además, son calibrables por soluciones de referencia.	26
Tabla 6. Respuesta de ambos electrodos a una solución de referencia. Lecturas de los electrodos AZ 86031 y QA_FESZ sometidos a prueba de funcionalidad con respecto a soluciones Buffer como unidades de referencia al pH.	38
Tabla 7. Parámetros estadísticos entre pH de AZ 86031 y solución buffer. El análisis exploratorio de los datos derivados de la lectura del electrodo comercial en las soluciones buffer (AZ 86031) arrojó que el modelo lineal es el que mejor describe el fenómeno con una Pendiente= 0.9775 y Ordenada al origen= 0.1951.....	40
Tabla 8. Parámetros estadísticos entre Observados y Predichos para el pH. Los estadísticos muestran una pendiente perfecta y una ordenada al origen= 0.0000. Al tener t_{tablas} un valor mayor a la $t_{calculada}$ se confirma que no existe variación significativamente estadística entre los datos calculados y los observados en el experimento.	42
Tabla 9. Parámetros estadísticos entre pH de AQ_FESZ y solución buffer. El análisis exploratorio de los datos derivados de la lectura del electrodo comercial en las soluciones buffer (AQ_FESZ) arrojó que el modelo lineal es el que mejor describe el fenómeno con una Pendiente= 0.9656 y Ordenada al origen= -0.0917.	43
Tabla 10. Parámetros estadísticos entre Observados y Predichos para el pH. Los estadísticos muestran una pendiente perfecta y una ordenada al origen= $4.84e^{-10}$. Al tener t_{tablas} un valor mayor a la $t_{calculada}$ se confirma que no existe variación significativamente estadística entre los datos calculados y los observados en el experimento.	46
Tabla 11. Parámetros estadísticos entre pH de AZ 86031 y AQ_FESZ. El análisis exploratorio de los datos derivados de la lectura del electrodo AZ 86031 y AQ_FESZ arrojó que el modelo lineal es el que mejor describe el fenómeno con una Pendiente= 0.9873 y Ordenada al origen= -0.2828.....	47
Tabla 12. Parámetros estadísticos entre Observados y Predichos para el pH. Los estadísticos muestran una pendiente perfecta y una ordenada al origen= 0.0000. Al tener t_{tablas} un valor mayor a la $t_{calculada}$ se confirma que no existe variación significativamente estadística entre los datos calculados y los observados en el experimento.	49

Tabla 13. Respuesta a la electro-conductividad entre los electrodos AZ 86031 y AQ_FESZ. Los valores de referencia se derivaron de soluciones salinas entre 55.000 y 12000 (uS/cm), en diluciones ml/10 ml.....	51
Tabla 14. Parámetros estadísticos entre Electro-conductividad de AZ 86031 y solución salina. El análisis exploratorio de los datos derivados de la lectura del electrodo comercial en las soluciones salinas (AZ 86031) arrojó que el modelo lineal es el que mejor describe el fenómeno con una Pendiente= 814.1270 y Ordenada al origen= 406.3300.	54
Tabla 15. Parámetros estadísticos entre Observados y Predichos para Electro-conductividad. Los estadísticos muestran una pendiente= 0.9965 y una ordenada al origen= 22.3681. Al tener t_{tablas} un valor mayor a la $t_{calculada}$ se confirma que no existe variación significativamente estadística entre los datos calculados y los observados en el experimento. ...	56
Tabla 16. Parámetros estadísticos entre Electro-conductividad de AQ_FESZ y solución salina. El análisis exploratorio de los datos derivados de la lectura del electrodo comercial en las soluciones salinas (AQ_FESZ) arrojó que el modelo lineal es el que mejor describe el fenómeno con una Pendiente= 882.8420 y Ordenada al origen= 527.1870.	58
Tabla 17. Parámetros estadísticos entre Observados y Predichos para Electro-conductividad. Los estadísticos muestran una pendiente= 0.9968 y una ordenada al origen= 22.2213. Al tener t_{tablas} un valor mayor a la $t_{calculada}$ se confirma que no existe variación significativamente estadística entre los datos calculados y los observados en el experimento.	60
Tabla 18. Parámetros estadísticos entre Electro-conductividad de AZ 86031 y AQ_FESZ. El análisis exploratorio de los datos derivados de la lectura del electrodo AZ 86031 y AQ_FESZ arrojó que el modelo lineal es el que mejor describe el fenómeno con una Pendiente= 0.9215 y Ordenada al origen= -0.75.4105.	62
Tabla 19. Parámetros estadísticos entre Observados y Predichos para Electro-conductividad. Los estadísticos muestran una pendiente perfecta y una ordenada al origen= 0.0000. Al tener t_{tablas} un valor mayor a la $t_{calculada}$ se confirma que no existe variación significativamente estadística entre los datos calculados y los observados en el experimento. ...	64
Tabla 20. Respuesta de ambos electrodos a una solución de referencia. Lecturas de los electrodos AZ 86031 y AQ_FESZ sometidos a prueba de funcionalidad con respecto a solución salina como unidades de referencia.	66
Tabla 21. Parámetros estadísticos entre TDS de AZ 86031 y solución salina. El análisis exploratorio de los datos derivados de la lectura del electrodo comercial en las soluciones salinas (AZ 86031) arrojó que el modelo lineal es el que mejor describe el fenómeno con una Pendiente= 406.5820 y Ordenada al origen= 213.2750.....	69
Tabla 22. Parámetros estadísticos entre Observados y Predichos para TDS. Los estadísticos muestran una pendiente perfecta y una ordenada al origen= $-2.04e^{-08}$. Al tener t_{tablas} un valor mayor a la $t_{calculada}$ se confirma que no existe variación significativamente estadística entre los datos calculados y los observados en el experimento.	71
Tabla 23. Parámetros estadísticos entre TDS de AQ_FESZ y solución salina. El análisis exploratorio de los datos derivados de la lectura del electrodo comercial en las soluciones salinas (AQ_FESZ) arrojó que el modelo lineal es el que mejor describe el fenómeno con una Pendiente= 483.3760 y Ordenada al origen= 220.2530.....	73
Tabla 24. Parámetros estadísticos entre Observados y Predichos para TDS. Los estadísticos muestran una pendiente perfecta y una ordenada al origen= $4.02e^{-9}$. Al tener t_{tablas} un valor mayor a la $t_{calculada}$ se confirma que no existe variación significativamente estadística entre los datos calculados y los observados en el experimento.	75

Tabla 25. Parámetros estadísticos entre TDS de AZ 86031 y AQ_FESZ. El análisis exploratorio de los datos derivados de la lectura del electrodo AZ 86031 y AQ_FESZ arrojó que el modelo lineal es el que mejor describe el fenómeno con una Pendiente= 0.8402 y Ordenada al origen= 31.5917.	77
Tabla 26. Parámetros estadísticos entre Observados y Predichos para TDS. Los estadísticos muestran una pendiente= 0.9999 y una ordenada al origen= $6.0721e^{-5}$. Al tener t_{tablas} un valor mayor a la $t_{calculada}$ se confirma que no existe variación significativamente estadística entre los datos calculados y los observados en el experimento.	79
Tabla 27. Respuesta de ambos electrodos a una solución de referencia. Lecturas de los electrodos AZ 86031 y AQ_FESZ sometidos a prueba de funcionalidad con respecto a solución salina como unidades de referencia.	81
Tabla 28. Parámetros estadísticos entre Salinidad de AZ 86031 y solución salina. El análisis exploratorio de los datos derivados de la lectura del electrodo comercial en las soluciones salinas (AZ 86031) arrojó que el modelo lineal es el que mejor describe el fenómeno con una Pendiente= 0.4798 y Ordenada al origen= 0.1338.....	83
Tabla 29. Parámetros estadísticos entre Observados y Predichos para Salinidad. Los estadísticos muestran una pendiente perfecta y una ordenada al origen= $-7.35e^{-11}$. Al tener t_{tablas} un valor mayor a la $t_{calculada}$ se confirma que no existe variación significativamente estadística entre los datos calculados y los observados en el experimento.	85
Tabla 30. Parámetros estadísticos entre Salinidad de AQ_FESZ y solución salina. El análisis exploratorio de los datos derivados de la lectura del electrodo comercial en las soluciones salinas (AQ_FESZ) arrojó que el modelo lineal es el que mejor describe el fenómeno con una Pendiente= 5190 y Ordenada al origen= 0.0740.....	87
Tabla 31. Parámetros estadísticos entre Observados y Predichos para Salinidad. Los estadísticos muestran una pendiente perfecta y una ordenada al origen= $1.61e^{-10}$. Al tener t_{tablas} un valor mayor a la $t_{calculada}$ se confirma que no existe variación significativamente estadística entre los datos calculados y los observados en el experimento.	89
Tabla 32. Parámetros estadísticos entre Salinidad de AZ 86031 y AQ_FESZ. El análisis exploratorio de los datos derivados de la lectura del electrodo AZ 86031 y AQ_FESZ arrojó que el modelo lineal es el que mejor describe el fenómeno con una Pendiente= 0.9232 y Ordenada al origen= 0.0703.....	91
Tabla 33. Parámetros estadísticos entre Observados y Predichos para Salinidad. Los estadísticos muestran una pendiente perfecta y una ordenada al origen= $8.52e^{-11}$. Al tener t_{tablas} un valor mayor a la $t_{calculada}$ se confirma que no existe variación significativamente estadística entre los datos calculados y los observados en el experimento.	93
Tabla 34. Respuesta de ambos electrodos a cambio de temperatura en función de un termómetro de referencia. Lecturas de los electrodos AZ 86031 y AQ_FESZ sometidos a prueba de funcionalidad con respecto a un cambio de temperatura como unidad de referencia.....	95
Tabla 35. Parámetros estadísticos entre AZ 86031 y la temperatura. El análisis exploratorio de los datos derivados de la lectura del electrodo comercial al cambio de temperatura (AZ 86031) arrojó que el modelo lineal es el que mejor describe el fenómeno con una Pendiente= 0.9553 y Ordenada al origen 3.6019.....	97
Tabla 36. Parámetros estadísticos entre Observados y Predichos para la Temperatura. Los estadísticos muestran una pendiente= 1.0253 y una ordenada al origen= -0.7166. Al tener t_{tablas} un valor mayor a la $t_{calculada}$ se confirma que no existe variación significativamente estadística entre los datos calculados y los observados en el experimento.	99

Tabla 37. Parámetros estadísticos entre AQ_FESZ y la temperatura. El análisis exploratorio de los datos derivados de la lectura del electrodo AQ_FESZ al cambio de temperatura arrojó que el modelo lineal es el que mejor describe el fenómeno con una Pendiente= 0.9783 y Ordenada al origen 1.2354.	101
Tabla 38. Parámetros estadísticos entre Observados y Predichos para la Temperatura. Los estadísticos muestran una pendiente perfecta y una ordenada al origen= $3.53e^{-9}$. Al tener t_{tablas} un valor mayor a la $t_{calculada}$ se confirma que no existe variación significativamente estadística entre los datos calculados y los observados en el experimento.	103
Tabla 39. Parámetros estadísticos entre la Temperatura de AZ 86031 y AQ_FESZ. El análisis exploratorio de los datos derivados de la lectura del electrodo AZ 86031 y AQ_FESZ arrojó que el modelo lineal es el que mejor describe el fenómeno con una Pendiente= 0.9751 y Ordenada al origen= 2.4253.	105
Tabla 40. Parámetros estadísticos entre Observados y Predichos para Salinidad. Los estadísticos muestran una pendiente perfecta y una ordenada al origen= $1.27e^{-9}$. Al tener t_{tablas} un valor mayor a la $t_{calculada}$ se confirma que no existe variación significativamente estadística entre los datos calculados y los observados en el experimento.	107
Tabla 41. Respuesta de ambos electrodos a un cambio de temperatura como medida de referencia. Lecturas de los electrodos AZ 86031 y QA_FESZ sometidos a prueba de funcionalidad con respecto a soluciones Buffer como unidades de referencia al DO.	109
Tabla 42. Parámetros estadísticos entre DO de AZ 86031 y AQ_FESZ. El análisis exploratorio de los datos derivados de la lectura del electrodo comercial (AZ 86031) y AQ_FESZ arrojó que el modelo lineal es el que mejor describe el fenómeno con una Pendiente= 1.4633 y Ordenada al origen= -3.4221.	111
Tabla 43. Parámetros estadísticos entre Observados y Predichos para DO. Los estadísticos muestran una pendiente perfecta y una ordenada al origen= $1.52e^{-9}$. Al tener t_{tablas} un valor mayor a la $t_{calculada}$ se confirma que no existe variación significativamente estadística entre los datos calculados y los observados en el experimento.	114
Tabla 44. Respuesta de ambos sensores de luz integrada sometidos a prueba de funcionalidad con respecto a número de filtros de papel celofán color cyan.	116
Tabla 45. Parámetros estadísticos entre AQ_FESZ y WT_81DLM. El análisis exploratorio de los datos derivados de la lectura de un sensor comercial a las lecturas del sensor de AQ_FESZ arrojó que el modelo lineal es el que mejor describe el fenómeno con una Pendiente= 1.3334 y Ordenada al origen 5.0665.	120
Tabla 46. Parámetros estadísticos entre Observados y Predichos para Salinidad. Los estadísticos muestran una pendiente perfecta y una ordenada al origen= $1.29e^{-8}$. Al tener t_{tablas} un valor mayor a la $t_{calculada}$ se confirma que no existe variación significativamente estadística entre los datos calculados y los observados en el experimento.	122

RESUMEN

Los arrecifes de coral son uno de los ecosistemas más importantes, por brindar diversos servicios ambientales a la humanidad, tales como, provisión de alimento, bioquímicos y materia prima, regulación del clima, asimilación de contaminantes, protección costera, captación de CO₂ atmosférico, etc. Debido al cambio climático, estos sistemas están cada vez más afectados por eventos como blanqueamiento masivo, enfermedades y contaminación biológica. Debido a su diversidad espacial, estructural y biológica, es necesario el monitoreo continuo de los meso-ambientes que los componen, por lo cual es necesario contar con tecnología de monitoreo continuo y eficiente. Como efecto del cambio climático, es necesario estudiar las propiedades biológicas en función de su entorno ambiental, físico e hidrobiológico.

Debido a la dinámica ambiental, para el ser humano solo es posible efectuar monitoreo directo bajo condiciones meteorológicas optimas, lo cual limita el conocimiento de las variables bióticas y abióticas en condiciones extremas, que, aunque anormales para el ser humano son cotidianas en estos ambientes, por ejemplo, temporadas de huracanes, horarios nocturnos y eventos meteorológicos adversos para la seguridad de los investigadores. A nivel macro-escala el empleo de tecnología satelital permite la obtención de datos en situaciones extremas, sin embargo, por su baja resolución espacial, es casi imposible efectuar estudios a nivel meso-escala que revelen la interacción directa de individuos con su entorno local, para lo cual es importante el monitoreo directo de zonas y microambientes representativos mediante instrumentos electrónicos, a través de la obtención de muestras analizables en superficie. Para lo anterior es deseable contar con instrumentación instalable *in situ* que permita el registro continuo de las variables importantes. Dichos instrumentos por ser novedosos son escasos y muchas veces se encuentran fuera de presupuesto, cotizándose entre los \$17,000 y los \$131,889.87 pesos mexicanos.

Como alternativa a la problemática antes descrita, con este trabajo se desarrolló un prototipo de instrumento multiparámetros semiautónomo para la medición de pH, Conductividad/Salinidad/TDS, Oxígeno disuelto, Temperatura y Luz integrada, que permita el monitoreo continuo aplicable en diferentes zonas de los sistemas arrecifales. Tal dispositivo, tiene la capacidad de registrar durante un lapso de 15 días a intervalos programables y mantener un

registro de las lecturas a profundidades de hasta 40 metros; el dispositivo se puede modificar a futuro, incrementando o disminuyendo los parámetros, ya que cuenta con puertos disponibles y programación adaptable a nuevos sensores.

Se realizaron pruebas de funcionalidad, contrastando contra un multiparámetros comercial, usando en común soluciones de referencia para evaluar su confiabilidad (exactitud y precisión).

Como resultado se obtuvo que no hubo diferencia estadística entre las lecturas de nuestro desarrollo (AQ_FESZ) y el instrumento comercial (AZ 86031), con lo que se demuestra una exactitud similar a la obtenible con instrumentos comerciales. No hubo diferencia significativa entre las lecturas de ambos instrumentos y los valores de las soluciones de referencia, lo que refuerza la confiabilidad del AQ_FESZ en cuanto a exactitud. Respecto a precisión, entre ambos instrumentos no hubo diferencia estadística significativa para los distintos parámetros, excepto para Conductividad Eléctrica, de donde se derivan Salinidad y Total de Sólidos en Suspensión, encontrándose mayor precisión en las curvas de lecturas del AQ_FESZ. Los resultados permiten asegurar que este desarrollo es confiable y con desempeño adecuado para el monitoreo de los parámetros contemplados para el monitoreo de sistemas arrecifales coralinos.

A pesar de ser funcional y haberse probado a profundidades de 60 metros, debido al periodo de pandemia no fue posible la aplicación del instrumento desarrollado por el periodo de operatividad de diseño ni bajo condiciones *in situ*, sin embargo, no se encontraron elementos para dudar de su eficiencia, por lo cual, se sugiere en un futuro próximo proceder con esta nueva etapa.

INTRODUCCIÓN

La IPCC (“Intergovernmental Panel on Climate”: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) considera al cambio climático como un cambio en el clima que se puede identificar por pruebas estadísticas, refiriéndose al promedio y a la variabilidad de sus propiedades, persistentes durante un tiempo prolongado.

La UNFCCC (“United Nations Framework Convention on Climate Change”: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático), define el concepto de cambio climático como: el cambio de clima que se atribuye directa o indirectamente a la actividad humana, la cual altera la composición de la atmósfera global y la variabilidad climática natural observada durante períodos de tiempo comparables (IPCC, 2019).

Pörtner (2008) menciona que el CO₂ ha sido señalado como uno de los gases responsables de alterar la estabilidad de los parámetros físicos, químicos y físico-químicos terrestres (temperatura superficial en tierra, calidad del aire, etc.) y marinos (temperatura de las aguas oceánicas, pH oceánico, salinidad, oxígeno disuelto, etc.). Atweberhan et al. y Feely et al., 2004 señalan que antes de la era industrial existía de forma natural un equilibrio entre el CO₂ consumido y el generado, en sinergia con diferentes factores físicos, químicos y biológicos.

Antes de la era industrial, los niveles de CO₂ oscilaban entre las 200 y 280 partes por millón (ppm), pero como consecuencia de la era industrial, los niveles se han incrementado continuamente alcanzando niveles de 380 ppm en 2016 (Doney *et al.*, 2009; Solomon *et al.*, 2007). De los niveles actuales de CO₂ que se producen, el 50% es liberado al espacio exterior y el 50% restante es captado y almacenado en la atmósfera. De este porcentaje, cerca del 30% es absorbido por el océano y el 20% restante es absorbido por la biosfera (Albright *et al.*, 2016; Feely *et al.*, 2004; Sabine *et al.*, 2004).

IPCC ha realizado estimaciones futuras sobre la concentración de CO₂ atmosférico y oceánico, las cuales están basadas en escenarios y modelos generales de circulación, que indican que al final de siglo los niveles de CO₂ pueden superar las 800 ppm (Friedlingstein *et al.*, 2006; Pörtner, 2008).

Con el aumento de los niveles de CO₂ se desencadenaron alteraciones en el equilibrio ambiental, ya que se incrementó la temperatura (Friedlingstein *et al.*, 2006), y este aumento a su vez repercutió a futuro en los niveles de los parámetros físicos, químicos y fisicoquímicos, ocasionando modificaciones en los fenómenos climatológicos naturales (Benavides y León, 2007; Pörtner, 2008; Webster *et al.*, 2005).

A partir de los años 70, se empezaron a registrar incrementos globales continuos de temperatura, estos incrementos causaron en la frecuencia e intensidad constante de los fenómenos meteorológicos (huracanes, ciclones, tormentas eléctricas, lluvias, sequías, heladas, etc.) durante las últimas tres décadas (Hoegh, 1999; Sabine *et al.*, 2004; Webster *et al.*, 2005). A partir del comportamiento y tendencia al aumento en las últimas décadas, se puede prever que los eventos térmicos alcancen niveles aún mayores (Bruno *et al.*, 2007; Skirving *et al.*, 2020).

Los cambios actuales del clima no solo se reflejan en el aumento de temperatura en tierra y océano, sino que también inciden en la vida que albergan, sufriendo consecuencias como la extinción de los sistemas arrecifales en grandes zonas del planeta (Ateweberhan *et al.*, 2013; Blanchon *et al.*, 2010; Friedlingstein *et al.*, 2006; Hoey *et al.*, 2016).

Dado que los niveles de CO₂ atmosférico se incrementaron a causa de la actividad antropogénica, en el océano la disolución de este gas aumentó proporcionalmente, causando la disminución de niveles de pH superficial (Albright *et al.*, 2016; Brewer, 1997). Las unidades de pH han disminuido de 8.2 a 8.0 (Kleypas *et al.*, 1999). Debido a la escala logarítmica del pH, esto representa un aumento del 26% en la acidez del océano (Buth, 2016). Los modelos del agua superficial del océano indican que el carbono inorgánico disuelto (CID) probablemente puede incrementar más del 12%, y la concentración de los iones carbonato puede disminuir al menos 60% (Brewer, 1997). Lo anterior corresponderá a un escenario futuro en que el pH baje cerca de 0.4 unidades en las aguas superficiales (Caldeira y Wickett, 2003). Este proceso se conoce como acidificación oceánica, el cual representa una gran amenaza para los ecosistemas marinos y seres vivos con estructuras calcáreas, como ostras, cangrejos, corales, los cuales requieren del poco soluble carbonato de calcio para crear estructuras protectoras o estructurales (Albright *et al.*, 2016; Buth, 2016).

El calentamiento global es causado principalmente por las emisiones de CO₂ antropogénico en la era industrial (Baethgen, 1997) y por emisiones de gases de efecto invernadero: GEI (Benavides y León, 2007). Entre los GEI figuran el vapor de agua (H₂O(g)), el dióxido de carbono (CO₂(g)), el óxido nitroso (N₂O(g)), el metano (CH₄(g)) y el ozono (O₃(g)). Se estima que las actividades humanas han causado un calentamiento global aproximado de 1.0 °C respecto a los niveles preindustriales, con un rango probable de 0.8 °C a 1.2 °C. Es probable que el calentamiento global llegue a 1.5 °C entre 2030 y 2052 (Figura 1) si continúa aumentando al ritmo actual (IPCC, 2019)(Olivo y Soto-Olivo, 2010).

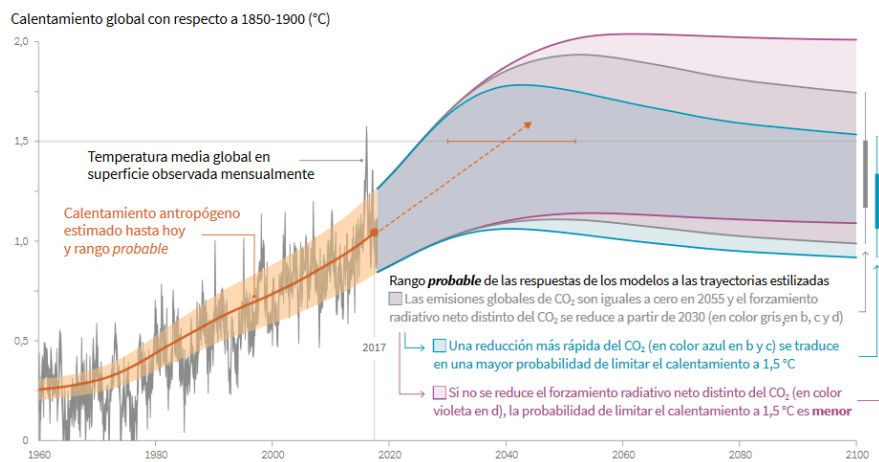


Figura 1. Proyecciones futuras del aumento de temperatura. Entre 1960 y 2017 se observó un incremento de temperatura de 0.25 a 1.0, proyectándose para el 2030 según esta tendencia, un aumento de hasta 1.5 °C (imagen de IPCC, 2019).

La temperatura superficial del océano aumento en un rango de 0.4-0.8 °C desde principios de los años 1800's (Albright *et al.*, 2016; Tierney *et al.*, 2015). Según la OSS reporta que actualmente el rango de variación de la temperatura es más de 2 °C por siglo en muchos mares tropicales (Bellantuono *et al.*, 2012; Hoegh, 1999; Nakicenovic y Swart, 2000).

Dentro de niveles normales, el océano es regulador del clima, es una fuente de ingresos de alimento, y de diferentes servicios ambientales para la humanidad. Por lo que, la mínima alteración en sus ecosistemas repercutirá de manera sinérgica tanto en la humanidad, como en el equilibrio del resto del planeta. El aumento de temperatura del océano afecta dramáticamente a los ecosistemas marinos, alterando su física, química y ecología (Calderón *et al.*, 2007; Gattuso *et al.*,

2015), y en consecuencia al planeta entero por ser el océano el principal regulador del clima terrestre.

Gattuso *et al.* (2015) mencionan que no solo la temperatura superficial del mar se vería afectada considerablemente, sino también el pH superficial, el nivel del mar, el porcentaje de aragonito y la concentración de oxígeno, trayendo como consecuencias el calentamiento oceánico, la acidificación y procesos de regulación del sistema terrestre (clima, distribución de calor, tiempo, flujo de agua y tratamiento de desechos), y la provisión de hábitat y servicios culturales (Böhnke-Henrichs *et al.*, 2013). Tales efectos repercutirían económicamente en los seres humanos a causa de la modificación de los recursos derivados de los océanos, como insumos médicos, alimento, material de construcción, protección de eventos naturales, etc. (de Suarez *et al.*, 2014; Hernández *et al.*, 2010).

La acidificación y el calentamiento oceánicos, son considerados como los mayores factores determinantes para el equilibrio de los ecosistemas marinos (Anthony *et al.*, 2008; Hoegh, 1999; Hoey *et al.*, 2016). Considerando que los sistemas arrecifales son ecosistemas muy vulnerables a mínimos cambios en su ambiente, se hace evidente que existe una relación entre el cambio climático, la acidificación y la disminución de la cobertura coralina, reflejada como eventos de blanqueamiento en la mayoría de los arrecifes de todo el mundo (Ray Berkelmans, 2002; Glynn, 1993). El fenómeno del “Blanqueamiento en masa” (Hoegh-Guldberg y Salvat, 1995) , se presenta cuando la temperatura excede la tolerancia fisiológica de un número grande de diferentes especies de coral (Bellantuono *et al.*, 2012; Skirving *et al.*, 2020). Dicho estrés térmico causa un extenso descenso en la abundancia de zooxantelas y de sus pigmentos fotosintéticos, los cuales son el primer recurso de nutrición de muchos corales, aportando más del 90 % de la energía requerida para el crecimiento y reproducción del coral (Hoey *et al.*, 2016; Jiang *et al.*, 2021; Jokiel y Coles, 1974). Jokiel y Coles (1974) observaron que si el coral después del blanqueamiento aún cuenta con suficientes zooxantelas puede llegar a regenerarse y sobrevivir al periodo de estrés térmico, ya que el periodo de recuperación parcial del promedio normal de los pigmentos en las zooxantelas es de un mes, y para la recuperación total es de aproximadamente dos meses.

Existen numerosos ejemplos de eventos masivos de blanqueamiento causante de extensa mortalidad de coral, disminución en la cobertura coralina y cambios en la estructura, y función de

comunidades bentónicas, y comunidades coralinas (Ateweberhan *et al.*, 2013; Bruno *et al.*, 2007). Se ha reportado que los eventos de blanqueamiento difieren considerablemente, dependiendo de la localización y de la estructura de la comunidad bentónica y coralina, así como de la profundidad, la cual desempeña un papel similar al de refugio para poblaciones de coral (Brakel, 1979; Krueger *et al.*, 2017; Mies *et al.*, 2020; Pandolfi *et al.*, 2011). El efecto del blanqueamiento también varía dependiendo de las formas de crecimiento coralinas, ya que se sabe que los corales ramificados tienen mayor resistencia a la variación de temperatura (Ateweberhan *et al.*, 2013; Roff *et al.*, 2012; Shaver *et al.*, 2022; Watt-Pringle *et al.*, 2022).

Lo anterior nos hace suponer que un arrecife con gran complejidad contará con gran cantidad de microambientes, los cuales atenuarán el impacto de las alteraciones de los parámetros responsables del blanqueamiento masivo de corales. (Brakel, 1979; Martínez *et al.*, 2022; Shaver *et al.*, 2022)

Marco teórico

Aunque se tiene registro de eventos de blanqueamiento en 1911 (en los Cayos de Florida), en 1929 (en la Gran Barrera Arrecifal Australiana: GBAA) y en 1961 (nuevamente en los Cayos de Florida); fue hasta los eventos de blanqueamiento que ocurrieron a partir de 1980, donde se comenzó a relacionarles con el cambio climático, denominándolos como eventos masivos de blanqueamiento, ya que se incrementaron en número de ocurrencia, escala y magnitud (Ray Berkelmans *et al.*, 2004). A principios de 1980, los eventos masivos de blanqueamiento ocurrían una vez cada 25 y 30 años, desde entonces la frecuencia de los eventos aumento, el blanqueamiento ahora ocurre aproximadamente una vez cada seis años (Hughes *et al.*, 2018; McWhorter *et al.*, 2022).

Mumby y Steneck (2008) citan que durante la década de 1970 se había registrado una pérdida histórica de las poblaciones de peces arrecifales sin que aparentemente se haya registrado una disminución en la cobertura coralina, sin embargo, diez años después, con un mayor acopio de información e incremento de sitios de monitoreo se constató que sí había ocurrido pérdida de cobertura coralina.

En el mar Caribe, Océano Indico y Océano Pacífico se registraron periodos de blanqueamiento (1983-1984, 1986-87, 1991, 1994 y 1996), siendo la repetición una característica común (Brown, 1997; Hoegh-Guldberg y Salvat, 1995). En Jamaica el evento masivo de blanqueamiento ocurrió durante el periodo de 1987-1990, en las Bahamas (Isla de Lee Stocking) el blanqueamiento coralino se registró en 1987, 1990, 1993 y 1995.(T. Hughes, 1994) .

Después del evento de blanqueamiento que sufrió la GBAA en 1911, ocurrieron eventos masivos de blanqueamiento en los años 1998, 2002, 2016, 2017, 2020 (Authority, 2019; Bozec *et al.*, 2020; Hughes *et al.*, 2018; T. P. Hughes *et al.*, 2017), como resultado del estrés térmico a menudo después de varias semanas de temperaturas superiores a las habituales de verano en 1-2°C (R Berkelmans y Willis, 1999; Glynn y D'croz, 1990; Reaser *et al.*, 2000).

El evento del 2016 fue uno de los más severos que haya sufrido la GBAA, en el cual se calculó que la pérdida total de cobertura coralina fue del 30% aproximadamente y en aguas someras del 50% (T. P. Hughes *et al.*, 2017; Marshall y Baird, 2000; McWhorter *et al.*, 2022).

En el Caribe se tiene registró reducción de la cobertura de coral a principios de los años 80, atribuida a la enfermedad de banda blanca y al huracán Allen, causantes de la mortalidad masiva de dos especies de coral ramificado: *Acropora palmata* y *Acropora cervicornis* (Eakin *et al.*, 2010; T. Hughes, 1994; Mumby y Steneck, 2008; Schutte *et al.*, 2010).

Glynn (1993) y Bruno *et al.* (2007) reportaron que en el océano pacífico el fenómeno de blanqueamiento perjudicó a 17 especies de corales constructores, principalmente de las familias Acroporidae, Pocilloporidae y Faviidae; cabe mencionar que dichas familias forman parte de la GBAA.

Para México se reportó un evento masivo de blanqueamiento en 1995, el cual se consideró como uno de los más severos en comparación con eventos experimentados en otras partes del mundo (Brown, 1997). En 1997-1998, los arrecifes del centro del pacífico mexicano fueron afectados por el fenómeno ENSO (“El Niño Southern Oscillation”: El Niño- Oscilación del Sur), causando el 96% del declive de la cobertura coralina viva. Pero se observó la recuperación del 50% de cobertura. Lo que indica que los arrecifes locales del pacífico centro de México, se han aclimatado o incluso adaptado a temperaturas altas (Martínez-Castillo *et al.*, 2022).

La pérdida de poblaciones arrecifales tiene como consecuencia la implementación de programas de monitoreo integrales, ya que existe relación entre los parámetros hidrobiológicos y la salud de los sistemas. En diversos estudios, la temperatura, pH, luz, oxígeno disuelto y total de sólidos en suspensión, juegan un papel importante en la salud de los arrecifes coralinos. ya que se ven influenciadas la riqueza, diversidad, enfermedades de corales y crecimiento de las colonias (Caballero-Aragón *et al.*, 2022; Salas-Monreal *et al.*, 2022).

En la Tabla 1, se enlistan algunos estudios sobre la influencia de la temperatura y el CO₂ sobre la cobertura viva de los corales, observando que, con la mínima variación de los valores, los corales son afectados hasta llegar al blanqueamiento y posteriormente a su muerte.

Tabla 1. Métodos utilizados para el estudio de las principales variables relacionadas con el cambio climático.

Autor y año	Título del artículo	Método utilizado.
Rebecca Albright (2016)	“Reversal of ocean acidification enhances net coral reef calcification”	Se utilizó cuatro multiparámetros (CTD YSI 6600 y 6920) los cuales fueron sumergidos en la zona de estudio, para las mediciones continuas de temperatura, salinidad, presión y concentración de oxígeno disuelto. Estos instrumentos registraron continuamente por intervalos de dos minutos en 22 días de estudio. Además, se utilizaron muestras de agua donde se colectaron cada día en las cuatro localidades donde se sumergieron los CTD, por último, la concentración de oxígeno disuelto se cuantificó usando un potenciómetro automático con la técnica de titulación Winkler 33
Anthony J. Bellantuono (2011)	“Resistance to thermal stress in corals without changes in symbiont composition”	Realizaron diferentes tratamientos en tanques transparentes para evidenciar la respuesta de <i>A. millepora</i> al pre-acondicionamiento térmico, el primero consto en someter a los corales a una temperatura de 28 C por 10 días, para después cambiarlos a estanques con temperatura de 31 C por ocho días. En otro tratamiento (sin pre-acondicionamiento) los corales fueron expuestos a 31 C sin una previa exposición a 28C. Ambos tratamientos se compararon a una muestra control, donde los corales fueron expuestos solo a temperatura ambiente (21-22 C). Se observó que los corales que fueron sometidos al tratamiento pre-acondicionamiento, no fueron susceptibles a la exposición a una temperatura de 31 °C.
Antoni y colaboradores en el 2008	“Ocean acidification causes bleaching and productivity loss in coral reef builders”	Experimento con duración de 8 semanas, en un sistema de CO2 controlado y con un régimen de temperatura, se hicieron diferentes tratamientos con diferentes niveles de CO2: control (380 ppm), intermedio (520-700 ppm) y alto (1000-1300 ppm), tales escenarios fueron propuestos por el “Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)”. Se obtuvo una productividad de 50%, con bajas temperaturas y con el tratamiento intermedio de CO2 (pH 7.85-7.95).
Bruno (2007)	“Thermal Stress and Coral Cover as Drivers of Coral Disease Outbreaks”	Para estimar la relación entre el aumento de temperatura y el porcentaje de cobertura de los corales en la Gran Barrera Arrecifal, se utilizó la base de datos de Temperatura de la Superficie Marina (SST: “Sea Superfice Temperaure”) y se realizaron transectos de 50 metros, utilizando cámaras de video para poder cuantificar el porcentaje de cobertura coralina con blanqueamiento.

Con frecuencia, los estudios reportados en literatura acerca del muestreo y monitoreo de los sistemas arrecifales, no se efectúan durante condiciones meteorológicas difíciles o adversas por las dificultades que involucra el trabajo de campo en dichos momentos, por lo que la mayoría de los datos corresponde a momentos con buenas condiciones estables. Ya que las consecuencias dañinas ocurren al rebasarse umbrales de tolerancia alcanzando niveles fuera de los límites de resiliencia, es de esperar que se deba poner mayor atención a los momentos difíciles, cuando exista riesgo de rebasar dichos niveles de tolerancia, los cuales corresponden a condiciones meteorológicas difíciles o adversas. Para lo anterior es necesario contar con unidades de monitoreo que puedan operar durante dichos eventos, de tal manera que se pueda contar con elementos para conocer los límites (puntos de quiebre) a los que ocurren los daños en el medio natural.

Adicionalmente, los programas de monitoreo y estudios se complementan con percepción remota, sistemas de registro superficial (Athie *et al.*, 2022). La NOAA desarrollo un programa de monitoreo de arrecifes por medio de percepción remota, el cual, brinda datos a investigadores y administradores de zonas de conservación el monitoreo del estrés térmico de los corales, casi en tiempo real. Haciendo posibles predicciones de escenarios climatológicos extremos. Por otro lado, la NOAA utiliza boyas superficiales, las cuales, registran parámetros como la temperatura, presión atmosférica, vientos, oleaje y la salinidad superficial del mar. Sin embargo, estos valores son a nivel superficial del nivel de mar, lo omite información puntual de micro hábitats y de zonas a escalas locales.

Ante la situación anteriormente descrita, es importante conocer la variación temporal de parámetros físicos y químicos en los sistemas arrecifales, principalmente en momentos clave, con la finalidad de conocer su dinámica y respuestas durante el impacto de las variables de cambio climático en escalas, zonas y momentos donde la percepción remota tiene limitaciones. Una limitante a lo anterior sería el costo de un número suficiente de unidades de monitoreo, por lo que es deseable contar con instrumentos eficientes de bajo costo.

Un instrumento para la medición de pH, Temperatura, Conductividad, Salinidad, Total de solidos disueltos (Tabla 2), tiene un costo aproximado que oscila entre los \$17,000 hasta los \$131,889.87, lo cual lo hace prohibitivo presupuestalmente para la mayoría de los proyectos que se realizan en nuestro país.

Tabla 2. Dispositivos de medición de parámetros hidrobiológicos. Los dispositivos comerciales operan en la superficie, sumergiendo el electrodo en una muestra de agua o directamente en el cuerpo de agua, la mayoría de los multiparametros está limitado por la longitud del cable del electrodo.

Empresa y Dispositivo	Precio	Imagen	Descripción
DARREA/ GPS Aquameter AP 800	\$39602.79		Sonda de tres metros de longitud con dispositivo GPS; parámetros: pH, ORP Conductividad, TDS, SSG, Resistividad, Salinidad, Turbidez, Oxígeno disuelto y temperatura
HANNA/HI98194/40	\$46,910.40		Medidor multiparámetro, con 40 metros de cable pH, ORP Conductividad, Oxígeno disuelto, temperatura, presión barométrica.
AZ INSTRUMENT CORP/ AZ 86031	\$17,450.00		Medidor de agua de múltiples parámetros, entre ellos: pH, Conductividad, TDS, Salinidad, Oxígeno Disuelto, Temperatura
BELL/ AP-2000	\$66,821.72		Sonda de tres metros de longitud con registro de datos; parámetros: pH, ORP, Conductividad, TDS, Salinidad, Oxígeno Disuelto, Temperatura, Profundidad

Puntualizando en lo anterior, para la previsión de eventos y toma de decisiones enfocadas a la conservación de los sistemas arrecifales coralinos, es importante contar con un número suficiente de puntos de monitoreo que arrojen datos simultáneos, los cuales permitan no solo monitorear valores sino también la elaboración de modelos explicativos y predictivos producto de la variación estacional de las variables hidrobiológicas. La relación entre estas variables y los componentes y fenómenos biológicos permitirá predecir escenarios en torno a los efectos del cambio climático sobre dichos sistemas. El número de puntos de monitoreo y la diversidad de ambientes a estudiar dependerá del número de estaciones disponibles para la medición continua, por lo cual es necesario considerar la capacidad de contar con cantidades que permitan la obtención de datos representativos. Dichos instrumentos deben contar con los siguientes atributos:

- Precisión: baja desviación del valor medido del valor real
- Resolución: cambio más pequeño en la cantidad medida que puede ser detectado por el instrumento
- Tasa de medición: número de mediciones que se pueden realizar por unidad de tiempo (por ejemplo, mediciones/hora)
- Consumo de energía: mínima cantidad de unidades de energía (baterías, paneles solares, etc.)
- Periodo útil de trabajo: período de tiempo durante el cual puede operar el instrumento antes de requerir mantenimiento y renovación de energía (generalmente depende de las condiciones ambientales, como la bioincrustación, potencia y número de y el consumo de energía)
- Capacidad para operar en condiciones extremas y en condiciones ambientales difíciles, así como operación continua independientemente de las condiciones ambientales.
- Requerimiento mínimo de mantenimiento, configuración y calibración.
- Capacidad suficiente para el almacenamiento de datos.
- Capacidad para generar datos confiables, comparables con instrumentos comerciales.

Lo anterior indica que es necesario implementar sistemas de sensores que se puedan constituir en estaciones que arrojen datos comparables con los instrumentos científicos existentes, a precio accesible y factibles de mejora con una inversión mínima.

Problema de estudio

El monitoreo continuo tanto de los sistemas biológicos como de los parámetros hidrobiológicos ambientales es de suma importancia para el conocimiento del efecto de los fenómenos climáticos y para la toma de decisiones enfocadas a la conservación y en su caso restauración. Por lo cual es importante desarrollar herramientas que permitan generar datos detallados, comparables con dispositivos científicos existentes, a precio accesible y factibles de mejora con una inversión mínima y costos menores a los de los instrumentos comerciales.

Las herramientas necesarias deben encontrarse en forma de dispositivos multi-sensores diseñados para su operación continua bajo condiciones reales dentro de los rangos de variación en que se encuentran los sistemas arrecifales coralinos tropicales, con periodos de operación que minimicen el trabajo en campo, que aporten lecturas confiables, exactas y precisas, que sean capaces de evolucionar conforme las necesidades y surgimiento de nuevos desarrollos tecnológicos y que alcancen costos accesibles.

Justificación del estudio

Los arrecifes de coral brindan diversos servicios ambientales como regulación de clima, amortiguamiento de CO₂, almacenamiento de CO₂, provisión de alimento, etc (Calderón *et al.*, 2007), siendo los corales un elemento fundamental para el mantenimiento del ecosistema, por lo cual es importante su continuo monitoreo (Chabanet *et al.*, 2002).

Actualmente los Sistemas arrecifales coralinos tropicales están sufriendo de altas tasas de mortalidad coralina. Estas altas tasas son producto de eventos naturales como huracanes, tormentas tropicales y otros eventos meteorológicos, además del efecto de las actividades humanas como sobre explotación, contaminación y alteración estructural (Anthony *et al.*, 2008; Ateweberhan *et al.*, 2013; Blanchon *et al.*, 2010). El efecto humano es tan grande que afecta a nivel planetario en forma de cambio climático, el cual en el océano se manifiesta como incremento de temperaturas, mayor disolución de CO₂, acidificación marina y aumento de radiación ultravioleta. El cambio climático tiene como consecuencia la modificación de los parámetros hidrobiológicos causantes de eventos masivos sobre la estructura y biota del océano (Albright *et al.*, 2016; Benavides y León, 2007; Calderón *et al.*, 2007; Gattuso *et al.*, 2015; Kleypas *et al.*, 1999; Pörtner, 2008; Webster *et al.*, 2005). Dichos parámetros han alcanzado niveles que podrían haber superado los puntos de quiebre de los estados de equilibrio normales, en particular la temperatura y pH, los cuales son parámetros tan importantes que pequeños cambios en su magnitud causan fuertes modificaciones en la abundancia, riqueza, distribución de las especies y correcto funcionamiento del ecosistema oceánico y planetario.

HIPÓTESIS

Si las lecturas del dispositivo no son estadísticamente diferentes del valor de las soluciones de referencia, entonces el aparato podrá operar dentro de los rangos esperados.

El periodo operativo se podrá definir dejando funcionando el aparato con baterías cargadas hasta el agotamiento de estas. $\frac{2}{3}$ del periodo obtenido corresponderán al tiempo de recambio de baterías y el tercio restante corresponderá a un periodo de tolerancia en caso de que el recambio no pueda efectuarse en los $\frac{2}{3}$ establecidos.

Al dejar funcionando continuamente el aparato con 8 baterías, se alcanzó un periodo operativo de 15 días, lo cual es tiempo aceptable como elemento de disminución de trabajo en campo a periodos de 10 días con tolerancia de 5 días.

Si no existe diferencia estadística significativa entre las lecturas del dispositivo desarrollado, del aparato de referencia y los valores de las soluciones de referencia, entonces se puede asumir que el dispositivo desarrollado genera lecturas confiables (valores reales comparables a los de dispositivos comerciales).

Si no existe diferencia significativa entre los parámetros de las curvas de lecturas del dispositivo desarrollado, del dispositivo de referencia y los valores de las soluciones de referencia, entonces se puede considerar que el dispositivo genera lecturas exactas.

Si los residuos estudentizados de las lecturas del aparato y los valores de las soluciones de referencia se encuentran entre ± 2.5 , entonces se puede considerar que el dispositivo tiene la precisión adecuada.

Si los residuos estudentizados de las lecturas del dispositivo y del aparato de referencia se encuentran entre ± 2.5 , entonces se puede considerar que el dispositivo tiene la precisión comparable al aparato comercial.

Si el costo total del dispositivo es menor al de un aparato comercial similar, entonces la propuesta será económicamente viable.

OBJETIVOS

Objetivo general

Desarrollar e implementar un sistema de monitoreo de variables indicadoras de cambio climático en tiempo real, aplicable a sistemas arrecifales en distintas zonas geo-batimétricas en arrecifes reales.

Objetivos Particulares

- 1) Diseñar e implementar una estación de monitoreo para trabajo *in situ* con los siguientes atributos: resolución necesaria para estudios biológicos, rango de medición representativo de los sistemas arrecifales, capacidad de monitoreo continuo por periodos de tiempo mínimo de una semana, y con precisión y exactitud comparables con las de los instrumentos comerciales
- 2) Desarrollar las adaptaciones necesarias para hacer el dispositivo calibrable.
- 3) Optimizar el diseño para que el dispositivo final sea capaz de reconfigurarse y enriquecerse con nuevos sensores.
- 4) Aplicar el sistema desarrollado para el monitoreo en un arrecife real.

Por la situación de pandemia vivida a nivel mundial, el trabajo en campo se vio impedido, por lo cual solo se lograron los primeros tres objetivos. Ante la imposibilidad de trabajo de campo, durante dicho periodo se optó por realizar pruebas en laboratorio de condiciones comparables a las esperadas en campo sobre su funcionalidad, nivel de precisión y desempeño para cada uno de sus sensores.

MATERIAL Y METODO

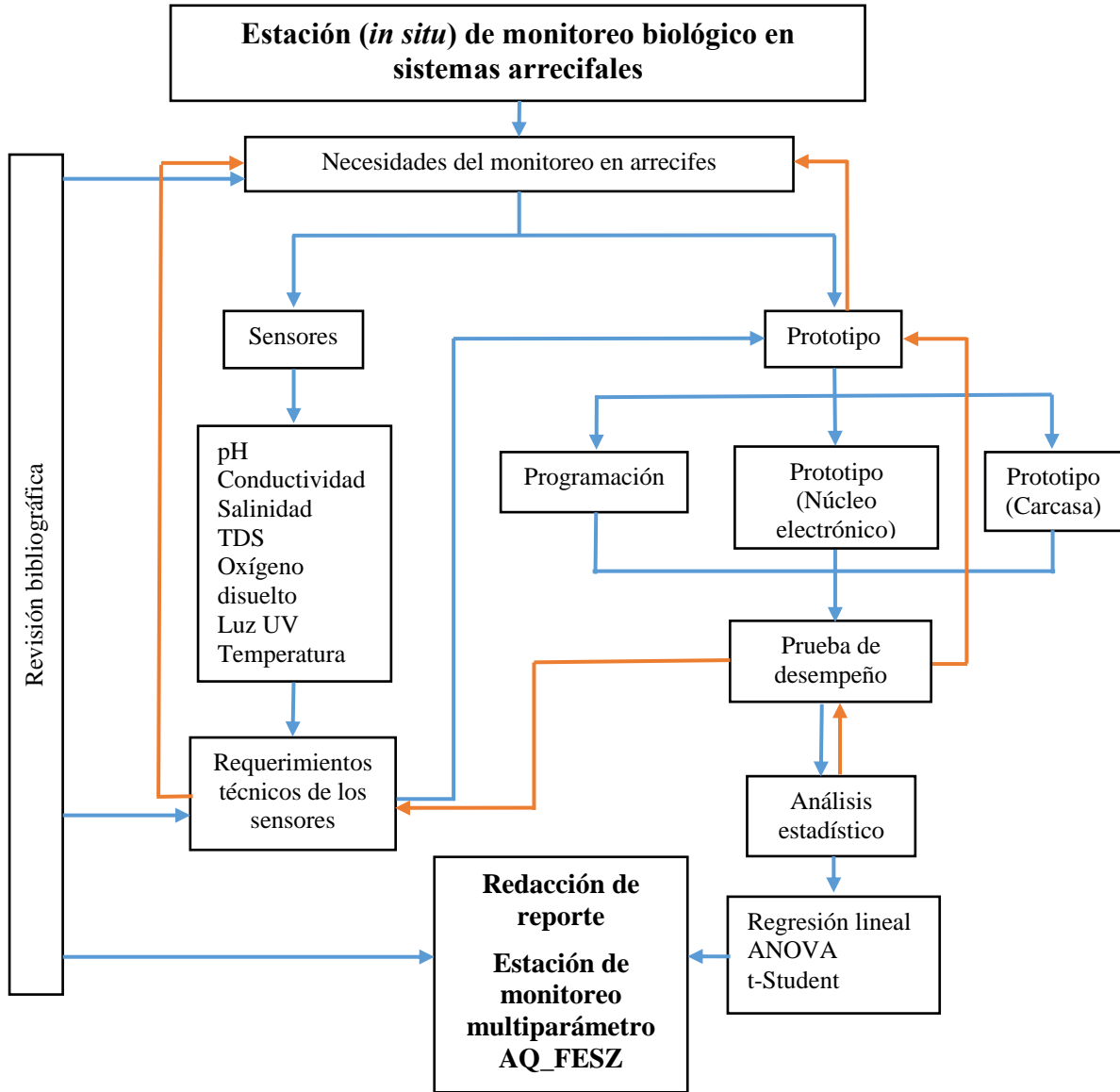


Figura 2. Metodología para estaciones de monitoreo *in situ*. En el diagrama de flujo se observa dos colores de flechas, flecha azul: secuencia a flujo; flecha naranja: secuencia en retroceso al flujo. El retroceso del diagrama se da porque en una fase no se ha completado por error o falta de información lo que hace que se regrese a una fase anterior.

Determinación de los principales sensores requeridos

Los multiparámetros comerciales en su mayoría miden los mismos parámetros, los cuales son pH, conductividad, salinidad, TDS (Solidos Totales Disueltos; por sus siglas en ingles Total Dissolved Solids), oxígeno disuelto, temperatura, presión barométrica, ORP (Potencial Oxido-Reducción), Resistividad. Y algunos otros adicionan otros sensores que pueden medir amonio, nitrato, cloruro, calcio, turbidez, por mencionar algunos.

Con base en la referencia bibliográfica, se seleccionaron los parámetros hidrobiológicos que tienen registro de intervenir en el problema global de “Blanqueamiento coralino”. Además, se tomó en cuenta las necesidades de futuros trabajos a realizar en el laboratorio de biología acuática de la FES Zaragoza; por tales motivos, se seleccionaron los siguientes parámetros: pH, conductividad/salinidad/TDS, Oxígeno disuelto, temperatura y luz visible.

Para realizar las pruebas de funcionalidad, se utilizaron instrumentos comerciales (Figura 3) como referencia (Multiparámetro: AZ 86031; Termómetro: Termómetro de inmersión de mercurios Brannan -20 a 110 °C; Medidor de luz integrada: Wintact WT81).



Figura 3. Instrumentos de referencia. La comprobación del funcionamiento del multiparámetro AQ_FESZ se utilizaron instrumentos de referencia, los cuales contemplan lecturas estándares en un sistema arrecifal.

Prototipo del núcleo para el control de los sensores

El núcleo electrónico (Figura 4) del multiparámetro AQ_FESZ que se desarrolló en el Laboratorio de Biología Acuática de la FES Zaragoza, consto de tres placas de circuitos desmontables, cada una organizada por el tipo de funcionamiento de sus módulos.

Se les dio la forma circular a las placas de circuito, ya que la carcasa implementada fue un cilindro de acrílico de aproximadamente 11cm. de diámetro, con un grosor de 0.50 cm.

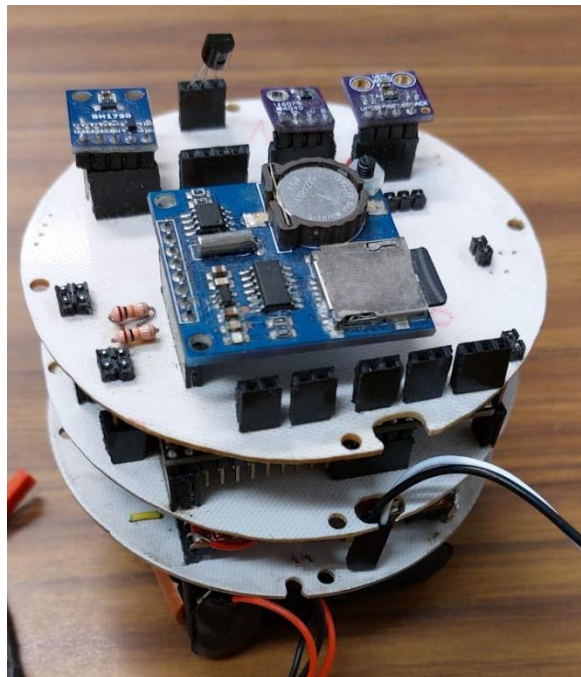


Figura 4. Prototipo desarrollado en la FES Zaragoza. El prototipo cuenta con módulos desmontables, con la finalidad de cambiar algún componente electrónico en el caso de daño.

El primer nivel de circuitos electrónicos (Figura 5) se compuso de: dos reguladores de voltaje a 3.3 V. Estos reguladores se conectaron con corriente de entrada de baterías AA, y energía de salida al circuito completo. Los reguladores son alimentados por separado, cada uno alimenta a

Optoacopladores. Se utilizaron cuatro optoacopladores los cuales ayudan a disminuir el ruido creado por los sensores y los diferentes microcomponentes. Esto con la finalidad de

optimizar la toma de datos sin interferencia. Un par de optoacopladores son alimentados por un regulador mientras que el par restante por el otro regulador. Además, se utilizaron resistencias 110 y 40k para los optoacopladores.

Multiflexor. Se utilizó un multiplexor del fabricante Atlas Scientific, para optimizar la disponibilidad de pines en el microcontrolador y poder utilizar a futuro estos.

La placa de primer nivel, se conecta por debajo al tomacorriente de las baterías y también se conecta con la placa de segundo nivel para abastecer de energía a los componentes.

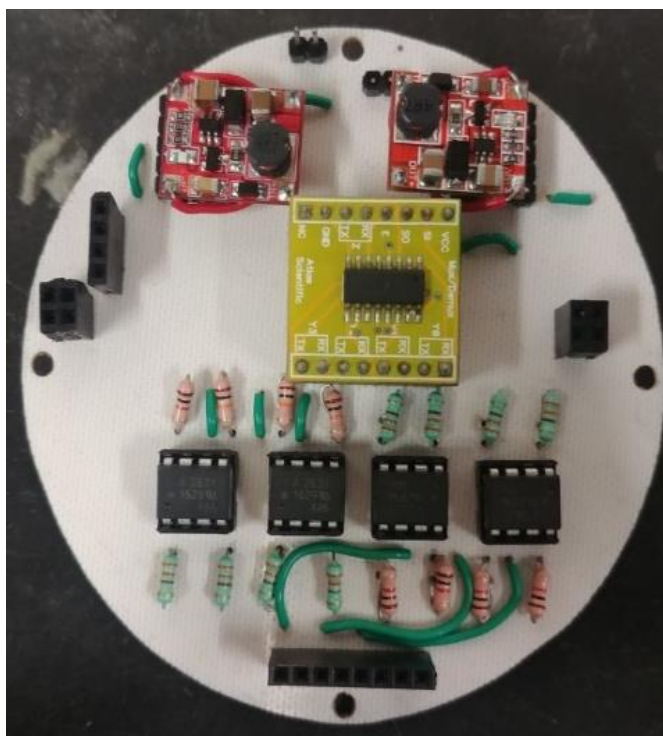


Figura 5. Ruido en la comunicación. Se utilizó un multiplexor para reducir el número de pines en la comunicación, lo cual, complico cambiar de un sensor a otro generando ruido en las lecturas. Para solucionar este problema, se utilizó optoacopladores, los cuales ayudaron a aislar las señales de cada sensor.

El segundo nivel de las placas del circuito (Figura 6), se instalaron los chips electrónicos de Atlas Scientific para los parámetros de pH, Conductividad/TDS/Salinidad/Oxígeno disuelto y con un lugar disponible para otro tipo de sensor (Oxido-Reducción).

Los chips fueron conectados a un Arduino ATmega 2560, el cual se consideró apto ya que tiene mayor número de pines para conexión, tamaño compacto, y alta velocidad de procesamiento. Anteriormente se realizaron pruebas con Microcontroladores (Arduino mini), pero la capacidad de procesamiento y disponibilidad de pines hicieron insuficientes estos tipos de controladores.

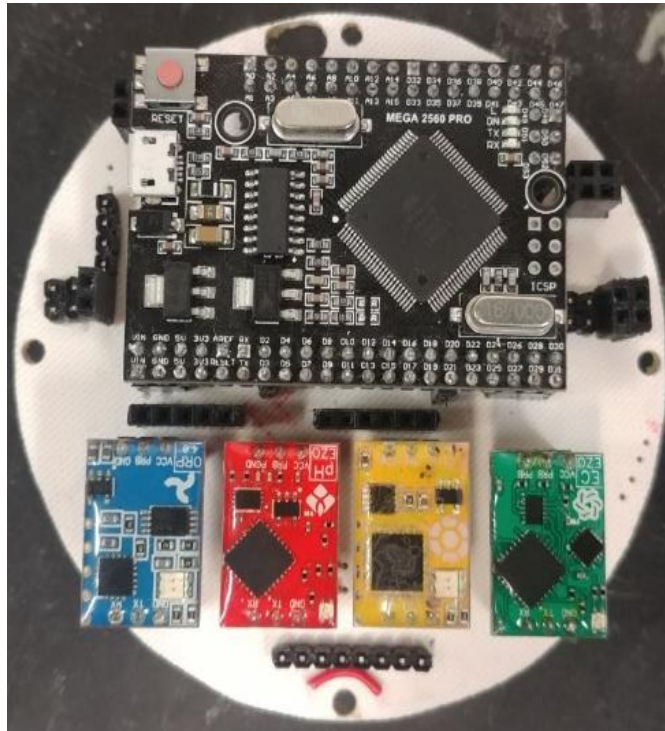


Figura 6. Segundo nivel. El microcontrolador Arduino se utilizó por el libre acceso a las bibliotecas para desarrollar el Software para cada uno de los sensores utilizados. El funcionamiento correcto de cada sensor de Atlas Scientific se verifica con el encendido de LED amarillo.

El tercer nivel del núcleo de circuito (Figura 7), en este nivel fue necesario integrar los módulos que necesariamente requieren estar en la parte más superficial del núcleo, como son los sensores de luz integrada (BH1750) y luz ultravioleta (Veml6070 y Veml6075). Además, de un módulo integrado Micro SD Data logger RTC, el cual tiene la función de guardar la información leída por los sensores en una tarjeta Micro SD en tiempo real. Este módulo se implementó con la finalidad de tener registro en tiempo real y poder tener la disposición de los datos con facilidad.

También en este nivel se instalaron dos sensores de temperatura expofeso (Dallas 18B20), uno de ellos toma la temperatura del multiparámetro y el otro, se colocó en un tubo termo-conductor externo.

Por último, se colocaron cuatro puertos en los cuales se conectan los electrodos para cada uno de los sensores. Cabe mencionar que el dispositivo cuenta con puertos disponibles para implementar sensores que se requieran en futuros trabajos.

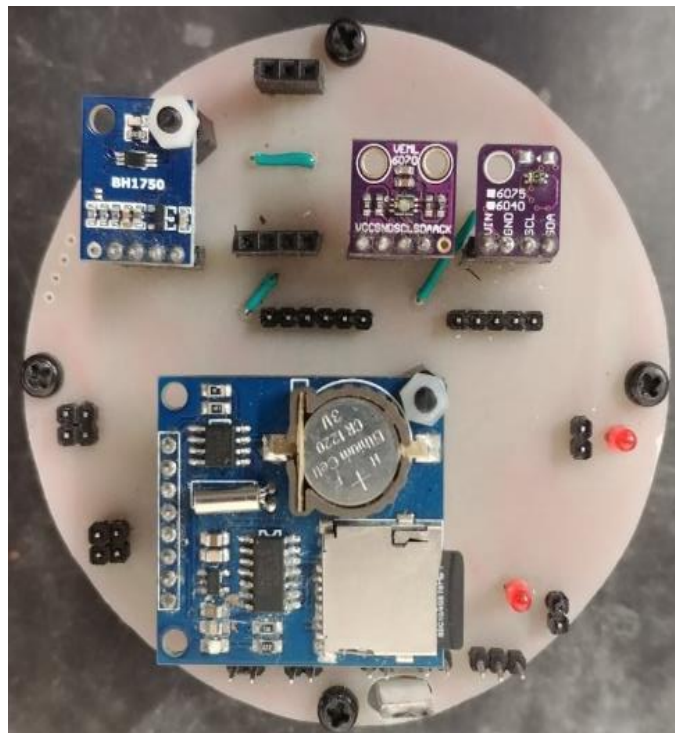


Figura 7. Sin error en el circuito. Los tres niveles se comunican entre sí por medio de pines. Una vez inicializado correctamente el dispositivo, los LED permanecen encendidos. Si existe algún error se apagaron los LED.

Especificaciones técnicas

Multiparámetro AZ 86031

El fabricante menciona que el aparato cuenta con un certificado de IP 67, lo que quiere decir que el aparato solo soporta estar sumergido a 1 metro por 30 minutos. Aunque no mencionan el tiempo y la profundidad a la que se puede sumergir la sonda. En la Tabla 3 se enlistan las especificaciones según el fabricante (AZINSTRUMENT, 2019)

Tabla 3. Especificaciones de trabajo. El multiparámetro de referencia AZ 86031 cuenta con certificado de “Worldwide Testing Services” expedido en 2017, la cual acredita el óptimo funcionamiento del instrumento.

pH	
Rango de Medición	2.00 ~ 12.00
Resolución pH	0.01
Exactitud Ph	± 0.1
Electroconductividad (EC)	
Rango de Medición	0 ~ 199.9, 0 ~ 1999 uS/cm 0 ~ 19.99, 0 ~ 150.0 mS/cm
Resolución de conductividad	0.1 uS/cm, 1 uS/cm, 0.01 mS/cm, 0.1 mS/cm
Precisión de conductividad	± 1% de FS ± 1 dígito
Salinidad	
Rango de Medición	0 ~ 10.00 ppt, 0 ~ 42.0 ppt (agua de mar)
Resolución de salinidad	0.01 ppt, 0.1 ppt
Precisión de salinidad	± 1% de FS ± 1 dígito
Total de Sólidos Disueltos (TDS)	
Rango de Medición	0 ~ 199.9 * f, 0 ~ 1999 * f ppm 0 ~ 19.99 * f, 0 ~ 150.0 * f ppt (f es factor TDS)
Resolución TDS	0.1, 1 ppm, 0.01, 0.1 ppt
Precisión TDS	± 1% de FS ± 1 dígito
Factor de TDS	0.3 ~ 1.00
Oxígeno Disuelto (DO)	
Rango de Medición	0.0 ~ 199.9 % (0.0 ~ 30.0 mg/L)
Resolución de DO	0.1
Exactitud DO	± 3% de FS ± 1 dígito
Temperatura	
Rango de Medición	0-5 ~ 60 °C
Resolución de Temperatura	0.1
Exactitud de la temperatura	± 0.5 °C

➤ Digital Lux Meter WT81

Es un instrumento profesional (Wintact, 2019) utilizado para medir la intensidad de la luz en todo tipo de entornos, como fábricas, escuelas, oficinas, rutas de transporte, etc.

Tabla 4. Medidor de luz. El aparato de referencia en sus especificaciones técnicas se observa que cuenta con cuatro niveles, los cuales son autoadaptables dependiendo la luz presente. El óptimo funcionamiento del aparato puede ser influenciado por el nivel de batería disponible.

Luz	
Rango de Medición	Rango general: 0-200,000 lux; 4 niveles Nivel x1: 0-199.9 lux Nivel x10: 200-1999.9 lux Nivel x100: 2000-19999.9 lux Nivel x1000: 20000-200000 lux
Exactitud de la iluminancia	Menos de 10000 lux: $\pm 3\%$ RDG Mayor de 10000 lux: $\pm 4\%$ RDG

Multiparametro AQ_FESZ

El multiparámetro desarrollado en el laboratorio de biología acuática de la facultad de estudios superiores Zaragoza, utiliza sensores y electrodos del fabricante Atlas Scientific (Scientific, 2019), termómetros de 18B20 y sensores de luz integrada (Tabla 5). El multiparámetro AQ_FESZ se ha probado en hasta 40 m. de profundidad. El circuito central está instalado dentro de un tubo cilíndrico de acrílico transparente cerrado herméticamente. El funcionamiento del circuito central y de la sonda ha sido exitoso en los sitios de monitoreo de arrecifes de coral.

Tabla 5. Especificaciones técnicas de sensores utilizados en AQ_FESZ. Los sensores implementados en el desarrollo de AQ_FESZ cumplen con los requerimientos técnicos para los estudios en sistemas arrecifales. Además, son calibrables por soluciones de referencia.

pH	
Rango de medición	.001 - 14.000
Resolución	0.001
Precisión	± 0.002
Tiempo de respuesta	1 lectura por segundo
Calibración	3 puntos
Compensación de temperatura	SI
Protocolo de datos	UART y I2C
Voltaje de operación	3.3 V - 5 V
Electroconductividad uS/cm	
Rango de medición	0.07 - 500, 000 uS/cm
Precisión	$\pm 2\%$
Tiempo de respuesta	1 lectura por segundo
Calibración	1 O 2 puntos
Compensación de temperatura	si
Protocolo de datos	UART y I2C
Voltaje de operación	3.3 V - 5 V
Salinidad ppt	

Rango de medición	0.00 - 42.00 ppt
Precisión	± 2%
Tiempo de respuesta	1 lectura por segundo
Calibración	1 o 2 puntos
Compensación de temperatura	SI
Protocolo de datos	UART y I2C
Voltaje de operación	3.3 V - 5 V
Total de Sólidos Disueltos ppm	
Rango de medición	0.07 - 500 >, 000 ppm
Precisión	± 2%
Tiempo de respuesta	1 lectura por segundo
Calibración	1 O 2 puntos
Compensación de temperatura	SI
Protocolo de datos	UART y I2C
Voltaje de operación	3.3 V - 5 V
Oxígeno Disuelto	
Rango de medición	0.01 - 100 mg/L; 0.1-400 % Saturación
Precisión	± 0.05 mg/L
Tiempo de respuesta	1 lectura por segundo
Calibración	1 O 2 puntos
Compensación de temperatura	SI
Protocolo de datos	UART y I2C
Voltaje de operación	3.3 V - 5 V
Temperatura	
Rango de medición	0-55 - +125 °C
Resolución	9 - 12 Bits
Exactitud de la temperatura	± 0.5 °C -10 + 85
Voltaje de operación	3 V - 5.5 V
Luz BH 1750	
Rango de medición	0-65535 lux
Exactitud de la iluminancia	± 20%

Calibración

Multiparametro AZ 86031

EC, TDS y Salinidad

La calibración del electrodo es la misma que se utilizara para los parámetros de Conductividad Eléctrica, Salinidad y Total de Solidos Disuelto.

Las soluciones químicas de calibración de los parámetros (EC, Salinidad y TDS) no pueden ser enviadas por el fabricante, por lo que, se utilizó la solución de calibración de Atlas Scientific para ambos aparatos; pero solo se calibro con la solución de calibración de 12, 880 uS para el multiparametros AZ 86031

1. Introducir el electrodo dentro de agua destilada por aproximadamente 30 min. Para enjuagar el electrodo.
2. Seleccionar apropiadamente la solución de calibración
3. Solo se necesita un punto de calibración
4. Seleccionar un buffer estándar de calibración el cual debe de estar cerca del rango medio de lectura que se mide.
5. Colocar la solución en un contenedor limpio.
6. Prender el aparato, presionar “Tmode/ENTER” y seleccionar el módulo de Conductividad
7. Sumergir el electrodo en el buffer y mover por aproximadamente un minuto hasta formar el buffer homogéneo.
8. Asegurarse que no queden burbujas de aire en el área del sensor y que está cubierta por completo por solución
9. Presionar la tecla CAL más de dos segundos. La sonda detectará automáticamente el valor de la solución de conductividad y el valor se imprimirá en la pantalla. Presionar el \wedge o \vee para ajustar el valor en la pantalla para coincidir con el valor de la solución de calibración
10. Cuando el valor de la solución de conductividad en la pantalla es igual al valor de la solución de calibración, presiona la tecla ENTER, en la pantalla se imprimirá “SA”. Después la pantalla dejara de parpadear y regresara al modo normal.
11. La calibración de la conductividad es completada
12. Repite los pasos anteriores para otros rangos si lo necesitas
13. Siempre utiliza agua limpia para limpiar la sonda antes de sumergirla en diferentes buffers.

pH

La calibración del aparato según el fabricante:

1. Inserte la sonda de pH en el multiparámetro
2. Encienda en multiparámetro
3. Vierta el buffer de pH en un recipiente limpio

4. Sumergir el electrodo en el buffer 7.00
5. Revolver durante un minuto aproximadamente
6. Presionar la tecla “CAL/ESC” durante 2 segundos para entrar al modo de calibración
7. La sonda reconoce automáticamente el valor del buffer.
8. Si el valor reconocido automáticamente es diferente al valor de buffer, presionar la tecla \wedge o \vee para ajustar el valor.
9. Esperar 30 segundos o presionar la tecla “ENTER”.
10. SA se mostrará en la LCD para indicar que la calibración se ha guardado.
11. Repetir los pasos 3 - 9
12. Utilizar agua limpia para lavar el electrodo antes de sumergirse en un buffer diferente.

El fabricante no puede enviar las soluciones químicas para la calibración del instrumento de pH. Se utilizó la solución de calibración (buffer 4, 7, 10) de Atlas Scientific para ambos aparatos.

Oxígeno Disuelto (OD)

La calibración del aparato según el fabricante (Calibración en seco):

1. Antes de usarlo, prenderlo 10 min. antes y esperar a que se estabilice.
2. Siempre calibrar en el lugar o en uno con parámetros ambientales similares con solo 10 C de diferencia.
3. Cambiar el modo a % de saturación con la tecla TMODE
4. Presionar la tecla CAL/ESC hasta que en la pantalla parpadee la leyenda “CAL”
5. Después de 30 segundos se estabilizará la lectura y aparecerá la lectura continua
6. Si después de 30 segundos no aparece la lectura continua, presionar la tecla “ENTER”.
7. Se guardará automáticamente la calibración

Temperatura

En el manual de operaciones no cuenta con un apartado el cual brinde información acerca de la calibración o el tipo de termómetro con el que opera.

Sensor de Luz visible

El fabricante no provee información acerca de la calibración o procedimiento que utilizan.

Multiparámetro AQ_FESZ

EC, TDS y Salinidad

El electrodo de EC puede cuantificar también TDS y Salinidad. Por lo cual la calibración es la misma para los tres parámetros.

Calibración en seco: Esta parte es necesaria para la calibración, y debe de realizarse antes de los dos puntos de calibración

1. Habilitar que este en lectura continua
2. Asegurarse que la sonda está seca. Cuando la sonda este en el aire, escribir el comando cal,dry.

Dos puntos de calibración: punto bajo

1. Colocar en un recipiente la solución de calibración 12,880 uS. Asegurarse que la solución cubra el área del sensor de la sonda.
2. Colocar la sonda en el recipiente y revolverla para eliminar el aire atrapado. Dejar la sonda en la solución. Probablemente las lecturas pueden ser un $\pm 40\%$ del valor indicado de la solución de calibración.
3. Esperar a que las lecturas se estabilicen (los pequeños movimientos en las lecturas es normal) y enviar el comando cal,low,12880.

Dos puntos de calibración: punto alto

1. Enjuagar la sonda antes de la calibración del punto alto
2. Colocar en un recipiente la solución de calibración 150,000 uS. Asegurarse que la solución cubra el área del sensor de la sonda.
3. Colocar la sonda en el recipiente y revolverla para eliminar el aire atrapado. Dejar la sonda en la solución. Probablemente las lecturas pueden ser un $\pm 40\%$ del valor indicado de la solución de calibración.
4. Esperar a que las lecturas se estabilicen (los pequeños movimientos en las lecturas es normal) y enviar el comando cal,high,150000

Atlas Scientific provee diferentes soluciones de calibración dependiendo el kit de conductividad. El kit que se utilizo es de K10, el kit contiene las soluciones de calibración de 12,880 uS y 150,000 uS de KCl. Además, Atlas Scientific establece que la sonda se puede utilizar en agua dulce y agua salada sin limitaciones de inmersión.

pH

Calibración: punto medio

1. Habilitar el modo lecturas continuas
2. Retirar el electrodo de la solución de mantenimiento y enjuagar con agua destilada
3. Verter un poco de solución de calibración de pH 7.00 en un recipiente. Asegúrese de que haya suficiente solución para cubrir el área de detección de la sonda.
4. Colocar el electrodo en el recipiente y revolver para eliminar el aire atrapado. Dejar que el electrodo se asiente en la solución de calibración hasta que las lecturas se estabilicen
5. Una vez que las lecturas se hayan estabilizado (1-2 minutos), emita el comando de calibración de punto medio "cal,mid,7".

Calibración: punto inferior

1. Enjuagar la sonda antes de calibrar el punto inferior.
2. Verter un poco de la solución de calibración de pH 4.00 en un recipiente. Asegúrese de que haya suficiente solución para cubrir el área de detección de la sonda
3. Coloque la sonda en el recipiente y revuelva para eliminar el aire atrapado. Deje que la sonda se asiente en la solución de calibración hasta que las lecturas se estabilicen.
4. Una vez que las lecturas se hayan estabilizado (1-2 minutos), emitir el comando de calibración de punto inferior “cal,low,4”.

Calibración: punto superior

1. Enjuagar la sonda antes de calibrar el punto superior.
2. Verter un poco de la solución de calibración de pH 10.00 en un recipiente. Asegúrese de que haya suficiente solución para cubrir el área de detección de la sonda
3. Coloque la sonda en el recipiente y revuelva para eliminar el aire atrapado. Deje que la sonda se asiente en la solución de calibración hasta que las lecturas se estabilicen.
4. Una vez que las lecturas se hayan estabilizado (1-2 minutos), emitir el comando de calibración de punto superior “cal,high,10”.

Oxígeno Disuelto (OD)

1. Cambiar el modo a lectura continua.
2. Exponer la sonda al aire hasta que se estabilice las lecturas (puede existir pequeña variación en las lecturas).
3. Escribir el comando “CAL”
4. Aparecerá la leyenda “OK”
5. Después de que la calibración esta completada, las lecturas deben de ser entre 9.09-9.1 X mg/L

Temperatura

Se realizó una prueba de tiempo de respuesta entre los componentes, la cual consiste en conectar al mismo tiempo un par de ellos y someterlos a cambios de temperatura, si los dos tienen tiempos y temperaturas similares se consideran apropiados para utilizarlos en el circuito.

En la hoja de funcionamiento del sensor Dallas 18B20 no cuenta con un apartado que indique cual es la calibración que recomienda el fabricante. Por lo que, suponemos que los sensores cumplen y son confiables en su uso.

Sensor de Luz visible

El fabricante del chip BH 1750 no provee un procedimiento de calibración para poder utilizar.

Pruebas de funcionalidad

pH

Las soluciones buffer de referencia se realizaron a partir de diluciones provenientes de una solución concentrada de sosa con ácido muriático. Con lo anterior con cada incremento de solución de ácido muriático, se disminuye el pH. Por lo cual se espera una relación lineal.

EC, TDS y Salinidad

Las soluciones de referencia se crearon a partir de diluciones provenientes de una solución madre de 150,000 uS; cada intervalo de salinidad se obtuvo al diluir un volumen de solución madre en 10 ml de agua destilada con una conductividad aproximada de 650 uS/cm. Por lo anterior, en cada incremento de solución madre se incrementa la cantidad total de sales a un ritmo mayor que el incremento del volumen de la muestra, por lo cual no se espera una relación lineal ya que la proporción de la variación del volumen de la muestra no es equivalente a la cantidad de sales. En nuestro experimento lo más importante es analizar si la respuesta individual de cada electrodo al volumen de muestra es similar, y si el patrón de respuesta entre ambos electrodos es estadísticamente igual; todo lo anterior independientemente de la magnitud real de sales en cada muestra.

Temperatura (°C)

El gradiente de temperatura se obtuvo iniciando con una alícuota de agua destilada a 8 °C; la temperatura del AZ 86031 se obtuvo con el electrodo de pH, para el electrodo AQ_FESZ se utilizó un termómetro instalado exprofeso (Dallas 18B20), y como referencia

un termómetro de mercurio. Las lecturas se tomaron cada vez que se detectaba un aumento de 2.0 °C con el termómetro de mercurio, en caso de duda, se desechó el dato y se consideró el siguiente grado centígrado. En el experimento lo más importante fue analizar si la respuesta individual de cada multiparámetro al cambio de temperatura era similar.

Oxígeno disuelto (DO)

Para esta prueba se enfrió una muestra de agua destilada a 14.2 °C, dado que la concentración de Oxígeno disuelto es inversa a la Temperatura, se registraron las lecturas de Oxígeno disuelto de cada electrodo aproximadamente a intervalos de aumento en 1.0 °C.

Sensor de luz visible (lux)

Para la prueba de funcionalidad de los sensores de luz, se utilizó como referencia un aparato medidor de luz (WT_81DLM) y el multiparámetro AQ_FESZ utilizó un sensor BH1750. Ambos sensores se sometieron al aumento de número de filtros (papel celofán). Las lecturas se tomaron cada que se aumentaba un filtro.

RESULTADOS

Funcionamiento del prototipo

El prototipo está programado para tomar la lectura de los parámetros cada segundo, pero para no interferir en la lectura de cada sensor, se programó para tomar lecturas una después de las otra. Las lecturas son guardadas en la tarjeta Micro SD en un documento de texto, el cual está organizado en filas y columnas, para facilitar su lectura, manipulación y análisis posteriormente.

La programación se realizó en la plataforma Arduino 1.8.16, para empezar la escritura de programación, se incluyeron las librerías (Figura 8; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) necesarias que trabajan con los sensores (Arduino, 2020).

```
-----Librerias-----//
#include <SoftwareSerial.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <Wire.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <BH1750.h>
//#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include "RTClib.h"
#include "Adafruit_VEML6070.h"
#include "Adafruit_VEML6075.h"

#include <avr/wdt.h>
-----//
```

Figura 8. “Librerías”. Se incluyeron todas aquellas bibliotecas externas en el código de programación. Estas darán acceso a códigos prefabricados y específicos para cada uno de los componentes electrónicos. Como es el caso de la tarjeta SD; Termómetro 18B20; Sensores de luz, Modulo de reloj en tiempo real, por decir algunos.

Después de incluir las bibliotecas, se utilizó el “#define” (Figura 9) para nombrar los valores de las constantes (Arduino, 2020), como es el caso de los pines transmisores (tx) y receptores (rx).

```

//-----#define-----//
/*
//Arduino uno
#define rx 2
#define tx 3
#define s0 6
#define s1 7
#define chipSelect 10
#define pinDatosDQ 3
*/
#define rx A9
#define tx A5
#define s0 A3
#define s1 A1
#define led A0
#define gndLed A2
//define led2 A3
//define gndLed2 A6
#define chipSelect 53
#define pinDatosDQ 3
#define Header "Año\tMes\tDia\tHora\tMin\tSeg\tORP\tpH\tDO\tEC\tTDS\tSAL\tGRAV\tTempE\tTempI\tUVI-75\tUVA-75\tUVB-75\tUV-70\tLux"
#define Header2 "Anio, Mes, Dia, Hora, Min, Seg, ORP, pH, DO, EC, TDS, SAL, GRAV, TempE, TempI, UVI-75, UVA-75, UVB-75, UV-70, Lux"
#define Error "-4999"
//-----//

```

Figura 9. Definición de valores. El programa de Arduino utiliza el comando para nombrar valores de las constantes y sus respectivos valores que después se utilizaran en el código principal.

En la sección de “void setup ()”, se escribe el código de inicialización para cada uno de los sensores. En el caso del programa desarrollado, se inician todas las instrucciones enlistando si se encuentra o no el sensor conectado. Si no se detectó el sensor, se mostrará un mensaje “no encontrado, sin, fallo o no inicio correctamente” según sea el caso de cada sensor. En el caso contrario el mensaje sería “se inicializo correctamente” (Figura 10).

```

void setup() {
  delay(1000);
  wdt_disable(); // Desactivar el watchdog mientras se configura, para que no se resete
  wdt_enable(WDTO_4S); // Configurar watchdog a cuatro segundos

  inputstring.reserve(10);
  //sensorstring.reserve(30);

  pinMode(gndLed, OUTPUT);
  pinMode(led, OUTPUT);

  pinMode(s0, OUTPUT);
  pinMode(s1, OUTPUT);

  pinMode(s0, OUTPUT);
  pinMode(s1, OUTPUT);

  digitalWrite(gndLed, LOW);
  digitalWrite(led, LOW);

  Serial.begin(9600);
  mux_serial.begin(9600);
  Wire.begin();

  sensorDB18B20.begin();
  lightMeter.begin();
  uv6070.begin(VHML6070_1_2);

  if (uv6075.begin()) {
    bool_uv6075 = true;
  }
  else {
    //Serial.println("Sensor UV_6075 Fallo Setup")
    bool_uv6075 = false;
  }
}

```

```

if (!SD.begin(chipSelect)) {
  Serial.println(F("Memoria SD no conectada o Fallo en Memoria SD, "));
  //Led.print("Sin SD");
  //while (1);
  parpadeoLed();
}
else {
  //Serial.println("SD Iniciada");
}

if (!rtc.begin()) {
  Serial.println(F("RTC No Encontrado"));
  //Led.print("Sin RTC");
  //while (1);
  parpadeoLed();
}
else {
  //Serial.println("RTC Iniciado");
  // following line sets the RTC to the date & time this sketch was compiled
  rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
}

if (!rtc.isrunning()) {
  Serial.println(F("Reloj no inicio correctamente"));

  // This line sets the RTC with an explicit date & time, for example to set
  // January 21, 2014 at 3am you would call:
  //rtc.adjust(DateTime(2019, 1, 26, 12, 49, 0));
  parpadeoLed();
}
else {
}

```

Figura 10. Inicialización. El código fue diseñado a prueba de fallos, esto quiere decir que, automáticamente el código hace una inicialización en cascada inicializando sensor por sensor de cada sensor, si uno de ellos no está funcionando correctamente, no se puede seguir la inicialización. Lo cual se podrá identificar de manera física en luces indicadoras piloto de funcionamiento (LED y LED en sensores).

En la sección de “void loop()”, se ubicaron las instrucciones a repetirse para cada lectura, las cuales propiamente son la toma de datos. El microcontrolador manda señal y el sensor retorna el valor leído, se imprime en el archivo de texto y se continua con el siguiente sensor. En caso de obtención de datos erróneos, se imprimirá el valor “-4999”, un dato ilógico que no es probable que corresponda a una lectura real, ya que se encuentra fuera de los límites normales (Figura 11).

Estas instrucciones se repiten con cada uno de los sensores, y se vuelven a repetir hasta que es interrumpido el funcionamiento del aparato, esto es por un botón de apagado o apagado en automático por falta de baterías.

Desempeño de sensores

Para evaluar la confiabilidad de cada sensor se diseñaron las siguientes pruebas: Sensor contra soluciones de referencia, dispositivo comercial contra nuestro desarrollo, y contrastación con las especificaciones técnicas del fabricante. Cada comparación se sometió a pruebas estadísticas como la regresión lineal simple, prueba de ANOVA y t-Student para comprobar la relación y que tan significativa es entre dispositivos y soluciones de referencia y entre ambos dispositivos (Freedman, 2009; Freund *et al.*, 2006; Gotelli y Ellison, 2004; Goulden, 1953; Montgomery *et al.*, 2021). Los resultados de cada sensor se enlistan a continuación.

pH

Los resultados de la respuesta de electrodos AQ_FESZ y AZ 86031 respecto a una solución buffer se encuentran en la Tabla 6 y su gráfico en la Figura 12.

Tabla 6. Respuesta de ambos electrodos a una solución de referencia. Lecturas de los electrodos AZ 86031 y QA_FESZ sometidos a prueba de funcionalidad con respecto a soluciones Buffer como unidades de referencia al pH.

pH		
Solución Buffer	AZ 86031	AQ_FESZ
13	12.82	12.482
12	11.95	11.542
11	11.01	10.528
10.01	10.06	9.599
9	8.9	8.595
8	7.98	7.557
7	6.98	6.543
6	6.18	5.72
5	5.21	4.807
4.01	4.03	3.702
3	3.07	2.909

En el gráfico de matriz (Figura 12) se observa que las distribuciones de las lecturas de los electrodos de ambos multiparámetros siguieron una tendencia lineal respecto a los pH de referencia. De igual manera, se observa una tendencia lineal entre AZ 86031 y AQ_FESZ

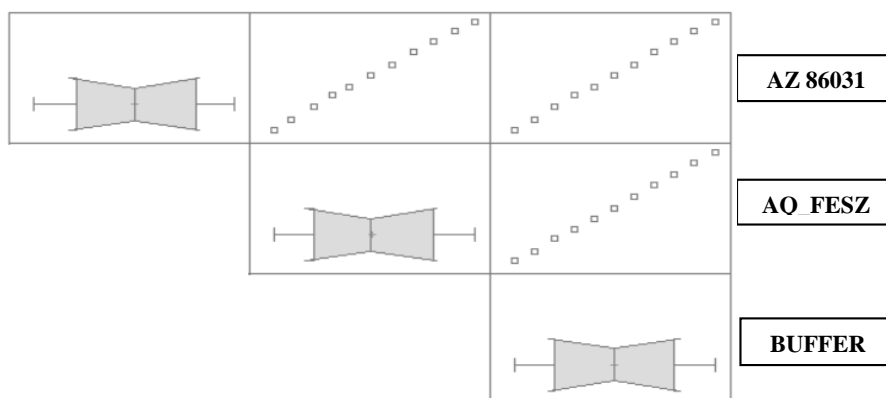


Figura 12. Tendencias entre lecturas de los electrodos de pH en referencia a un buffer. Las tendencias aparecen lineales en todos los casos. Cada lectura se distribuye homogéneamente en todo el intervalo de variación.

Sensor AZ 86031 y Solución buffer

Los resultados de la comprobación estadística de la relación entre el pH y las soluciones buffer se encuentran en la Tabla 7, y la gráfica de dispersión de la regresión para el modelo en la Figura 13. En los resultados encontramos que los niveles de probabilidad ($p=$

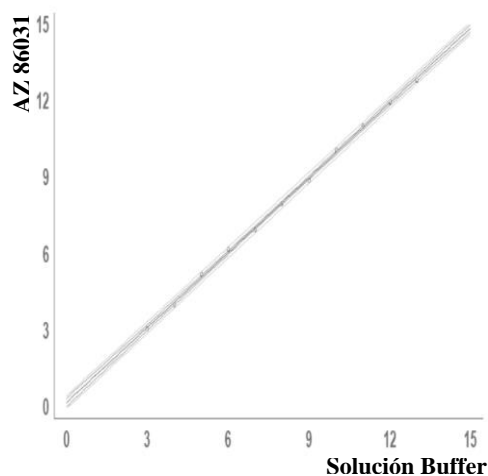


Figura 13. Modelo ajustado de dispersión. El modelo ajustado resultante de la relación entre las lecturas de pH tomadas por el electrodo de AZ 86031 y las soluciones Buffer, siguen tendencia lineal con baja variabilidad de los datos, ya que para cada “x” corresponde una “y”.

p -value) tanto para la pendiente y la ordenada al origen son menores al nivel de confianza de 0.05 (p -value = α = 0.05). En lo sucesivo emplearemos cuatro decimales en todos los valores.

La tabla de estadísticos de la regresión entre el sensor AZ 86031 y la solución buffer (Tabla 7) muestra que la pendiente es cercana a 1.0000 (pendiente=0.9775) con p -value \approx 0.0000 ($p \approx 0.0000 < \alpha = 0.05$), expresando una tendencia lineal. Estadísticamente la ordenada al origen no es igual a 0.000 (Ordenada= 0.1951 $p = 0.0261 < \alpha = 0.05$). Además, al ser $\alpha = 0.05 > p \approx 0.0000$ en la prueba de ANOVA, hay evidencia estadística de correlación entre las variables. El modelo tiene una $R^2_a = 99.9239\%$.

Tabla 7. Parámetros estadísticos entre pH de AZ 86031 y solución buffer. El análisis exploratorio de los datos derivados de la lectura del electrodo comercial en las soluciones buffer (AZ 86031) arrojó que el modelo lineal es el que mejor describe el fenómeno con una Pendiente= 0.9775 y Ordenada al origen= 0.1951.

<u>Regresión</u>				
	Estimado	EEst	t	p
Pendiente	0.9775	0.0085	114.6000	0.0000
Ordenada	0.1951	0.0733	2.6593	0.0261
R²	99.9315%			
R²_a	99.9239%			

<u>ANOVA</u>					
	SCuad	gl	Prom. Cuad	F	p
Modelo	105.0760	1	105.0760	13133.1900	0.0000
Residual	0.0720	9	0.0080		
Total (Corr.)	105.1480	10			

El análisis de residuales (Figura 14) indica la existencia de patrones en grupos de datos diferentes al lineal. Sin embargo, la variación de residuales no rebasa el rango de ± 2.00 , es decir, no se trata de casos extraordinarios.

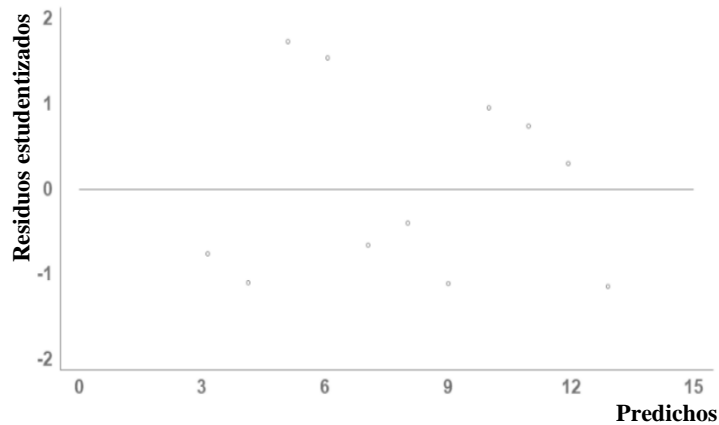


Figura 14. Análisis de los residuales de observados contra predichos. Los residuos estudentizados se observan agrupan en múltiples nubes de datos, lo que significa que existe variabilidad, pero no es estadísticamente significativa.

La gráfica de observados contra predichos (Figura 15) para el electrodo AZ 86031 nuevamente muestra una tendencia lineal. La tabla de estadísticos de regresión (Tabla 8) entre observados y esperados muestra que la pendiente (Pendiente= 0.999) es muy cercana a 1.0000 con $p_{pendiente} \approx 0.000 < \alpha = 0.05$.

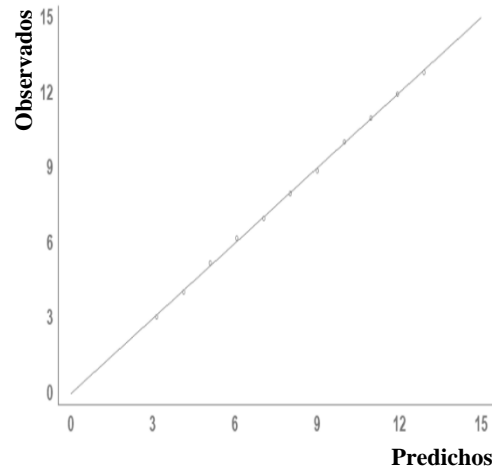


Figura 15. Similitud de datos predichos por el modelo ajustado y los obtenidos experimentalmente. Los datos obtenidos como predichos surgieron de la ecuación de la línea recta ($y = a + bx$). Se puede observar que existe similitud y relación entre los datos observados y predichos ya que siguen una tendencia lineal con poca variabilidad del modelo ajustado. Lo cual refuerza lo observado de la gráfica anterior.

En la tabla de análisis de regresión entre observados y predichos (Tabla 8) se muestra que la Pendiente= 1.0000 y la Ordenada= $-1.73e^{-09}$. La prueba de ANOVA expresa que en el modelo lineal existe una relación estadísticamente significativa entre las variables ($F=13133.1900$; $p_F=0.000$), además de que el modelo explica el 99.92% de los datos.

Tabla 8. Parámetros estadísticos entre Observados y Predichos para el pH. Los estadísticos muestran una pendiente perfecta y una ordenada al origen= 0.0000. Al tener t_{tablas} un valor mayor a la $t_{calculada}$ se confirma que no existe variación significativamente estadística entre los datos calculados y los observados en el experimento.

<u>Regresión</u>					
	Estimado	EEst	t	p	
Pendiente	1.0000	0.0087	114.6000	0.0000	
Ordenada	$-1.73e^{-09}$	0.0749	$-2.31e^{-08}$	1.0000	
R²	99.9315%				
R²_a	99.9239%				
t-Student	0.0000 < 1.7960				

<u>ANOVA</u>					
	SCuad	gl	Prom. Cuad	F	p
Modelo	105.0760	1	105.0760	13133.1900	0.0000
Residual	0.0720	9	0.0080		
Total (Corr.)	105.1480	10			

Sensor AQ_FESZ y Solución buffer

Los resultados de la comprobación estadística de la relación entre el pH y las soluciones buffers se encuentran en la Tabla 6, y la gráfica de dispersión de la regresión para el modelo en la Figura 16. En los resultados encontramos que el nivel de probabilidad de la pendiente es menor a 0.05. Siendo la ordenada al origen mayor a 0.05 ($P_{ordenada}=0.1556$).

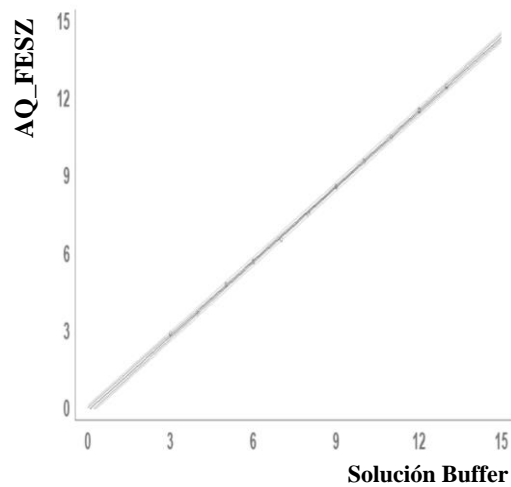


Figura 16. Modelo ajustado de dispersión. El modelo ajustado resultante de la relación entre las lecturas de pH tomadas por el electrodo de AQ_FESZ y las soluciones Buffer, siguen tendencia lineal con baja variabilidad de los datos, ya que para cada x corresponde una y.

La tabla de estadísticos de la regresión del sensor AQ_FESZ y la solución buffer (Tabla 9) muestra que la pendiente es cercana a 1 (pendiente=0.9656) con p -value igual a 0.0000 ($p \approx 0.0000 < \alpha = 0.05$), expresando una tendencia lineal. La ordenada al origen estadísticamente es 0.000 (Ordenada= -0.0917; $p = 0.1556 > \alpha = 0.05$). Además, al ser $\alpha = 0.05 > P_F \approx 0.0000$ en la prueba de ANOVA, existe correlación entre las variables. El modelo tiene una $R^2_a = 99.9493\%$.

Tabla 9. Parámetros estadísticos entre pH de AQ_FESZ y solución buffer. El análisis exploratorio de los datos derivados de la lectura del electrodo comercial en las soluciones buffer (AQ_FESZ) arrojó que el modelo lineal es el que mejor describe el fenómeno con una Pendiente= 0.9656 y Ordenada al origen= -0.0917.

Regresión

	Estimado	EEst	t	p
Pendiente	0.9656	0.0068	140.4220	0.0000
Ordenada	-0.0917	0.0591	-1.5499	0.1556
R²	99.9544%			
R²_a	99.9493%			

ANOVA

SCuad	gl	Prom. Cuad	F	p

Modelo	102.5270	1	102.5270	19718.3400	0.0000
Residual	0.0467	9	0.0051		
Total (Corr.)	102.5730	10			

El análisis de residuales contra los predichos (Figura 17), indica la existencia de diversos patrones en grupos de datos diferentes a un lineal. Aunque, la variación de los residuales es mayor a un rango de ± 2.00 , los datos no sobrepasan el rango de ± 2.50 la cual se encuentra dentro del rango de residuos extraordinarios no influyentes. Se observa un patrón de distribución residual oscilatorio.

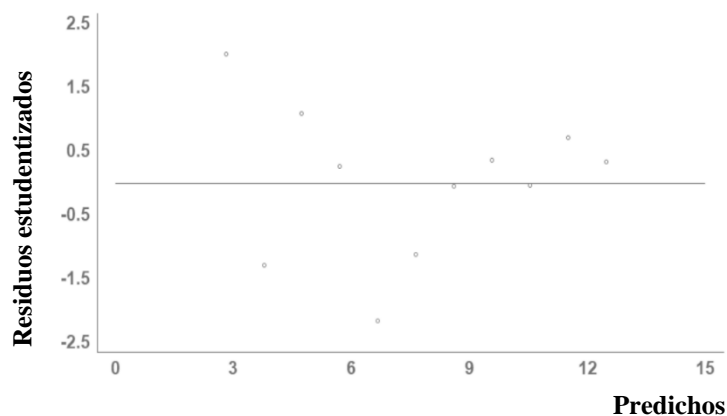


Figura 17. Análisis de los residuales de observados contra predichos. Los residuos estudentizados se observan agrupan en múltiples nubes de datos, lo que significa que existe variabilidad, pero no es estadísticamente significativa. Los residuos estudentizados no se consideran influyentes para el modelo.

La gráfica de observados contra predichos (Figura 18) para el electrodo AQ_FESZ muestra una tendencia lineal. La tabla de estadísticos de regresión entre observados y esperados (Tabla 10) muestra la pendiente= 0.9995 y la ordenada al origen= 0.0034.

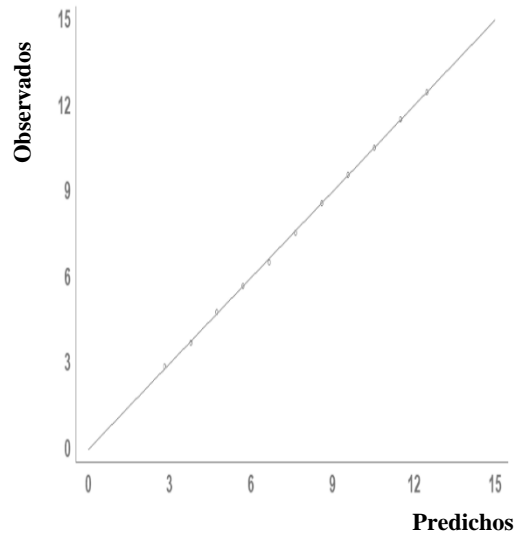


Figura 18. Similitud de datos predichos por el modelo ajustado y los obtenidos experimentalmente. Los datos obtenidos como predichos surgieron de la ecuación de la línea recta ($y= a+bx$). Se puede observar que existe similitud y relación entre los datos observados y predichos ya que siguen una tendencia lineal con poca variabilidad del modelo ajustado. Lo cual refuerza lo observado de la gráfica anterior.

En la tabla de análisis de regresión de observados y predichos (Tabla 10) muestra que la Pendiente= 1.0000 y la Ordenada= $4.84e^{-10}$. La prueba de ANOVA expresa que en el modelo lineal existe una relación estadísticamente significativa entre las variables $F= 19718.3400$; $p_F=0.000 < \alpha = 0.05$), además de que el modelo explica el 99.94% de los datos del fenómeno.

Tabla 10. Parámetros estadísticos entre Observados y Predichos para el pH. Los estadísticos muestran una pendiente perfecta y una ordenada al origen= $4.84e^{-10}$. Al tener t_{tablas} un valor mayor a la $t_{calculada}$ se confirma que no existe variación significativamente estadística entre los datos calculados y los observados en el experimento.

<u>Regresión</u>					
	Estimado	EEst	t	p	
Pendiente	1.0000	0.0071	140.4220	0.0000	
Ordenada	$4.84e^{-10}$	0.0585	$8.27e^{-09}$	1.0000	
R²	99.9544%				
R²_a	99.9493%				
t-Student	0.0000 < 1.7960				

<u>ANOVA</u>					
	SCuad	gl	Prom. Cuad	F	p
Modelo	102.5270	1	102.5270	19718.3400	0.0000
Residual	0.0467	9	0.0051		
Total (Corr.)	102.5730	10			

Relación entre electrodos (AZ 86031 y AQ_FESZ)

La distribución de los datos en el análisis de regresión entre las lecturas de los multiparámetros AZ 86031 y AQ_FESZ sigue una tendencia lineal (Figura 19).

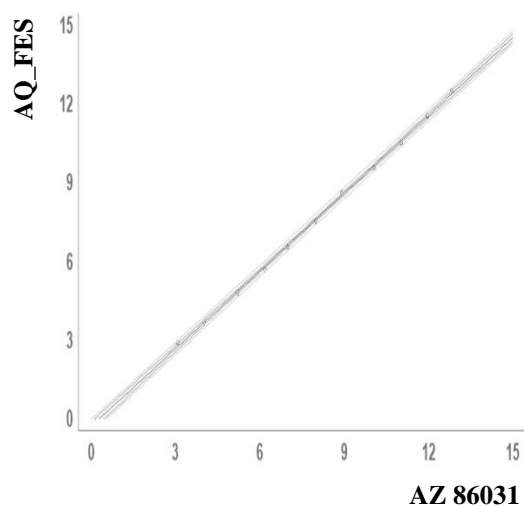


Figura 19. Modelo ajustado de dispersión. El modelo ajustado resultante de la relación entre las lecturas de pH tomadas por el electrodo de AZ 86031 y AQ_FESZ, siguen tendencia lineal con baja variabilidad de los datos, ya que no se observan lecturas fuera de los límites de variabilidad.

La tabla de estadísticos de la regresión entre el sensor AZ 86031 y AQ_ESZ (Tabla 11) muestra que la pendiente es cercana a 1 (Pendiente= 0.9873) con p -value igual a 0.0000 ($p \approx 0.0000 < \alpha = 0.05$), expresando una tendencia lineal. Además, al ser $\alpha = 0.05 > P_F \approx 0.0000$ en la prueba de ANOVA, existe correlación entre las variables. El modelo representa el 99.9232% del fenómeno.

Tabla 11. Parámetros estadísticos entre pH de AZ 86031 y AQ_FESZ. El análisis exploratorio de los datos derivados de la lectura del electrodo AZ 86031 y AQ_FESZ arrojó que el modelo lineal es el que mejor describe el fenómeno con una Pendiente= 0.9873 y Ordenada al origen= -0.2828.

<u>Regresión</u>				
	Estimado	EEst	t	p
Pendiente	0.9873	0.0086	114.0610	0.0000
Ordenada	-0.2808	0.0743	-3.7757	0.0044
R²	99.9309%			
R²_a	99.9232%			

<u>ANOVA</u>					
	SCuad	gl	Prom Cuad	F	p

Modelo	102.5020	1	102.5020	13009.8600	0.0000
Residual	0.0709	9	0.0078		
Total (Corr.)	102.5730	10			

El análisis de residuales contra los predichos (Figura 20), indica la existencia de diversos patrones en grupos de datos diferentes a un lineal pero mayormente distribuidos a lo largo de la línea central. La variación de los residuales es mayor a los rangos de las regresiones individuales de cada electrodo, sobrepasando el rango de residuos extraordinarios no influyentes ($RV > \pm 2.50$), observando en la Figura 20 podemos deducir que existe un valor que se aproxima al +3.00, considerado como punto influyente.

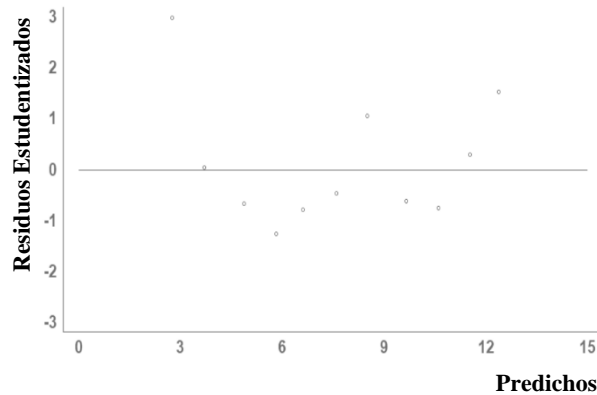


Figura 20. Análisis de los residuales de observados contra predichos. Los residuos estudentizados se observan agrupan en múltiples nubes de datos, lo que significa que existe variabilidad, pero no es estadísticamente significativa.

La gráfica de observados contra predichos (Figura 21) nuevamente muestra una tendencia lineal. La tabla de estadísticos de regresión (Tabla 12) entre observados y esperados muestra que la Pendiente= 1.0000.

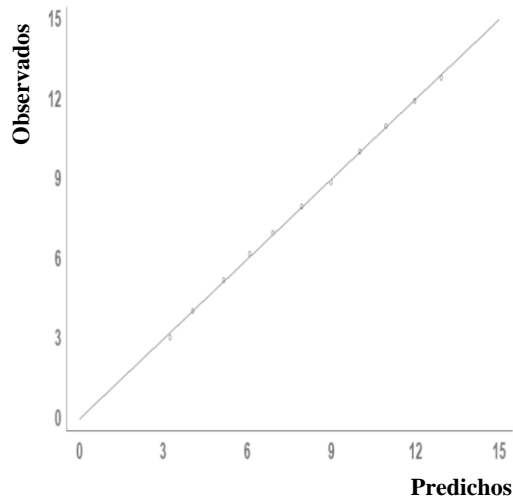


Figura 21. Similitud de datos predichos por el modelo ajustado y los obtenidos experimentalmente. Los datos obtenidos como predichos surgieron de la ecuación de la línea recta ($y = a + bx$). Se puede observar que existe similitud y relación entre los datos observados y predichos ya que siguen una tendencia lineal con poca variabilidad del modelo ajustado. Lo cual refuerza lo observado de la gráfica anterior.

En la tabla de análisis de regresión de observados y predichos (Tabla 12) muestra que la Pendiente= 1.0000 y la Ordenada= $-3.87e^{-11}$. La prueba de ANOVA expresa que en el modelo lineal existe una relación estadísticamente significativa entre las variables $F = 13009.8600$; $p_F = 0.000 < \alpha = 0.05$), además de que el modelo explica el 99.92% de los datos del fenómeno.

Tabla 12. Parámetros estadísticos entre Observados y Predichos para el pH. Los estadísticos muestran una pendiente perfecta y una ordenada al origen= 0.0000. Al tener t_{tablas} un valor mayor a la $t_{calculada}$ se confirma que no existe variación significativamente estadística entre los datos calculados y los observados en el experimento.

Regresión

	Estimado	EEst	t	p
Pendiente	1.0000	0.0087	114.061	0.0000
Ordenada	$-3.87e^{-11}$	0.0753	$-5.13e^{-10}$	1.0000
R²	99.9309%			
R²_a	99.9232%			
t-Student	$0.0000 < 1.7960$			

ANOVA

SCuad	gl	Prom.	F	p
-------	----	-------	---	---

Cuad					
Modelo	105.0760	1	105.0760	13009.8600	0.0000
Residual	0.0726	9	0.0080		
Total (Corr.)	105.1480	10			

Análisis de resultados (pH)

Al 95% de confianza, se puede asumir que la respuesta de este electrodo AZ 86031 corresponde al diseño del fabricante (ANOVA $P_F = 0.0000 < \alpha = 0.05$), lo mismo se obtiene para el AQ_FESZ, por lo que la comparación entre los dos electrodos debió hacerse asumiendo relaciones lineales entre ambos. La comparación entre los dos multiparámetros al no mostrar anomalías en sus extraordinarios ni tendencias diferentes a la lineal, es indicador de que las respuestas obtenidas por nuestro desarrollo son perfectamente comparables estadísticamente con el instrumento de referencia; Es importante recalcar que un poco más del 99.95% de las lecturas ($R^2_a = 99.9493\%$) puede ser explicado por el modelo lineal de respuestas, el resto se encontraría dentro de un nivel de variación tolerable según los rangos de distribución de los residuales (± 2.0).

Conclusiones (pH)

Para pH, ambos dispositivos (AZ 86031 y AQ_FESZ) presentan una respuesta lineal respecto al potencial hidrógeno. No hay diferencia significativa entre las lecturas de pH generadas por AQ_FESZ respecto a el dispositivo de referencia AZ 86031.

Ya que la respuesta es conforme a las especificaciones del fabricante y no hay diferencia entre el AQ_FESZ y el electrodo de referencia, se comprueba que nuestro desarrollo electrónico genera lecturas totalmente confiables, dentro de los estándares comerciales.

Electro-conductividad

Los resultados de la respuesta de los electrodos AQ_FESZ y AZ 86031 respecto a una solución salina de referencia se encuentran en la Tabla 13, y su respectivo gráfico en la Figura 22.

Tabla 13. Respuesta a la electro-conductividad entre los electrodos AZ 86031 y AQ_FESZ. Los valores de referencia se derivaron de soluciones salinas entre 55.000 y 12000 (uS/cm), en diluciones ml/10 ml.

Electro-conductividad		
Solución Salina (ml)	AZ 86031	AQ_FESZ
1	940	1014
2	1682	2115
3	2870	3313
4	3830	4015
5	4740	5110
6	5390	5975
7	6200	6943
8	7050	7756
9	7930	8563
10	8750	9335
11	9330	10460
12	10090	11100
13	10830	11850
14	11540	12530

En el gráfico de matriz (Figura 22) se observa que las distribuciones de lecturas provenientes de ambos multiparámetros siguieron una tendencia ligeramente convexa hacia arriba, mientras que entre ambos electrodos la tendencia tiende a ser más lineal.

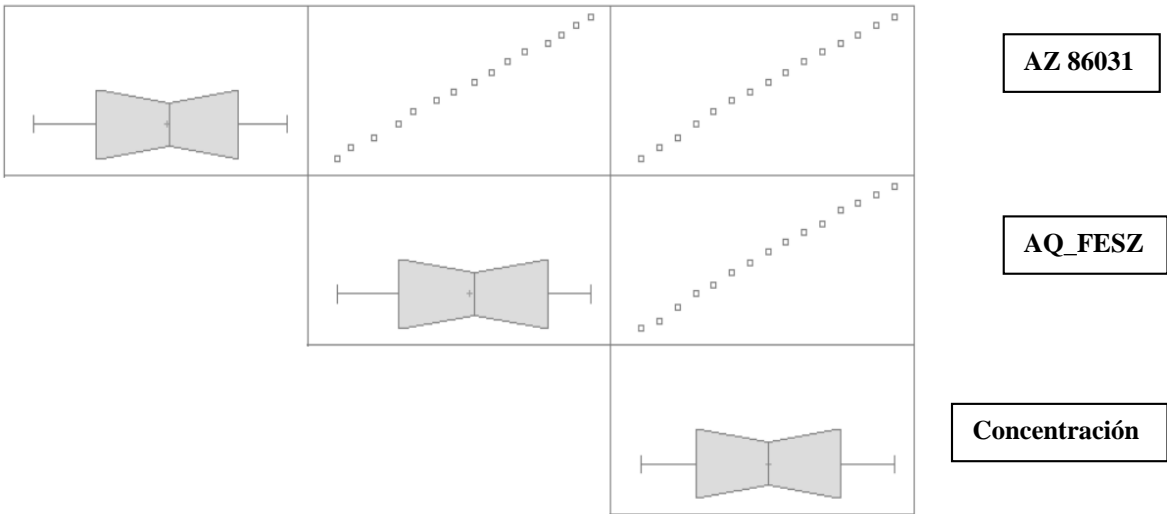


Figura 22. Tendencias entre lecturas de los electrodos de Electro-conductividad en referencia a solución salina. Las tendencias aparecen lineales en todos los casos. Cada lectura se distribuye homogéneamente en todo el intervalo de variación.

Sensor AZ 86031 y Solución salina

Los resultados de la comprobación estadística de la relación entre la solución salina para este electrodo se encuentran en la Tabla 13, y el gráfico de ajuste según el modelo de regresión en la Figura 23. En la Tabla 13 los niveles de probabilidad tanto para la pendiente y la ordenada al origen son menores a 0.05.

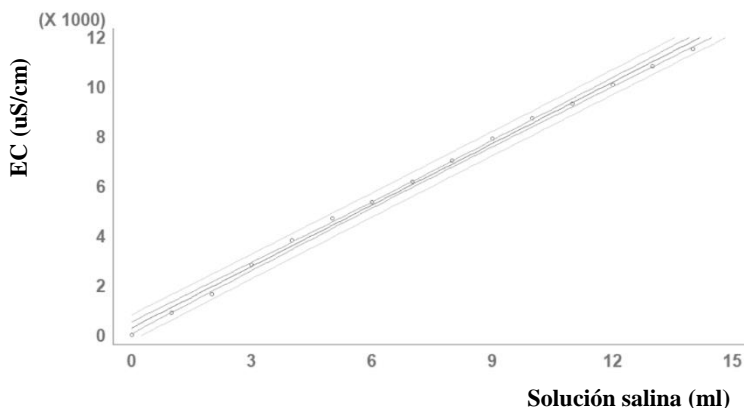


Figura 23. Modelo ajustado de dispersión. El modelo ajustado resultante de la relación entre las lecturas de Electro-conductividad tomadas por el electrodo de AZ 86031 y las soluciones salinas, siguen tendencia lineal con baja variabilidad de los datos, ya que para cada “x” corresponde una “y”.

La tabla de estadísticos de la regresión lineal del sensor AZ 86031 y la solución salina (Tabla 14) muestra que la pendiente es 814.1270 con un nivel de probabilidad cercano a 0.0000 ($p\text{-value} \approx 0.0000 < \alpha = 0.05$), expresando que la tendencia puede ser considerada como lineal. La ordenada al origen es igual a 406.3300 uS/cm ($p\text{-value} = 0.0100 < \alpha = 0.05$), que indica que con el 95% de confianza la ordenada al origen es diferente de 0.0000. Además, al ser $\alpha = 0.05 > p_F \approx 0.0000$ en la prueba de ANOVA, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables. Y que el modelo explica arriba del 99.63% de los datos ($R^2_a = 99.6273\%$).

Tabla 14. Parámetros estadísticos entre Electro-conductividad de AZ 86031 y solución salina. El análisis exploratorio de los datos derivados de la lectura del electrodo comercial en las soluciones salinas (AZ 86031) arrojó que el modelo lineal es el que mejor describe el fenómeno con una Pendiente= 814.1270 y Ordenada al origen= 406.3300.

<u>Regresión</u>				
	Estimado	EEst	t	p
Pendiente	814.1270	13.7974	59.0059	0.0000
Ordenada	406.3300	117.4810	3.4587	0.0047
R²	99.6565%			
R²_a	99.9279%			

<u>ANOVA</u>					
	SCuad	gl	Prom. Cuad	F	p
Modelo	1.8960e ⁸	1	1.8960e ⁸	4021.0400	0.0000
Residual	612989.0000	13	47153.0		
Total (Corr.)	1.9021e ⁸	14			

El análisis de residuales (Figura 24), indica la existencia de diversos patrones en grupos de datos diferentes al lineal. Aunque, la variación de los residuales es mayor a un rango de ± 2.00 , los datos no sobrepasan el rango de ± 2.50 la cual se encuentra dentro del rango de residuos extraordinarios no influyentes.

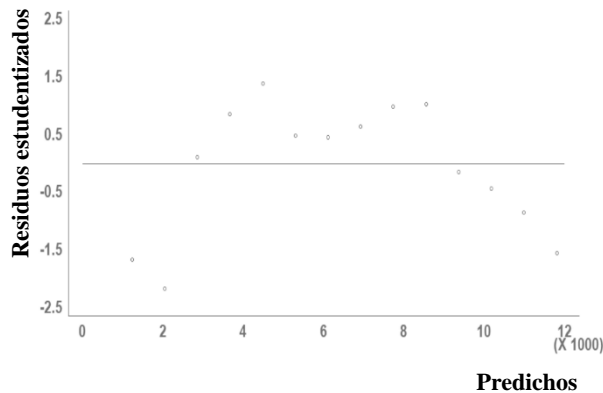


Figura 24. Análisis de los residuales de observados contra predichos. Los residuos estudentizados se observan agrupan en múltiples nubes de datos, lo que significa que existe variabilidad, pero no es estadísticamente significativa.

La gráfica de observados contra predichos (Figura 25) para el electrodo AZ 86031 muestra una tendencia lineal. La tabla de estadísticos de regresión (Tabla 15) entre observados y esperados muestra que la pendiente= 0.9965 ($p_{\text{pendiente}} \approx 0.000 < p\text{-value} = 0.05$).

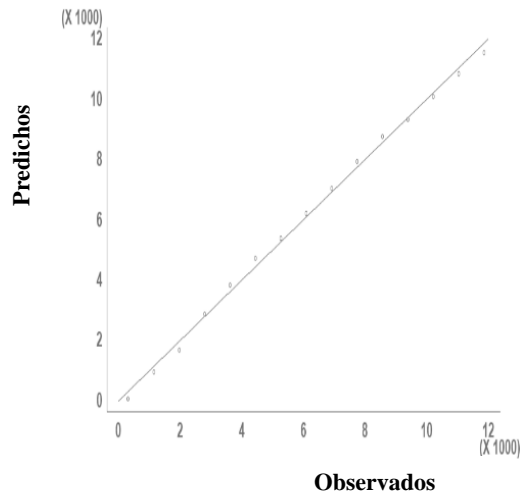


Figura 25. Similitud de datos predichos por el modelo ajustado y los obtenidos experimentalmente. Los datos obtenidos como predichos surgieron de la ecuación de la línea recta ($y= a+bx$). Se puede observar que existe similitud y relación entre los datos observados y predichos ya que siguen una tendencia lineal con poca variabilidad del modelo ajustado. Lo cual refuerza lo observado de la gráfica anterior.

La tabla de análisis de regresión entre observados y predichos (Tabla 15) muestra que la pendiente= 0.9965 y su ordenada al origen es 22.3681. La prueba de ANOVA expresa, que al ser $\alpha = 0.05 > p_F \approx 0.0000$ existe relación estadísticamente significativa entre observados y predichos. Además, el modelo explica el 99.63% del fenómeno. La prueba de t de Student confirma, que al ser $t_{\text{calculada}} < t_{\text{tablas}}$ ($0.7669 < 1.7610$) existe relación lineal entre observados y predichos.

Tabla 15. Parámetros estadísticos entre Observados y Predichos para Electro-conductividad. Los estadísticos muestran una pendiente= 0.9965 y una ordenada al origen= 22.3681. Al tener t_{tablas} un valor mayor a la $t_{calculada}$ se confirma que no existe variación significativamente estadística entre los datos calculados y los observados en el experimento.

Regresión

	Estimado	EEst	t	p
Pendiente	0.9965	0.0168	59.0059	0.0000
Ordenada	22.3681	123.2080	0.1815	0.8590
R²	99.6565%			
R²_a	99.96279%			
t-Student	0.7669	<1.761		

ANOVA

	SCuad	gl	Prom. Cuad	F	p
Modelo	1.50e ⁸	1	1.50 e ⁸	3481.6900	0.0000
Residual	517920	12	43160		
Total (Corr.)	1.51 e ⁸	13			

Sensor AQ_FESZ y Solución salina

Los resultados de la comprobación estadística de la relación entre la solución salina para este electrodo se encuentran en la Tabla 13, y el gráfico de ajuste según el modelo en la Figura 26. En los resultados encontramos que los niveles de probabilidad tanto para la pendiente y la ordenada al origen son menores a 0.05.

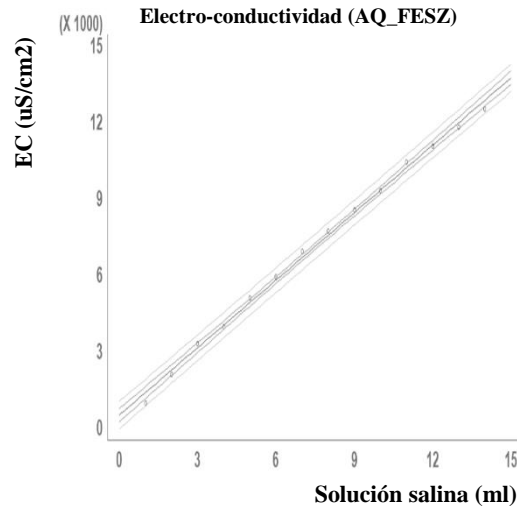


Figura 26. Modelo ajustado de dispersión. El modelo ajustado resultante de la relación entre las lecturas de Electro-conductividad tomadas por el electrodo de AQ_FESZ y las soluciones salinas, siguen tendencia lineal con baja variabilidad de los datos, ya que para cada “x” corresponde una “y”.

La tabla de estadísticos de la regresión lineal del sensor AQ_FESZ y la solución salina (Tabla 16) muestra que la pendiente es 882.8420 con una probabilidad cercana a 0.0000 ($p \approx 0.0000 < \alpha = 0.05$) lo que quiere decir que la tendencia puede considerarse como lineal. La ordenada al origen es igual a 527.1870 uS/cm (p -value = 0.0009 < $\alpha = 0.05$), que indica que con el 95% de confianza la ordenada al origen es diferente de 0.000. Además, al ser $\alpha = 0.05 > P_F \approx 0.0000$ en la prueba de ANOVA, existe relación estadísticamente significativa entre las variables. El modelo explica arriba del 99.66% del fenómeno ($R^2_a = 99.6632\%$).

Tabla 16. Parámetros estadísticos entre Electro-conductividad de AQ_FESZ y solución salina. El análisis exploratorio de los datos derivados de la lectura del electrodo comercial en las soluciones salinas (AQ_FESZ) arrojó que el modelo lineal es el que mejor describe el fenómeno con una Pendiente= 882.8420 y Ordenada al origen= 527.1870.

<u>Regresión</u>				
	Estimado	EEst	t	p
Pendiente	882.8420	14.2313	62.0350	0.0000
Ordenada	527.1870	121.1760	4.3506	0.0009
R²	99.6891%			
R²_a	99.6632%			

<u>ANOVA</u>					
	SCuad	gl	Prom. Cuad	F	p
Modelo	1.77 e ⁸	1	1.77 e ⁸	3848.3400	0.0000
Residual	552910	12	46075.9000		
Total (Corr.)	1.78 e ⁸	13			

El análisis de residuales contra predichos (Figura 27), indica la existencia de diversos patrones en grupos de datos diferentes a un lineal. Aunque, la variación de los residuales es mayor a un rango de ± 2.00 , los datos no sobrepasan el rango de ± 2.50 la cual se encuentra dentro del rango de residuos extraordinarios no influyentes. Se observa en la Figura 27 un patrón de distribución residual oscilatorio.

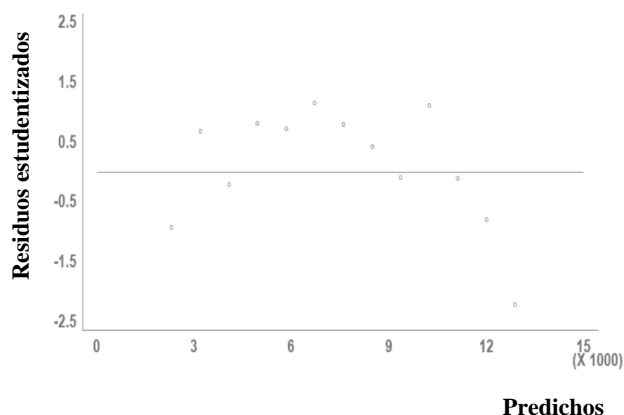


Figura 27. Análisis de los residuales de observados contra predichos. Los residuos estudentizados se observan agrupan en múltiples nubes de datos, lo que significa que existe variabilidad, pero no es estadísticamente significativa.

La gráfica de observados y predichos (Figura 28) para el electrodo AQ_FESZ muestra una tendencia lineal. La tabla de estadísticos de regresión entre observados y esperados muestra la pendiente= 0.9974 y la ordenada al origen= 17.2938.

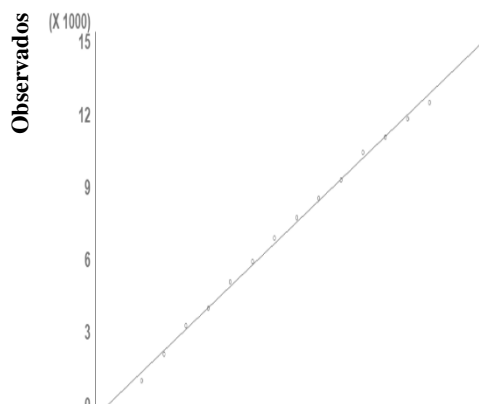


Figura 28. Similitud de datos predichos por el modelo ajustado y los obtenidos experimentalmente. Los datos obtenidos como predichos surgieron de la ecuación de la línea recta ($y= a+bx$). Se puede observar que existe similitud y relación entre los datos observados y predichos ya que siguen una tendencia lineal con poca variabilidad del modelo ajustado. Lo cual refuerza lo observado de la gráfica anterior.

La tabla de análisis de regresión entre observados y predichos (Tabla 17) muestra que la pendiente = 0.9968 y su ordenada al origen es 22.2213. La prueba de ANOVA expresa, que al ser $\alpha = 0.05 > P_F \approx 0.0000$, existe relación estadísticamente significativa entre observados y predichos. Además, el modelo explica el 99.6632% del fenómeno. La prueba

de t de Student confirma, que al ser $t_{calculada} < t_{tablas}$ ($0.7238 < 1.761$) existe relación lineal entre observados y predichos.

Tabla 17. Parámetros estadísticos entre Observados y Predichos para Electro-conductividad. Los estadísticos muestran una pendiente= 0.9968 y una ordenada al origen= 22.2213. Al tener t_{tablas} un valor mayor a la $t_{calculada}$ se confirma que no existe variación significativamente estadística entre los datos calculados y los observados en el experimento.

<u>Regresión</u>					
	Estimado	EEst	t	p	
Pendiente	0.9968	0.0160	62.0350	0.0000	
Ordenada	22.2213	128.3640	0.1731	0.8654	
R²	99.6891%				
R²_a	99.6632%				
t-Student	0.7238<1.761				

<u>ANOVA</u>					
	SCuad	gl	Prom. Cuad	F	p
Modelo	1.77 e ⁸	1	1.77 e ⁸	3848.3400	0.0000
Residual	551192	12	45932.6		
Total (Corr.)	1.77 e ⁸	13			

Relación entre electrodos (AZ 86031 y AQ_FESZ)

Los resultados de la comprobación estadística de la relación entre el electrodo AZ 86031 y AQ_FESZ se encuentran en la Tabla 18, y el gráfico de ajuste del modelo de regresión en la Figura 29.

Electro-conductividad (AZ 86031 VS AQ_FESZ)

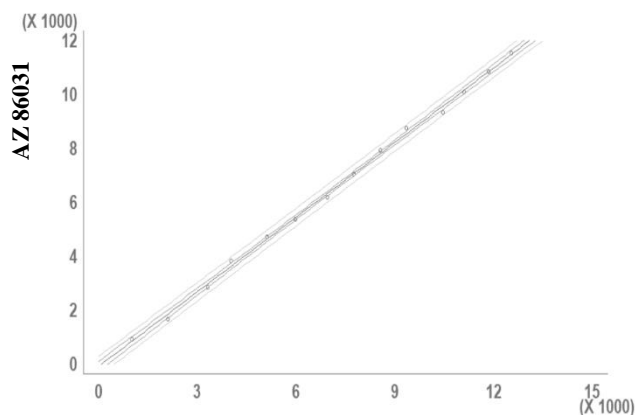


Figura 29. Modelo ajustado de dispersión. El modelo **AQ_FESZ** frente a la relación entre las lecturas de Electro-conductividad tomadas por el electrodo de AZ 86031 y AQ_FESZ, siguen tendencia lineal con baja variabilidad de los datos, ya que no se observan lecturas fuera de los límites de variabilidad.

La tabla de estadísticos de la regresión entre el sensor AZ 86031 y AQ_FESZ (Tabla 18) muestra que la pendiente es cercana a 1 (Pendiente= 0.9215) con un nivel de probabilidad cercano a 0.000 ($p \approx 0.0000 < \alpha = 0.05$), lo cual quiere decir que la tendencia es considerada lineal. Además, en la prueba de ANOVA al ser $\alpha = 0.05 > P_F \approx 0.0000$, existe relación estadísticamente significativa entre ambos electrodos. El modelo lineal explica el 99.82% del fenómeno ($R^2_a = 99.8196\%$).

Tabla 18. Parámetros estadísticos entre Electro-conductividad de AZ 86031 y AQ_FESZ. El análisis exploratorio de los datos derivados de la lectura del electrodo AZ 86031 y AQ_FESZ arrojó que el modelo lineal es el que mejor describe el fenómeno con una Pendiente= 0.9215 y Ordenada al origen= -0.75.4105.

<u>Regresión</u>				
	Estimado	EEst	t	p
Pendiente	0.9215	0.0108	84.8102	0.0000
Ordenada	-75.4105	86.7962	-0.8688	0.4020
R²	99.8334%			
R²_a	99.8196%			

<u>ANOVA</u>					
	SCuad	gl	Prom. Cuad	F	p
Modelo	1.51 e ⁸	1	1.51 e ⁸	7192.7800	0.0000
Residual	252012	12	21001		
Total (Corr.)	1.51 e ⁸	13			

El análisis de residuales contra predichos (Figura 30), indica la existencia de diversos patrones en grupos de datos diferentes a un lineal pero mayormente distribuidos a lo largo de la línea central. Sin embargo, la variación de residuales no rebasa el rango de ± 2.00 , es decir, no se trata de casos extraordinarios. Se observa un patrón de distribución oscilatorio de los valores residuales.

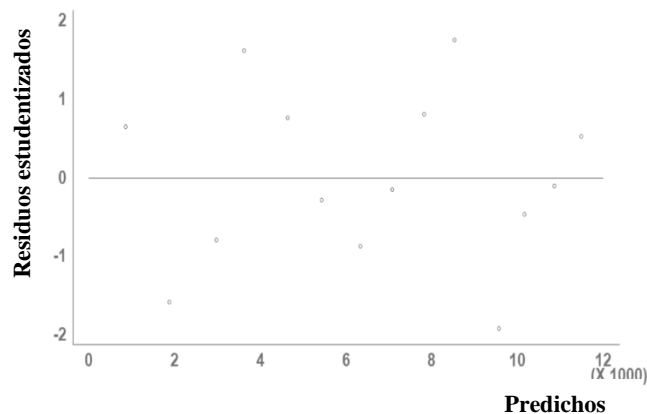


Figura 30. Análisis de los residuales de observados contra predichos. Los residuos estandarizados se observan agrupan en múltiples nubes de datos, lo que significa que existe variabilidad, pero no es estadísticamente significativa.

La gráfica de observados y predichos (Figura 31) muestra una tendencia lineal, con un patrón de distribución similar al de los residuos. La tabla de estadísticos de regresión entre observados y esperados tiene una pendiente= 1.0000 y la ordenada al origen= $-1.25e^{-07}$, y una $R^2_a= 99.8196\%$, lo cual quiere decir que el electrodo AQ_FESZ se encuentra dentro de los estándares estadísticos y niveles de predicción comparables con el electrodo de referencia (AZ 86031).

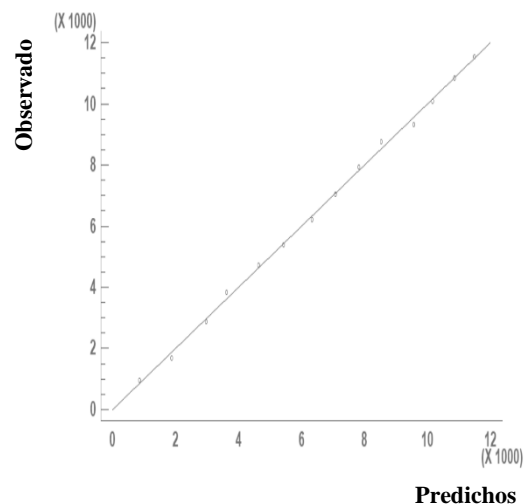


Figura 31. Similitud de datos predichos por el modelo ajustado y los obtenidos experimentalmente. Los datos obtenidos como predichos surgieron de la ecuación de la línea recta ($y= a+bx$). Se puede observar que existe similitud y relación entre los datos observados y predichos ya que siguen una tendencia lineal con poca variabilidad del modelo ajustado. Lo cual refuerza lo observado de la gráfica anterior.

La tabla de análisis de regresión entre observados y predichos (Tabla 19) muestra que la pendiente = 1.0000 y una ordenada al origen $-1.25e^{-7}$. La prueba de ANOVA expresa, que al ser $\alpha = 0.05 > P_F \approx 0.0000$, existe relación estadísticamente significativa entre observados y predichos. además de que el modelo explica el 99.82% de los datos del fenómeno ($R^2_a = 99.8196\%$). La prueba de t de Student confirma, que al ser $t_{calculada} < t_{tablas}$ ($0.0000 < 1.761$) existe relación lineal entre observados y predichos.

Tabla 19. Parámetros estadísticos entre Observados y Predichos para Electro-conductividad. Los estadísticos muestran una pendiente perfecta y una ordenada al origen = 0.0000. Al tener t_{tablas} un valor mayor a la $t_{calculada}$ se confirma que no existe variación significativamente estadística entre los datos calculados y los observados en el experimento.

<u>Regresión</u>					
	Estimado	EEst	t	p	
Pendiente	1.0000	0.0117	84.8102	0.0000	
Ordenada	$-1.25e^7$	86.0014	$-1.45e^{-9}$	1.0000	
R²	99.8334%				
R²_a	99.8196%				
t-Student	0.0000 < 1.761				

<u>ANOVA</u>					
	SCuad	gl	Prom. Cuad	F	p
Modelo	$1.51e^8$	1	$1.51e^8$	7192.7800	0.0000
Residual	252012	12	21001		
Total (Corr.)	$1.51e^8$	13			

Análisis de resultados (EC)

Se puede asumir con el 95% de confianza, que la respuesta individual de los electrodos AZ 86031 y AQ_FESZ corresponde a la diseñada por cada fabricante, ya que, con base en las pruebas estadísticas anteriores, el modelo que mejor describe a los fenómenos es el lineal, existiendo relación estadísticamente significativa (ANOVA: $P_F < p$ -value; t-Student: $t_{calculada} < t_{tablas}$); por lo que la comparación entre los dos electrodos debió hacerse asumiendo

relaciones lineales entre ambos. La comprobación estadística entre ambos electrodos (AZ 86031 y AQ_FESZ), al mostrar una tendencia lineal con alta correlación entre electrodos (t-Student: $t_{calculada} < t_{tablas}$; ANOVA: $P_F < p\text{-value}$) sin existir residuales extraordinarios, indica que la respuesta obtenida por nuestro desarrollo no es estadísticamente diferente a la obtenida por el instrumento de referencia (AZ 86031). Es importante recalcar que AQ_FESZ en cuanto a valores de electro-conductividad mediante el modelo lineal de respuesta, puede explicar el 99.66% del fenómeno ($R^2_a = 99.6632\%$), el resto se encontraría dentro de un nivel de variación tolerable según los rangos de distribución de los residuales (± 2.5000).

Conclusiones (EC)

Para EC, ambos dispositivos (AZ 86031 y AQ_FESZ) presentan una respuesta lineal respecto a la conductividad del agua. No hay diferencia significativa entre las lecturas de EC generadas por AQ_FESZ respecto a el dispositivo de referencia AZ 86031.

Al igual que con el electrodo de pH, se comprueba que nuestro desarrollo electrónico genera lecturas totalmente confiables, dentro de los estándares comerciales.

Total de solidos disueltos (TDS)

Los resultados de la respuesta de electrodos AQ_FESZ y AZ 86031 respecto a una solución salina de referencia se encuentran en la Tabla 20 y su respectivo gráfico en la Figura 32.

Tabla 20. Respuesta de ambos electrodos a una solución de referencia. Lecturas de los electrodos AZ 86031 y AQ_FESZ sometidos a prueba de funcionalidad con respecto a solución salina como unidades de referencia.

Total de Solidos Disueltos (ppm)		
Solución salina (ml)	AZ 86031	AQ_FESZ
1	459	485
2	838	946
3	1440	1788
4	1990	2227
5	2350	2713
6	2700	3226
7	3140	3778
8	3530	4194
9	3960	4619
10	4370	5036
11	4670	5636
12	5020	6000
13	5400	6402
14	5810	6788

En el gráfico de matriz (Figura 32) se observa que las distribuciones de las lecturas provenientes de ambos multiparámetros siguieron una tendencia casi lineal, con una ligera concavidad hacia arriba, mientras que entre ambos electrodos la tendencia tiende a ser más lineal.

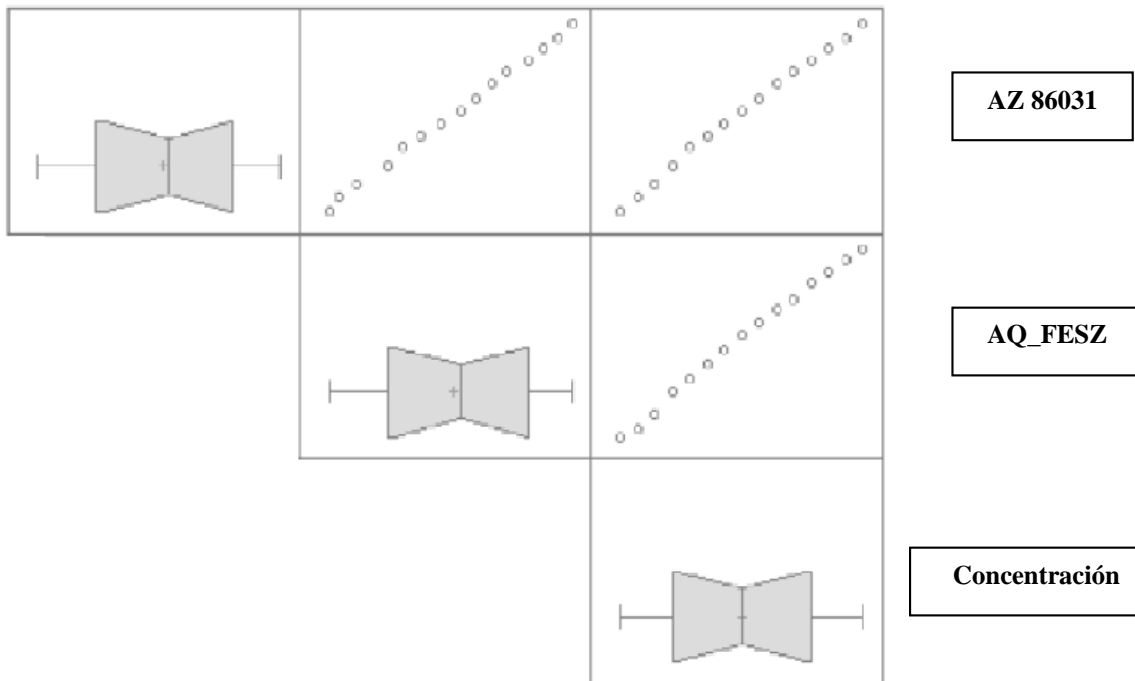


Figura 32. Tendencias entre lecturas de los electrodos de TDS en referencia solución salina.
 Las tendencias aparecen lineales en todos los casos. Cada lectura se distribuye homogéneamente en todo el intervalo de variación.

Sensor AZ 86031 y Solución salina

Los resultados de la comprobación estadística de la relación entre TDS y la solución salina para este electrodo se encuentran en la Tabla 20, y la gráfica de ajuste según el modelo de regresión en la Figura 33. Los niveles de probabilidad tanto para la pendiente y la ordenada al origen son menores a 0.05.

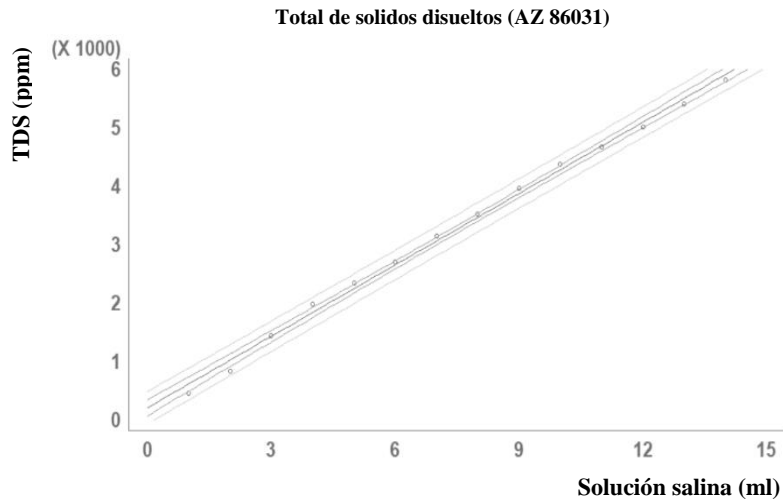


Figura 33. Modelo ajustado de dispersión. El modelo ajustado resultante de la relación entre las lecturas de TDS tomadas por el electrodo de AZ 86031 y las soluciones salinas, siguen tendencia lineal con baja variabilidad de los datos, ya que para cada “x” corresponde una “y”.

La tabla de estadísticos de la regresión lineal del sensor AZ 86031 y la solución salina (Tabla 21) muestra que la pendiente es 406.582 con un nivel de probabilidad cercano a 0.0000 ($p\text{-value} \approx 0.0000 < \alpha = 0.05$), lo cual indica que la tendencia puede ser considerada como lineal. La ordenada al origen es igual a 213.275 ppm ($p\text{-value} = 0.0100 < \alpha = 0.05$), que indica que al 95% de confianza, la ordenada al origen es diferente de 0.0000. Además, al ser $\alpha = 0.05 > P_F \approx 0.0000$ en la prueba de ANOVA, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables. Así mismo, el modelo explica arriba del 99.57% de los datos ($R^2_a = 99.5755\%$).

Tabla 21. Parámetros estadísticos entre TDS de AZ 86031 y solución salina. El análisis exploratorio de los datos derivados de la lectura del electrodo comercial en las soluciones salinas (AZ 86031) arrojó que el modelo lineal es el que mejor describe el fenómeno con una Pendiente= 406.5820 y Ordenada al origen= 213.2750.

Regresión

	Estimado	EEst	t	p
Pendiente	406.5820	7.3611	55.2334	0.0000
Ordenada	213.2750	62.6781	3.4027	0.0052
R²	99.6082%			
R²_a	99.5755%			

ANOVA

	SCuad	gl	Prom. Cuad	F	p
Modelo	3.76e ⁷	1	3.76 e ⁷	3050.7300	0.0000
Residual	147930	12	12327.5000		
Total (Corr.)	3.78 e ⁷	13			

El análisis de residuales (Figura 34) indica la existencia de diversos patrones en grupos de datos diferentes al lineal. Sólo uno de los residuos se encuentra entre el rango de residuos extraordinarios no influyentes (± 2.50) y el resto, corresponde a residuos no extraordinarios.

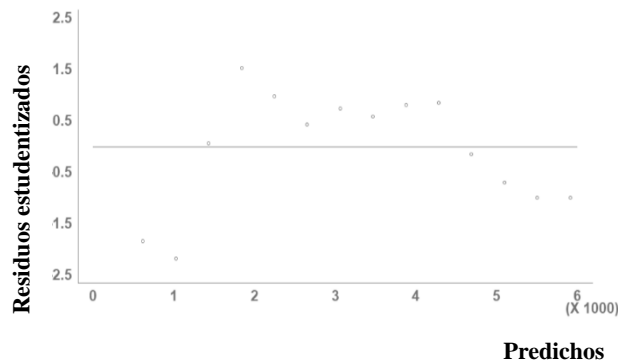


Figura 34. Análisis de los residuales de observados contra predichos. Los residuos estudentizados se observan agrupan en múltiples nubes de datos, lo que significa que existe variabilidad, pero no es estadísticamente significativa.

En la gráfica de observados contra predichos (Figura 35) para el electrodo AZ 86031 se muestra una tendencia lineal. La tabla de estadísticos de regresión (Tabla 22) entre observados y esperados muestra para la pendiente que: Pendiente= 1.0000 con $p_{pendiente} \approx 0.000 < \alpha=0.05$; y para la ordenada al origen: Ordenada= $2.04e^{-08}$ con $p_{ordenada} \approx 1.0000 > \alpha=0.05$

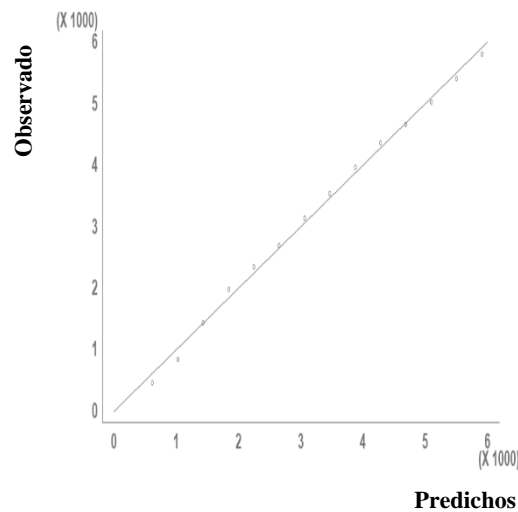


Figura 35. Similitud de datos predichos por el modelo ajustado y los obtenidos experimentalmente. Los datos obtenidos como predichos surgieron de la ecuación de la línea recta ($y= a+bx$). Se puede observar que existe similitud y relación entre los datos observados y predichos ya que siguen una tendencia lineal con poca variabilidad del modelo ajustado. Lo cual refuerza lo observado de la gráfica anterior.

En la tabla de análisis de regresión entre observados y predichos (Tabla 22) encontramos una pendiente de 1.0000 y una ordenada al origen de $-2.04e^{-8}$, la cual podría considerarse que parte del origen. La prueba de ANOVA expresa, que al ser $\alpha = 0.05 > p_F \approx 0.0000$ existe relación estadísticamente significativa entre observados y predichos. Además, el modelo explica el 99.50% de los datos. La prueba de t-Student confirma, que al ser $t_{calculada} < t_{tablas}$ ($0.0000 < 1.7610$) existe relación lineal entre observados y predichos.

Tabla 22. Parámetros estadísticos entre Observados y Predichos para TDS. Los estadísticos muestran una pendiente perfecta y una ordenada al origen = $-2.04e^{-08}$. Al tener t_{tablas} un valor mayor a la $t_{calculada}$ se confirma que no existe variación significativamente estadística entre los datos calculados y los observados en el experimento.

Regresión

	Estimado	EEst	t	p
Pendiente	1.0000	0.0181	55.2334	0.0000
Ordenada	$-2.04e^{-08}$	66.1046	$-3.09e^{-10}$	1.0000
R²	99.6565%			
R²_a	99.96279%			
t-Student	0.7669 < 1.761			

ANOVA

	SCuad	gl	Prom Cuad	F	p
Modelo	$3.76e^7$	1	$3.76 e^7$	3050.7300	0.0000
Residual	147930	12	12327.5000		
Total (Corr.)	$3.78 e^7$	13			

Sensor AQ_FESZ y Solución salina

Los resultados de la comprobación estadística de la relación entre TDS y las soluciones salinas se encuentran en la Tabla 20, y la gráfica de ajuste según el modelo en la Figura 36. En los resultados encontramos que los niveles de probabilidad tanto para la pendiente y la ordenada al origen son menores a 0.05.

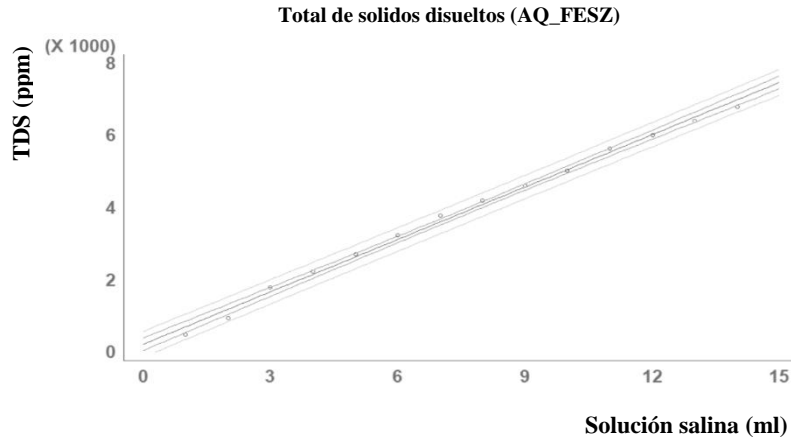


Figura 36. Modelo ajustado de dispersión. El modelo ajustado resultante de la relación entre las lecturas de TDS tomadas por el electrodo de AQ_FESZ y las soluciones salinas, siguen tendencia lineal con baja variabilidad de los datos, ya que para cada “x” corresponde una “y”.

La tabla de estadísticos de la regresión lineal del sensor AQ_FESZ y la solución salina (Tabla 23) muestra que la pendiente es 483.376 con $p\text{-value} = 0.0000$ ($p \approx 0.0000 < \alpha = 0.05$), expresando una tendencia lineal. La ordenada al origen es igual a 220.253 ppm ($p = 0.0100 < \alpha = 0.05$), lo que indica que al 95% de confianza, la ordenada al origen es diferente de 0.000. Además, al ser $\alpha = 0.05 > P_F \approx 0.0000$ en la prueba de ANOVA, existe relación estadísticamente significativa entre las variables. El modelo explica el 99.4995% de los datos.

Tabla 23. Parámetros estadísticos entre TDS de AQ_FESZ y solución salina. El análisis exploratorio de los datos derivados de la lectura del electrodo comercial en las soluciones salinas (AQ_FESZ) arrojó que el modelo lineal es el que mejor describe el fenómeno con una Pendiente= 483.3760 y Ordenada al origen= 220.2530.

<u>Regresión</u>					
	Estimado	EEst	t	p	
Pendiente	483.3760	9.5067	50.8455	0.0000	
Ordenada	220.2530	80.9471	2.7209	0.0186	
R²	99.5380%				
R²_a	99.4995%				

<u>ANOVA</u>					
	SCuad	gl	Prom. Cuad	F	p
Modelo	5.32e7	1	5.32 e ⁷	2585.2700	0.0000
Residual	246733	12	20561.1000		
Total (Corr.)	5.34 e7	13			

La gráfica de residuos contra predichos (Figura 37), indica la existencia de diversos patrones en grupos de datos diferentes a un lineal. Sólo un valor excede el umbral de ± 2.50 (caso extraordinario), mientras que el resto corresponde a residuos no extraordinarios. En resumen, a excepción del extraordinario, el patrón de distribución residual es oscilatorio, no extraordinario.

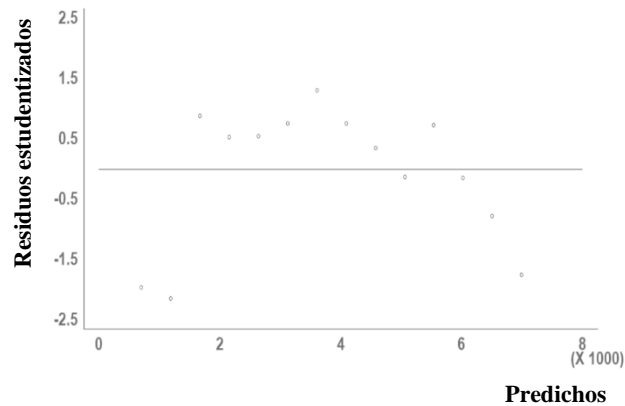


Figura 37. Análisis de los residuales de observados contra predichos. Los residuos estudentizados se observan agrupan en múltiples nubes de datos, lo que significa que existe variabilidad, pero no es estadísticamente significativa.

La gráfica de observados y predichos (Figura 38) para el electrodo AQ_FESZ muestra una tendencia lineal. La tabla de estadísticos de regresión entre observados y esperados presenta una pendiente= 1.0000 y una ordenada al origen= $4.02e^{-9}$.

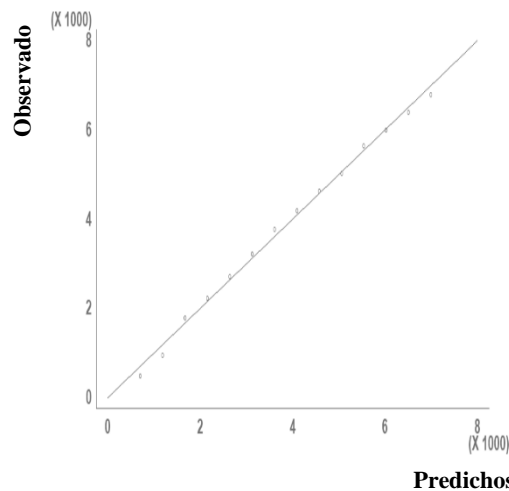


Figura 38. Similitud de datos predichos por el modelo ajustado y los obtenidos experimentalmente. Los datos obtenidos como predichos surgieron de la ecuación de la línea recta ($y= a+bx$). Se puede observar que existe similitud y relación entre los datos observados y predichos ya que siguen una tendencia lineal con poca variabilidad del modelo ajustado. Lo cual refuerza lo observado de la gráfica anterior.

En la tabla de análisis de regresión entre observados y predichos (Tabla 24) la pendiente es 1.0000 ($p\text{-value}= 0.000 < \alpha=0.05$) y la ordenada al origen muy cercana al 0.00 (Ordenada= $4.02e^{-9}$; $p\text{-value}= 1.000 > \alpha=0.05$). La prueba de ANOVA expresa, que al ser α

= 0.05 > $P_F \approx 0.0000$, existe relación estadísticamente significativa entre observados y predichos. Además, el modelo explica el 99.4995% de los datos. La prueba de t-Student confirma, que al ser $t_{calculada} < t_{tablas}$ ($0.0000 < 1.761$) existe relación lineal entre observados y predichos.

Tabla 24. Parámetros estadísticos entre Observados y Predichos para TDS. Los estadísticos muestran una pendiente perfecta y una ordenada al origen = $4.02e^{-9}$. Al tener t_{tablas} un valor mayor a la $t_{calculada}$ se confirma que no existe variación significativamente estadística entre los datos calculados y los observados en el experimento.

<u>Regresión</u>					
	Estimado	EEst	t	p	
Pendiente	1.0000	0.0196	50.8455	0.0000	
Ordenada	$4.02e^{-9}$	84.7875	$4.74e^{-11}$	1.0000	
R²	99.5380%				
R²_a	99.4995%				
t-Student	0.0000 < 1.761				

<u>ANOVA</u>					
	SCuad	gl	Prom. Cuad	F	p
Modelo	$5.32e^7$	1	$5.32e^7$	2585.2700	0.0000
Residual	246733	12	20561.1		
Total (Corr.)	$5.34e^7$	13			

Relación entre electrodos (AZ 86031 VS AQ_FESZ)

Los resultados de la comprobación estadística de la relación entre el electrodo AZ 86031 y AQ_FESZ se encuentran en la Tabla 25, y el gráfico de ajuste del modelo de regresión en la Figura 39.

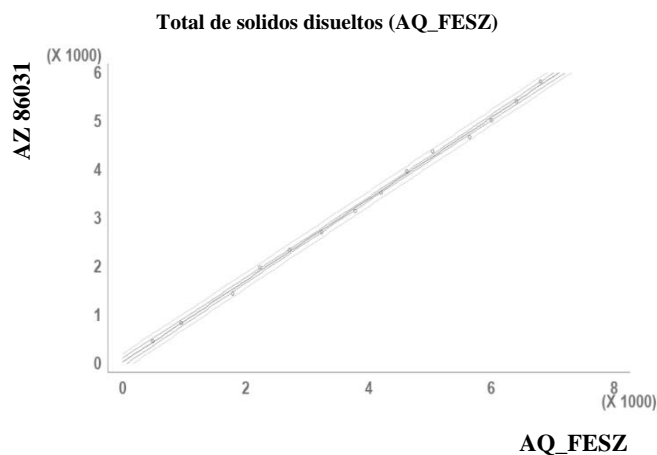


Figura 39. Modelo ajustado de dispersión. El modelo ajustado resultante de la relación entre las lecturas de TDS tomadas por el electrodo de AZ 86031 y AQ_FESZ, siguen tendencia lineal con baja variabilidad de los datos, ya que no se observan lecturas fuera de los límites de variabilidad.

La tabla de estadísticos de la regresión entre el sensor AZ 86031 y AQ_FESZ (Tabla 25) muestra que la pendiente es 0.8402 con un nivel de probabilidad $p \approx 0.0000 < \alpha = 0.0500$, lo cual quiere decir que la tendencia puede considerarse como lineal. Además, en la prueba de ANOVA, al ser $\alpha = 0.0500 > P_F \approx 0.0000$, existe relación estadísticamente significativa entre ambos electrodos. El modelo lineal explica el 99.83% de los datos ($R^2_a = 99.8367\%$).

Tabla 25. Parámetros estadísticos entre TDS de AZ 86031 y AQ_FESZ. El análisis exploratorio de los datos derivados de la lectura del electrodo AZ 86031 y AQ_FESZ arrojó que el modelo lineal es el que mejor describe el fenómeno con una Pendiente= 0.8402 y Ordenada al origen= 31.5917.

Regresión

	Estimado	EEst	t	p
Pendiente	0.8402	0.0094	89.1528	0.0000
Ordenada	31.5917	40.6479	0.7772	0.4521
R²	99.8493%			
R²_a	99.8367%			

ANOVA

	SCuad	gl	Prom. Cuad	F	p
Modelo	3.77e7	1	3.77 e ⁷	7948.2100	0.0000
Residual	56916.7	12	4743.06		
Total (Corr.)	3.78 e7	13			

El análisis de residuales contra predichos (Figura 40), indica la existencia de diversos patrones en grupos de datos diferentes al lineal pero mayormente distribuidos a lo largo de la línea central. Sin embargo, la variación de residuales no rebasa el rango de ± 2.00 , es decir, no se trata de casos extraordinarios. Se observa en la Figura 40 un patrón de distribución aleatorio de los valores residuales.

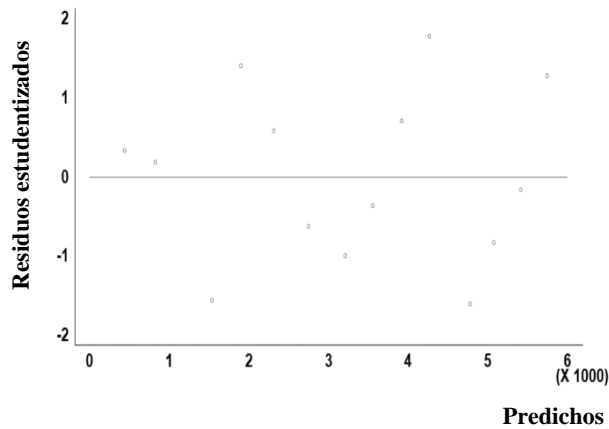


Figura 40. Análisis de los residuales de observados contra predichos. Los residuos estudentizados se observan agrupan en múltiples nubes de datos, lo que significa que existe variabilidad, pero no es estadísticamente significativa.

La gráfica de observados contra predichos (Figura 41) muestra una tendencia lineal, con un patrón de distribución similar al de los residuos. La tabla de estadísticos de regresión entre observados y esperados tiene una pendiente= 0.9999 y la ordenada al origen= 6.0721e-5.

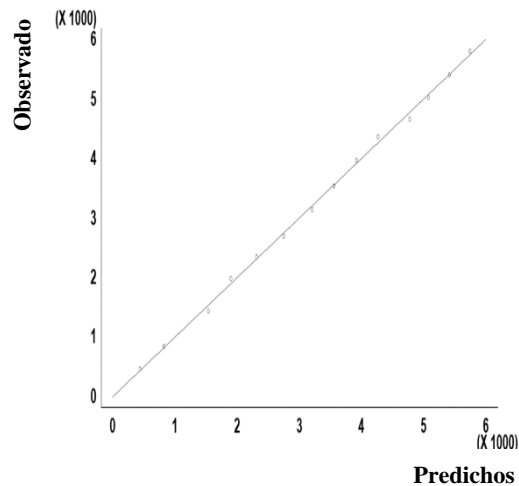


Figura 41. Similitud de datos predichos por el modelo ajustado y los obtenidos experimentalmente. Los datos obtenidos como predichos surgieron de la ecuación de la línea recta ($y= a+bx$). Se puede observar que existe similitud y relación entre los datos observados y predichos ya que siguen una tendencia lineal con poca variabilidad del modelo ajustado. Lo cual refuerza lo observado de la gráfica anterior.

La tabla de análisis de regresión entre observados y predichos (Tabla 26) muestra una pendiente = 0.9999 y una ordenada al origen= 6.0721e⁻⁵. La prueba de ANOVA expresa, que

al ser $\alpha = 0.05 > P_F \approx 0.0000$, existe relación estadísticamente significativa entre observados y predichos. además de que el modelo explica el 99.83% de los datos del fenómeno ($R^2 = 99.8367\%$). La prueba de t-Student confirma, que al ser $t_{calculada} < t_{tablas}$ ($0.0003 < 1.761$) existe relación lineal entre observados y predichos.

Tabla 26. Parámetros estadísticos entre Observados y Predichos para TDS. Los estadísticos muestran una pendiente= 0.9999 y una ordenada al origen= $6.0721e^{-5}$. Al tener t_{tablas} un valor mayor a la $t_{calculada}$ se confirma que no existe variación significativamente estadística entre los datos calculados y los observados en el experimento.

<u>Regresión</u>					
	Estimado	EEst	t	p	
Pendiente	0.9999	0.0112	89.1528	0.0000	
Ordenada	$6.0721e^{-5}$	40.9642	$1.4823e^{-6}$	1.0000	
R²	99.8493%				
R²_a	99.8367%				
t-Student	0.0003 < 1.761				

<u>ANOVA</u>					
	SCuad	gl	Prom. Cuad	F	p
Modelo	$3.77e^7$	1	$3.77 e^7$	7948.2100	0.0000
Residual	56916.7	12	4743.06		
Total (Corr.)	$3.78 e^7$	13			

Análisis de resultados (TDS)

Se puede asumir con un 95% de confianza, que la respuesta individual de los electrodos AZ 86031 y AQ_FESZ corresponde a la diseñada por cada fabricante, ya que, con base en las pruebas estadísticas anteriores, el modelo que mejor describe a los fenómenos es el lineal, existiendo relación estadísticamente significativa (ANOVA: $P_F < p\text{-value}$; t-Student: $t_{calculada} < t_{tablas}$); por lo que la comparación entre los dos electrodos estuvo bien fundamentada al hacerse asumiendo relaciones lineales entre ambos. La comprobación estadística entre ambos electrodos (AZ 86031 y AQ_FESZ), al mostrar una tendencia lineal con alta

correlación entre electrodos (t-Student: $t_{calculada} < t_{tablas}$; ANOVA: $P_F < p\text{-value}$) sin existir residuales extraordinarios, indica que la respuesta obtenida por nuestro desarrollo no es estadísticamente diferente a la obtenida por el instrumento de referencia (AZ 86031). Es importante recalcar que AQ_FESZ en cuanto a valores de Total de solidos disueltos mediante el modelo lineal de respuesta, puede explicar el 99.50% de lecturas de la solución de referencia ($R^2_a = 99.4995\%$), con un caso ligeramente extraordinario (Residuo estudentizado= 2.15).

Conclusiones (TDS)

Para TDS, ambos dispositivos (AZ 86031 y AQ_FESZ) presentan una respuesta lineal respecto a los sólidos disueltos en el agua. No hay diferencia significativa entre las lecturas de TDS generadas por AQ_FESZ respecto a el dispositivo de referencia AZ 86031.

La linealidad según el fabricante y la no diferencia significativa respecto al electrodo de referencia implican que nuestro desarrollo electrónico genera lecturas confiables, dentro de los estándares comerciales.

Salinidad

Los resultados de la respuesta de los electrodos AQ_FESZ y AZ 86031 respecto a una solución salina de referencia se encuentran en la Tabla 27. El gráfico respectivo se muestra en la Figura 42.

Tabla 27. Respuesta de ambos electrodos a una solución de referencia. Lecturas de los electrodos AZ 86031 y AQ_FESZ sometidos a prueba de funcionalidad con respecto a solución salina como unidades de referencia.

Salinidad (ppt)		
Solución salina (ml)	AZ 86031	AQ_FESZ
1	0.54	0.45
2	1.06	0.98
3	1.54	1.72
4	2.09	2.18
5	2.61	2.72
6	3.01	3.24
7	3.5	3.81
8	3.99	4.29
9	4.54	4.76
10	5.03	5.23
11	5.38	5.9
12	5.84	6.3
13	6.29	6.76
14	6.84	7.2

En el gráfico de matriz (Figura 41) se observa que las distribuciones de las lecturas provenientes de ambos multiparámetros siguieron una tendencia casi lineal, con una ligera concavidad hacia arriba, mientras que entre ambos electrodos la tendencia tiende a ser más lineal.

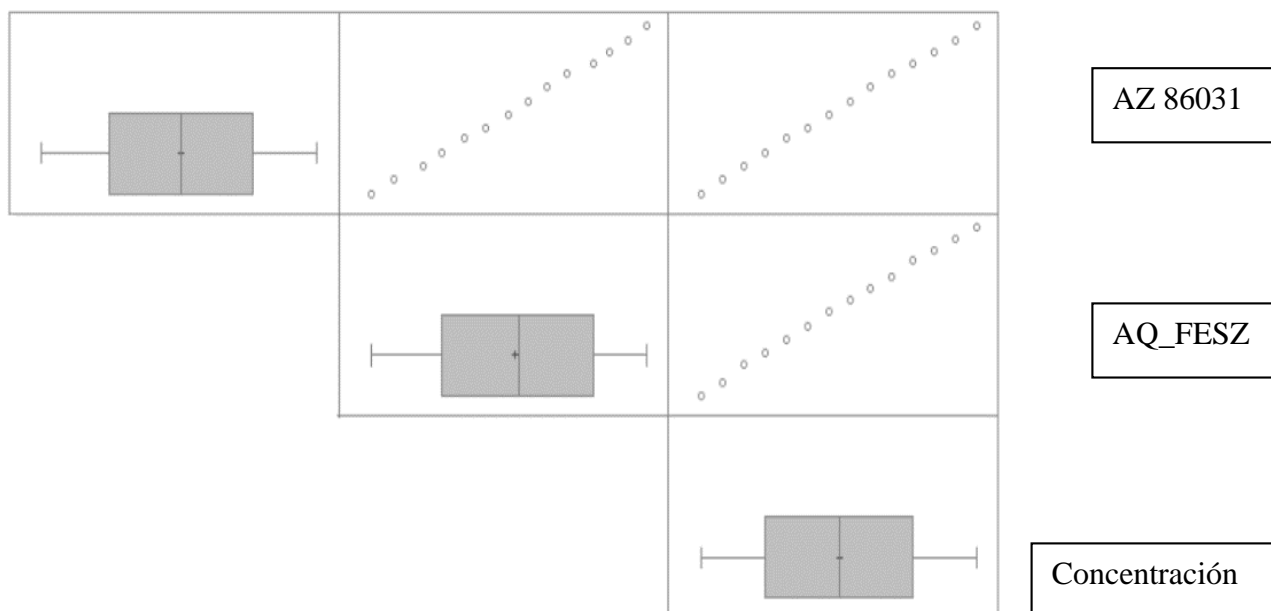


Figura 42. Tendencias entre lecturas de los electrodos de Salinidad en referencia solución salina.
 Las tendencias aparecen lineales en todos los casos. Cada lectura se distribuye homogéneamente en todo el intervalo de variación.

Sensor AZ 86031 y Solución salina

Los resultados de la comprobación estadística de la relación entre las lecturas de salinidad y la concentración de solución salina para este electrodo se encuentran en la Tabla 27, y la gráfica de ajuste según el modelo de regresión en la Figura 43. Los niveles de probabilidad tanto para la pendiente y la ordenada al origen son menores a 0.05.

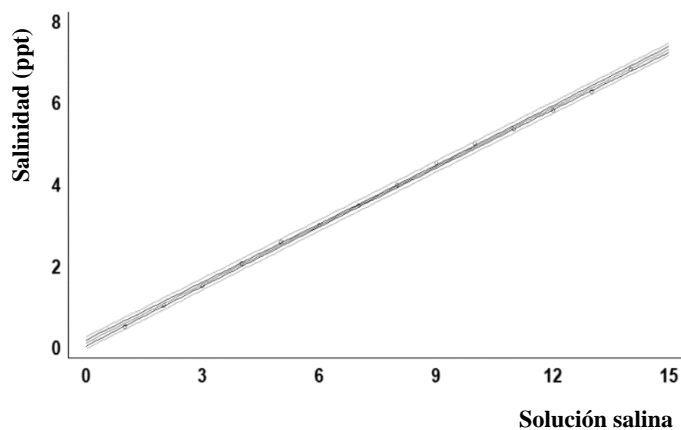


Figura 43. Modelo ajustado de dispersión. El modelo ajustado resultante de la relación entre las lecturas de Salinidad tomadas por el electrodo de AZ 86031 y las soluciones salinas, siguen tendencia lineal con baja variabilidad de los datos, ya que para cada “x” corresponde una “y”.

La tabla de estadísticos de la regresión lineal del sensor AZ 86031 y la solución salina (Tabla 28) muestra que la pendiente es 0.4798, con un nivel de probabilidad cercano a 0.0000 ($p\text{-value} \approx 0.0000 < \alpha = 0.05$), lo cual indica que la tendencia puede ser considerada como lineal. La ordenada al origen es igual a 0.133846 ppt ($p\text{-value} = 0.0100 < \alpha = 0.05$), lo que indica que al 95% de confianza, la ordenada al origen es diferente de 0.0000. Además, al ser $\alpha = 0.05 > P_F \approx 0.0000$ en la prueba de ANOVA, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables. Así mismo, el modelo explica más del 99.91% de los datos ($R^2_a = 99.9110\%$).

Tabla 28. Parámetros estadísticos entre Salinidad de AZ 86031 y solución salina. El análisis exploratorio de los datos derivados de la lectura del electrodo comercial en las soluciones salinas (AZ 86031) arrojó que el modelo lineal es el que mejor describe el fenómeno con una Pendiente= 0.4798 y Ordenada al origen= 0.1338.

<u>Regresión</u>					
	Estimado	EEst	t	p	
Pendiente	0.4798	0.0039	120.7970	0.0000	
Ordenada	0.1338	0.0338	3.9570	0.0019	
R²	99.9178%				
R²_a	99.9110%				

<u>ANOVA</u>					
	SCuad	gl	Prom. Cuad	F	p
Modelo	52.3872	1	52.3872	14591.9400	0.0000
Residual	0.0430	12	0.0035		
Total (Corr.)	52.4303	13			

El análisis de residuales (Figura 44) indica la existencia de diversos patrones en grupos de datos diferentes a un lineal. Sin embargo, la variación de los residuales no es mayor al rango de ± 2.00 , la cual se encuentra dentro del rango de residuos no extraordinarios.

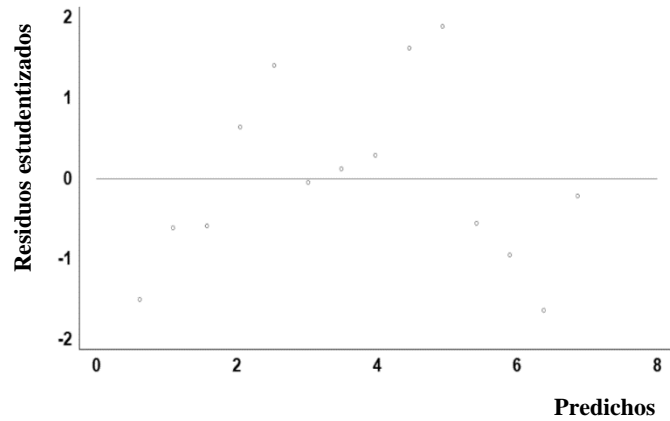


Figura 44. Análisis de los residuales de observados contra predichos. Los residuos estudentizados se observan agrupan en múltiples nubes de datos, lo que significa que existe variabilidad, pero no es estadísticamente significativa.

En la gráfica de observados contra predichos (Figura 45) para el electrodo AZ 86031 se muestra una tendencia lineal. La tabla de estadísticos de regresión (Tabla 29) entre observados y esperados muestra que la Pendiente= 1.0000, con $p_{\text{pendiente}} \approx 0.000 < \alpha=0.05$; y la Ordenada al origen = $-7.35e^{-11}$ con $p_{\text{ordenada}} \approx 1.0000 > \alpha=0.05$.

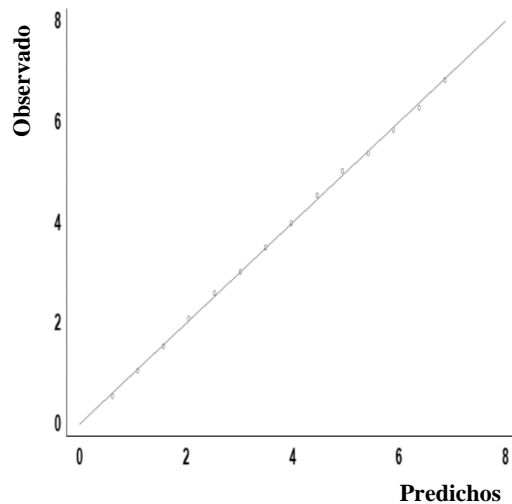


Figura 45. Similitud de datos predichos por el modelo ajustado y los obtenidos experimentalmente. Los datos obtenidos como predichos surgieron de la ecuación de la línea recta ($y= a+bx$). Se puede observar que existe similitud y relación entre los datos observados y predichos ya que siguen una tendencia lineal con poca variabilidad del modelo ajustado. Lo cual refuerza lo observado de la gráfica anterior.

En la tabla de análisis de regresión entre observados y predichos (Tabla 29) encontramos una pendiente de 1.0000 y una ordenada al origen de $-7.35e^{-11}$, la partiría del origen. La prueba de ANOVA expresa que al ser $\alpha = 0.05 > p_F \approx 0.0000$, existe relación estadísticamente significativa entre observados y predichos. Además, el modelo explica el 99.50% de los datos. La prueba de t-Student confirma, que al ser $t_{calculada} < t_{tablas}$ ($0.0000 < 1.7610$) existe relación lineal entre observados y predichos.

Tabla 29. Parámetros estadísticos entre Observados y Predichos para Salinidad. Los estadísticos muestran una pendiente perfecta y una ordenada al origen = $-7.35e^{-11}$. Al tener t_{tablas} un valor mayor a la $t_{calculada}$ se confirma que no existe variación significativamente estadística entre los datos calculados y los observados en el experimento.

Regresión

	Estimado	EEst	t	p
Pendiente	1.0000	0.0082	120.7970	0.0000
Ordenada	$-7.35e^{-11}$	0.0348	$-2.11e^{-09}$	1.0000
R²	99.9178%			
R²_a	99.9110%			
t-Student	$0.0000 < 1.761$			

ANOVA

	SCuad	gl	Prom. Cuad	F	p
Modelo	52.3872	1	52.3872	14591.9400	0.0000
Residual	0.0430	12	0.0035		
Total (Corr.)	52.4303	13			

Sensor AQ_FESZ y Solución salina

Los resultados de la comprobación estadística de la relación entre la salinidad y la solución salina se encuentran en la Tabla 30, y la gráfica de ajuste según el modelo en la Figura 46. En los resultados encontramos que el nivel de probabilidad para la pendiente es menor a 0.05.

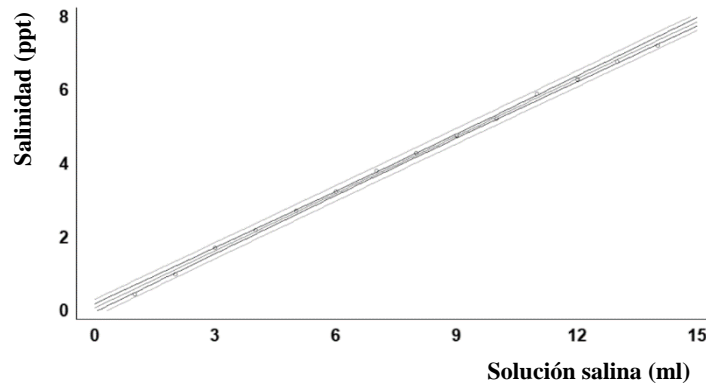


Figura 46. Modelo ajustado de dispersión. El modelo ajustado resultante de la relación entre las lecturas de Salinidad tomadas por el electrodo de AQ_FESZ y las soluciones salinas, siguen tendencia lineal con baja variabilidad de los datos, ya que para cada “x” corresponde una “y”.

La tabla de estadísticos de la regresión lineal entre las lecturas del sensor AQ_FESZ y la concentración solución salina (Tabla 30) muestra que la pendiente es 0.519077 con p -value= 0.0000 ($p \approx 0.0000 < \alpha = 0.05$), expresando una tendencia lineal. La ordenada al origen es igual a 0.0740659 ppt ($p = 0.1863 > \alpha = 0.05$), lo que indica que al 95% de confianza, la ordenada al origen es diferente de 0.0000. Además, al ser $\alpha = 0.05 > P_F \approx 0.0000$ en la prueba de ANOVA, existe relación estadísticamente significativa entre las variables. El modelo explica el 99.8146% de los datos.

Tabla 30. Parámetros estadísticos entre Salinidad de AQ_FESZ y solución salina. El análisis exploratorio de los datos derivados de la lectura del electrodo comercial en las soluciones salinas (AQ_FESZ) arrojó que el modelo lineal es el que mejor describe el fenómeno con una Pendiente= 5190 y Ordenada al origen= 0.0740.

<u>Regresión</u>				
	Estimado	EEst	t	p
Pendiente	0.5190	0.0062	83.6620	0.0000
Ordenada	0.0740	0.0528	1.4019	0.1863
R²	99.8288%			
R²_a	99.8146%			

<u>ANOVA</u>					
	SCuad	gl	Prom. Cuad	F	p
Modelo	61.2978	1	61.2978	6999.3400	0.0000
Residual	0.1050	12	0.0087		
Total (Corr.)	61.4029	13			

La gráfica de residuos contra predichos (Figura 47), indica la existencia de diversos patrones en grupos de datos diferentes a uno lineal. Sin embargo, la variación de los residuales no es mayor al rango de ± 2.00 , la cual se encuentra dentro del rango de residuos no extraordinarios, el patrón de distribución residual es oscilatorio.

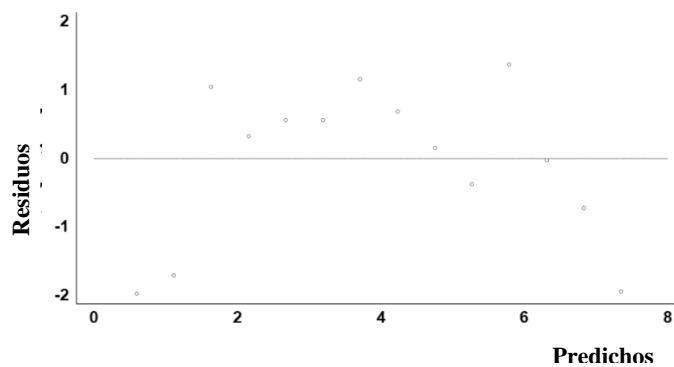


Figura 47. Análisis de los residuales de observados contra predichos. Los residuos estudentizados se observan agrupan en múltiples nubes de datos, lo que significa que existe variabilidad, pero no es estadísticamente significativa.

La gráfica de observados y predichos (Figura 48) para el electrodo AQ_FESZ muestra una tendencia lineal. En la tabla de estadísticos de regresión entre observados y esperados, pendiente= 1.0000 y una ordenada al origen= $1.61e^{-10}$.

En la tabla de análisis de regresión de observados y predichos (Tabla 31) la pendiente es 1.0000 (p -value= $0.000 < \alpha = 0.05$) y la Ordenada al origen= $1.61e^{-10}$; p -value= $1.000 > \alpha = 0.05$), la cual es muy cercana a 0.00. La prueba de ANOVA expresa que al ser $\alpha = 0.05 > P_F \approx 0.0000$, existe relación estadísticamente significativa entre observados y predichos. Además, el modelo explica el 99.8146% de los datos. La prueba de t-Student confirma, que al ser $t_{calculada} < t_{tablas}$ ($0.0000 < 1.761$) existe relación lineal entre observados y predichos.

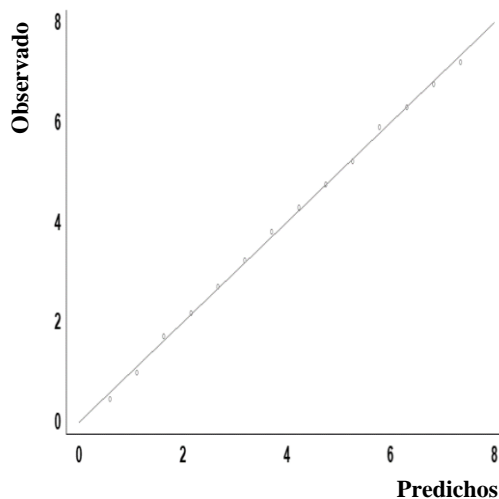


Figura 48. Similitud de datos predichos por el modelo ajustado y los obtenidos experimentalmente. Los datos obtenidos como predichos surgieron de la ecuación de la línea recta ($y= a+bx$). Se puede observar que existe similitud y relación entre los datos observados y predichos ya que siguen una tendencia lineal con poca variabilidad del modelo ajustado. Lo cual refuerza lo observado de la gráfica anterior.

Tabla 31. Parámetros estadísticos entre Observados y Predichos para Salinidad. Los estadísticos muestran una pendiente perfecta y una ordenada al origen= $1.61e^{-10}$. Al tener t_{tablas} un valor mayor a la $t_{calculada}$ se confirma que no existe variación significativamente estadística entre los datos calculados y los observados en el experimento.

Regresión

	Estimado	EEst	t	p
Pendiente	1.0000	0.0119	83.6620	0.0000
Ordenada	$1.61e^{-10}$	0.0536	$3.00e^{-09}$	1.0000
R²	99.8288%			
R²_a	99.8146%			
t-Student	0.0000<1.761			

ANOVA

	SCuad	gl	Prom. Cuad	F	p
Modelo	61.2978	1	61.2978	6999.3400	0.0000
Residual	0.1050	12	0.0087		
Total (Corr.)	61.4029	13			

Relación entre los multiparámetros AZ 86031 y AQ_FESZ

Los resultados de la comprobación estadística de la relación entre el electrodo AZ 86031 y AQ_FESZ se encuentran en la Tabla 32, y el gráfico de ajuste del modelo de regresión en la Figura 49.

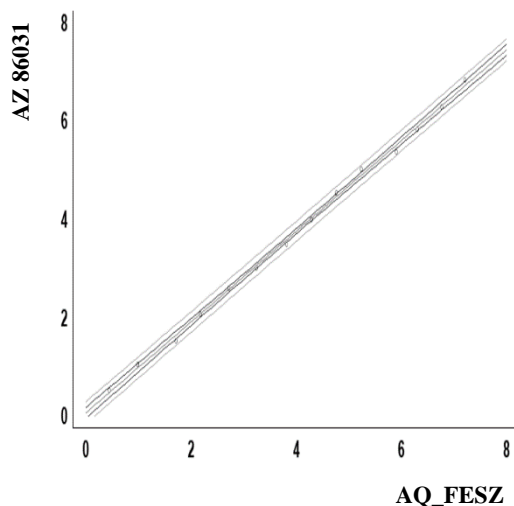


Figura 49. Modelo ajustado de dispersión. El modelo ajustado resultante de la relación entre las lecturas de Salinidad tomadas por el electrodo de AZ 86031 y AQ_FESZ, siguen tendencia lineal con baja variabilidad de los datos, ya que no se observan lecturas fuera de los límites de variabilidad.

La tabla de estadísticos de la regresión entre el sensor AZ 86031 y AQ_FESZ (Tabla 32) muestra que la pendiente es 0.923203 con un nivel de probabilidad $p \approx 0.0000 < \alpha = 0.0500$, lo cual significa que la tendencia puede considerarse como lineal. Además, en la prueba de ANOVA, al ser $\alpha = 0.05 > P_F \approx 0.0000$, existe relación estadísticamente significativa entre ambos electrodos. El modelo lineal explica el 99.80% de los datos ($R^2_a = 99.8008\%$).

Tabla 32. Parámetros estadísticos entre Salinidad de AZ 86031 y AQ_FESZ. El análisis exploratorio de los datos derivados de la lectura del electrodo AZ 86031 y AQ_FESZ arrojó que el modelo lineal es el que mejor describe el fenómeno con una Pendiente= 0.9232 y Ordenada al origen= 0.0703.

<u>Regresión</u>				
	Estimado	EEst	t	p
Pendiente	0.9232	0.0114	80.7130	0.0000
Ordenada	0.0703	0.0513	1.3716	0.1953
R²	99.8161%			
R²_a	99.8008%			

<u>ANOVA</u>					
	SCuad	gl	Prom. Cuad	F	p
Modelo	52.3339	1	52.3339	6514.5900	0.0000
Residual	0.0964	12	0.0080		
Total (Corr.)	52.4303	13			

El análisis de residuales contra los predichos (Figura 50), indica la existencia de diversos patrones en grupos de datos diferentes a un lineal. Sin embargo, la variación de residuales no rebasa el rango de ± 2.00 , es decir, no se trata de casos extraordinarios. Se observa un patrón de distribución residual oscilatorio.

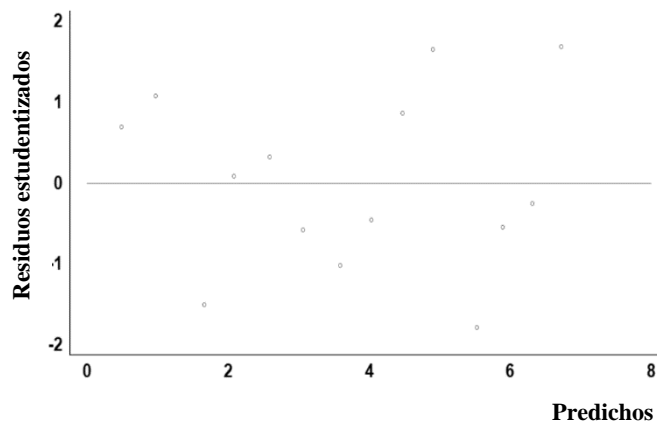


Figura 50. Análisis de los residuales de observados contra predichos. Los residuos estudentizados se observan agrupan en múltiples nubes de datos, lo que significa que existe variabilidad, pero no es estadísticamente significativa.

La gráfica de observados contra predichos (Figura 51) muestra una tendencia lineal, con un patrón de distribución similar al de los residuos. La tabla de estadísticos de regresión entre observados y esperados tiene una pendiente= 1.0000 y la ordenada al origen $8.52e^{-11}$.

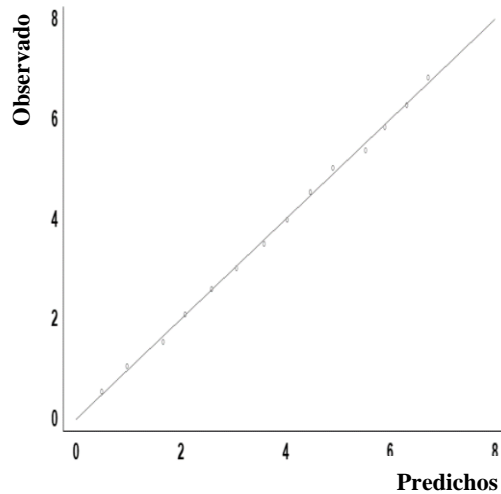


Figura 51. Similitud de datos predichos por el modelo ajustado y los obtenidos experimentalmente. Los datos obtenidos como predichos surgieron de la ecuación de la línea recta ($y= a+bx$). Se puede observar que existe similitud y relación entre los datos observados y predichos ya que siguen una tendencia lineal con poca variabilidad del modelo ajustado. Lo cual refuerza lo observado de la gráfica anterior.

La tabla de análisis de regresión entre observados y predichos (Tabla 33) muestra una pendiente = 1.0000 y una ordenada al origen= $8.52e^{-11}$. La prueba de ANOVA expresa, que al ser $\alpha = 0.05 > P_F \approx 0.0000$, existe relación estadísticamente significativa entre observados y predichos. además de que el modelo explica el 99.80% de los datos del fenómeno ($R^2 = 99.8008\%$). La prueba de t-Student confirma, que al ser $t_{calculada} < t_{tablas}$ ($0.0000 < 1.761$) existe relación lineal entre observados y predichos.

Tabla 33. Parámetros estadísticos entre Observados y Predichos para Salinidad. Los estadísticos muestran una pendiente perfecta y una ordenada al origen= $8.52e^{-11}$. Al tener t_{tablas} un valor mayor a la $t_{calculada}$ se confirma que no existe variación significativamente estadística entre los datos calculados y los observados en el experimento.

<u>Regresión</u>				
	Estimado	EEst	t	p
Pendiente	1.0000	0.0123	80.7130	0.0000
Ordenada	$8.52e^{-11}$	0.0520	$1.63e^{-9}$	1.0000
R²	99.8161%			
R²_a	99.8008%			
t-Student	0.0000	<1.761		

<u>ANOVA</u>					
	SCuad	gl	Prom. Cuad	F	p
Modelo	52.3339	1	52.3339	6514.5900	0.0000
Residual	0.0964	12	0.0080		
Total (Corr.)	52.4303	13			

Análisis de resultados (Salinidad)

La respuesta individual de los electrodos AZ 86031 y AQ_FESZ al 95% de confianza corresponde a la diseñada por cada fabricante, ya que, con base en las pruebas estadísticas anteriores, el modelo que mejor describe a los fenómenos es el lineal, existiendo relación estadísticamente significativa (ANOVA: $P_F < p\text{-value}$; t-Student: $t_{calculada} < t_{tablas}$); por lo que no existe diferencia estadística en las lecturas de ambos electrodos, corroborándose el supuesto inicial de la existencia de relaciones lineales entre ambos. La comprobación estadística entre ambos electrodos (AZ 86031 y AQ_FESZ), al mostrar una tendencia lineal con alta correlación entre electrodos (t-Student: $t_{calculada} < t_{tablas}$; ANOVA: $P_F < p\text{-value}$) sin existir residuales extraordinarios, indica que la respuesta obtenida por nuestro desarrollo no es estadísticamente diferente a la obtenida por el instrumento de referencia (AZ 86031).

Aunque el electrodo AZ 86031 explica mayor porcentaje de datos ($R^2_a=99.9110\%$) que el AQ_FESZ ($R^2_a= 99.8146\%$), ambos son comparables al nivel del 99.8%.

Conclusiones (Salinidad)

Para Salinidad, ambos dispositivos (AZ 86031 y AQ_FESZ) presentan una respuesta lineal respecto a las sales en el agua. No hay diferencia significativa entre las lecturas de Salinidad generadas por AQ_FESZ respecto a el dispositivo de referencia AZ 86031.

Al no existir diferencias conforme al electrodo de referencia y respuesta con forme a los parámetros del fabricante, se concluye que nuestro desarrollo electrónico genera lecturas confiables, dentro de los estándares comerciales.

Temperatura (°C)

Los resultados de la respuesta de los electrodos AQ_FESZ y AZ 86031 respecto a cambio de temperatura se encuentran en la Tabla 34 y su gráfico en la Figura 52.

Tabla 34. Respuesta de ambos electrodos a cambio de temperatura en función de un termómetro de referencia.
Lecturas de los electrodos AZ 86031 y AQ_FESZ sometidos a prueba de funcionalidad con respecto a un cambio de temperatura como unidad de referencia.

Temperatura (°C)		
Termómetro (Mercurio)	AZ 86031	AQ_FESZ
8	10	9.25
10	13.7	11.5
12	15.9	12.88
13	16.7	14.13
15	18.1	16.31
18	20.9	18.38
20	22.6	20.75
23	24.9	22.79
25	27.1	25.13
27	29.2	27.25
29	30.7	29.44
30	32.2	31.19
35	38	36.31

En el gráfico de matriz (Figura 52) se observa que las distribuciones de las lecturas de los electrodos de ambos multiparámetros siguieron una tendencia lineal respecto al gradiente de temperatura registrada por el termómetro de referencia. De igual manera, se observa una tendencia lineal entre AZ 86031 y AQ_FESZ.

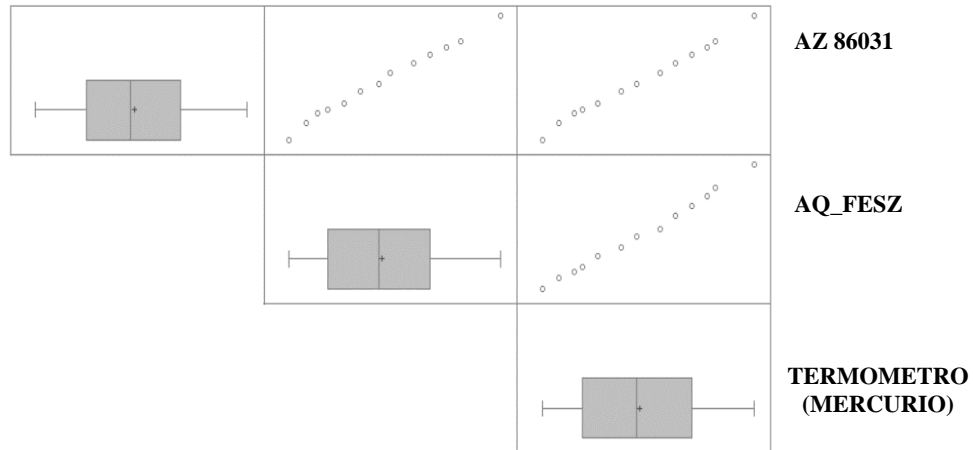


Figura 52. Tendencias entre lecturas de los sensores de temperatura en referencia a un termómetro de mercurio. Las tendencias aparecen lineales en todos los casos. Cada lectura se distribuye homogéneamente en todo el intervalo de variación.

Sensor AZ 86031 y Termómetro de mercurio

Los resultados de la comprobación estadística de la relación entre las lecturas del termómetro de Mercurio y las del termómetro de AZ 86031 se encuentran en la Tabla 35, y el gráfico de ajuste según el modelo de regresión en la Figura 53. En la Tabla 21 los niveles de probabilidad tanto para la pendiente y la ordenada al origen son menores a 0.05.

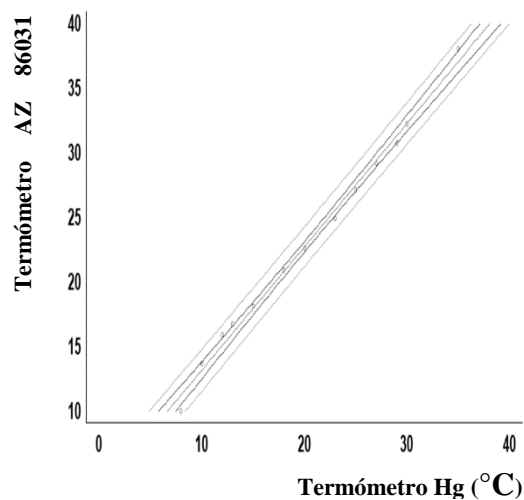


Figura 53. Modelo ajustado de dispersión. El modelo ajustado resultante de la relación entre las lecturas tomadas por el electrodo de AZ 86031 y la temperatura, siguen tendencia lineal con baja variabilidad de los datos, ya que para cada “x” corresponde una “y”.

La tabla de estadísticos de la regresión lineal (Tabla 35) del sensor AZ 86031 y la temperatura muestra que la pendiente es 0.9553 con un nivel de probabilidad cercano a 0.0000 ($p\text{-value} \approx 0.0000 < \alpha = 0.05$), expresando que la tendencia puede ser considerada como lineal. La ordenada al origen es igual a 3.6019 °C ($p\text{-value} = 0.0100 < \alpha = 0.05$), que indica que con el 95% de confianza la ordenada al origen es diferente de 0.0000. Además, al ser $\alpha = 0.05 > p_F \approx 0.0000$ en la prueba de ANOVA, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables. Y que el modelo explica arriba del 99.32% de los datos ($R^2_a = 99.3211\%$)

Tabla 35. Parámetros estadísticos entre AZ 86031 y la temperatura. El análisis exploratorio de los datos derivados de la lectura del electrodo comercial al cambio de temperatura (AZ 86031) arrojó que el modelo lineal es el que mejor describe el fenómeno con una Pendiente= 0.9553 y Ordenada al origen 3.6019.

<u>Regresión</u>				
	Estimado	EEst	t	p
Pendiente	0.9553	0.0227	41.9104	0.0000
Ordenada	3.6019	0.5008	7.1920	0.0000
R²	99.3776%			
R²_a	99.3211%			

<u>ANOVA</u>					
	SCuad	gl	Prom. Cuad	F	p
Modelo	796.8930	1	796.8930	1756.4800	0.0000
Residual	4.9905	11	0.4536		
Total (Corr.)	801.8830	12			

El análisis de residuales (Figura 54) indica la existencia de patrones en grupos de datos diferentes al lineal. Sin embargo, la variación de residuales no rebasa el rango de ± 2.0 , es decir que, no existen casos extraordinarios. Considerando la última lectura como un caso extraordinario, encontramos que existe una inclinación hacia la derecha en el patrón de distribución de los residuales.

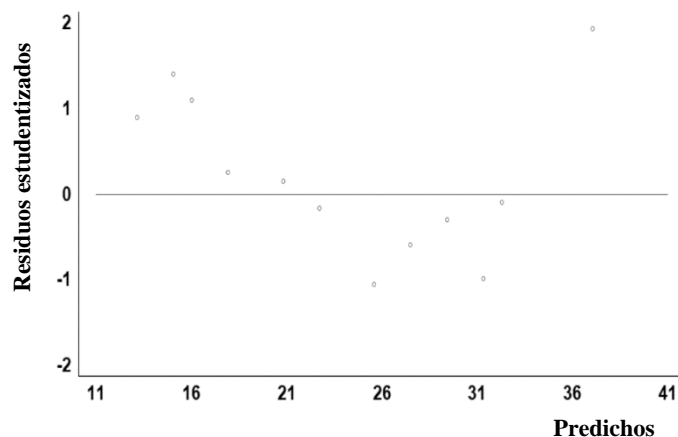


Figura 54. Análisis de los residuales de observados contra predichos. Los residuos estudentizados se observan agrupan en múltiples nubes de datos, lo que significa que existe variabilidad, pero no es estadísticamente significativa.

La gráfica de observados contra predichos (Figura 55) para el electrodo AZ 86031 nuevamente muestra una tendencia lineal. La tabla de estadísticos de regresión (Tabla 8) entre observados y esperados muestra que la pendiente (Pendiente= 0.9990) es muy cercana a 1.0000 con $p_{\text{pendiente}} \approx 0.000 < \alpha = 0.05$).

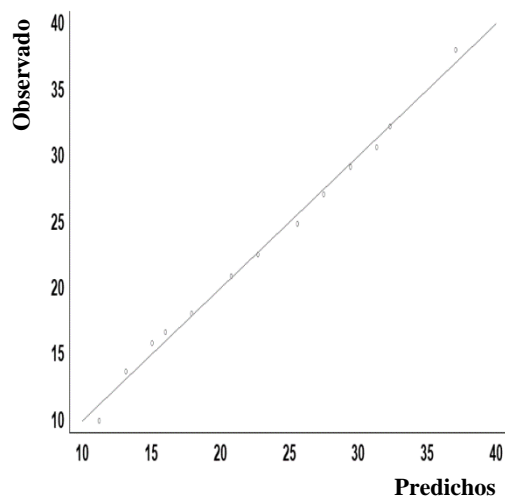


Figura 55. Similitud de datos predichos por el modelo ajustado y los obtenidos experimentalmente. Los datos obtenidos como predichos surgieron de la ecuación de la línea recta ($y = a + bx$). Se puede observar que existe similitud y relación entre los datos observados y predichos ya que siguen una tendencia lineal con poca variabilidad del modelo ajustado. Lo cual refuerza lo observado de la gráfica anterior.

En la tabla de análisis de regresión entre observados y predichos (Tabla 36) encontramos una pendiente de 1.0253 y una ordenada al origen de -0.7166, la cual podría

considerarse que parte del origen. La prueba de ANOVA expresa, que al ser $\alpha = 0.05 > p_F \approx 0.0000$ existe relación estadísticamente significativa entre observados y predichos. Además, el modelo explica el 99.50% de los datos. La prueba de t-Student confirma, que al ser $t_{calculada} < t_{tablas}$ ($3.738 < 1.7610$) existe relación lineal entre observados y predichos.

Tabla 36. Parámetros estadísticos entre Observados y Predichos para la Temperatura. Los estadísticos muestran una pendiente= 1.0253 y una ordenada al origen= -0.7166. Al tener t_{tablas} un valor mayor a la $t_{calculada}$ se confirma que no existe variación significativamente estadística entre los datos calculados y los observados en el experimento.

<u>Regresión</u>					
	Estimado	EEst	t	p	
Pendiente	1.0253	0.0244	41.9104	0.0000	
Ordenada	-0.7166	0.5976	-1.1989	0.2557	
R²	99.3776%				
R²_a	99.3211%				
t-Student	3.738 < 1.761				

<u>ANOVA</u>					
	SCuad	gl	Prom. Cuad	F	p
Modelo	796.8930	1	796.8930	1756.4800	0.0000
Residual	4.9905	11	0.4536		
Total (Corr.)	801.8830	12			

Sensor AQ_FESZ y Termómetro de mercurio

Los resultados de la comprobación estadística de la relación entre las lecturas obtenidas por AQ_FESZ y el gradiente de temperatura se encuentran en la Tabla 37, y la gráfica de ajuste según el modelo en la Figura 56. En los resultados encontramos que los niveles de probabilidad para la pendiente y la ordenada al origen son menores a 0.05.

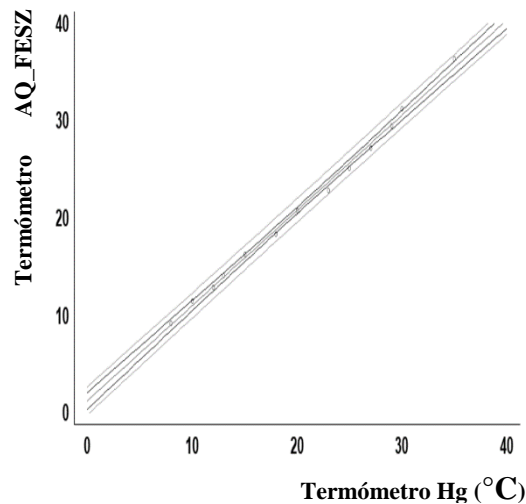


Figura 56. Modelo ajustado de dispersión. El modelo ajustado resultante de la relación entre las lecturas tomadas por el electrodo de AQ_FESZ y la temperatura, siguen tendencia lineal con baja variabilidad de los datos, ya que para cada “x” corresponde una “y”.

La tabla de estadísticos de la regresión lineal del sensor AQ_FESZ y la temperatura (Tabla 37) muestra que la pendiente es cercana a 1.0000 (pendiente= 0.9783) con p -value= a 0.000 ($p \approx 0.0000 < \alpha = 0.05$), indicando una tendencia lineal. La ordenada al origen estadísticamente es 0.000 (Ordenada= 1.23541; $p = 0.1556 > \alpha = 0.05$). Además, al ser $\alpha = 0.05 > P_F \approx 0.0000$ en la prueba de ANOVA, existe correlación entre las variables. El modelo tiene una $R^2_a = 99.5906\%$.

Tabla 37. Parámetros estadísticos entre AQ_FESZ y la temperatura. El análisis exploratorio de los datos derivados de la lectura del electrodo AQ_FESZ al cambio de temperatura arrojó que el modelo lineal es el que mejor describe el fenómeno con una Pendiente= 0.9783 y Ordenada al origen 1.2354.

<u>Regresión</u>				
	Estimado	EEst	t	p
Pendiente	0.9783	0.0181	54.0321	0.0000
Ordenada	1.2354	0.3977	3.1056	0.0100
R²	99.6246%			
R²_a	99.5906%			

<u>ANOVA</u>					
	SCuad	gl	Prom. Cuad	F	p
Modelo	835.5970	1	835.5970	2919.4700	0.0000
Residual	3.1483	11	0.2862		
Total (Corr.)	838.7460	12			

El análisis de residuales contra los predichos (Figura 57), indica la existencia de diversos patrones en grupos de datos diferentes a un lineal. Sólo un valor excede el umbral de ± 2.50 (caso extraordinario), mientras que el resto corresponde a residuos no extraordinarios. En resumen, a excepción del extraordinario, el patrón de distribución residual es oscilatorio, no extraordinario.

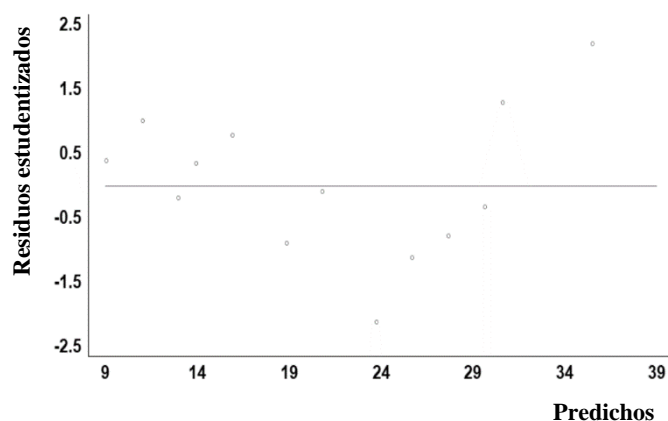


Figura 57. Análisis de los residuales de observados contra predichos. Los residuos estudentizados se observan agrupan en múltiples nubes de datos, lo que significa que existe variabilidad, pero no es estadísticamente significativa.

La gráfica de observados y predichos (Figura 58) para el electrodo AQ_FESZ muestra una tendencia lineal. La tabla de estadísticos de regresión entre observados y esperados presenta una pendiente= 1.0000 y una ordenada al origen= $3.53e^{-9}$.

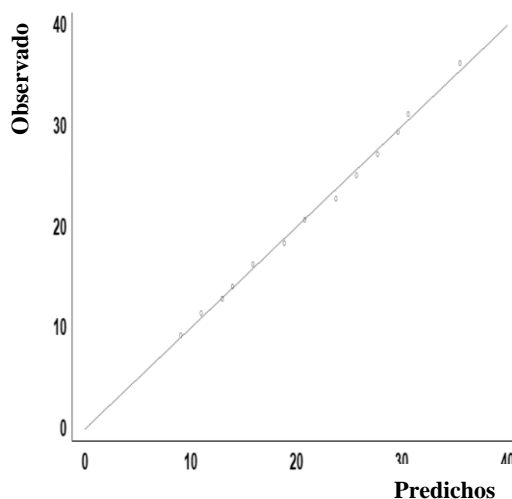


Figura 58. Similitud de datos predichos por el modelo ajustado y los obtenidos experimentalmente. Los datos obtenidos como predichos surgieron de la ecuación de la línea recta ($y= a+bx$). Se puede observar que existe similitud y relación entre los datos observados y predichos ya que siguen una tendencia lineal con poca variabilidad del modelo ajustado. Lo cual refuerza lo observado de la gráfica anterior.

En la tabla de análisis de regresión entre observados y predichos (Tabla 38) la pendiente es 1.0000 (p -value= 0.000 < α =0.05) y la ordenada al origen muy cercana al 0.0000 (Ordenada= $3.53e^{-9}$; p -value= 1.000 > α =0.05). La prueba de ANOVA expresa, que al ser α

$= 0.05 > P_F \approx 0.0000$, existe relación estadísticamente significativa entre observados y predichos. Además, el modelo explica el 99.5905% de los datos. La prueba de t-Student confirma, que al ser $t_{calculada} < t_{tablas}$ ($0.0000 < 1.761$) existe relación lineal entre observados y predichos.

Tabla 38. Parámetros estadísticos entre Observados y Predichos para la Temperatura. Los estadísticos muestran una pendiente perfecta y una ordenada al origen = $3.53e^{-9}$. Al tener t_{tablas} un valor mayor a la $t_{calculada}$ se confirma que no existe variación significativamente estadística entre los datos calculados y los observados en el experimento.

<u>Regresión</u>					
	Estimado	EEst	t	p	
Pendiente	1.0000	0.0185	54.0321	0.0000	
Ordenada	$3.53e^{-9}$	0.4190	$8.43e^{-9}$	1.0000	
R²	99.6246%				
R²_a	99.5906%				
t-Student	0.0000 < 1.761				

<u>ANOVA</u>					
	SCuad	gl	Prom. Cuad	F	p
Modelo	835.5970	1	835.5970	2919.4700	0.0000
Residual	3.1483	11	0.2862		
Total (Corr.)	838.7460	12			

Relación entre electrodos (AZ 86031 y AQ_FESZ)

Los resultados de la comprobación estadística de la relación entre el electrodo AZ 86031 y AQ_FESZ se encuentran en la Tabla 39, y el gráfico de ajuste del modelo de regresión en la Figura 59.

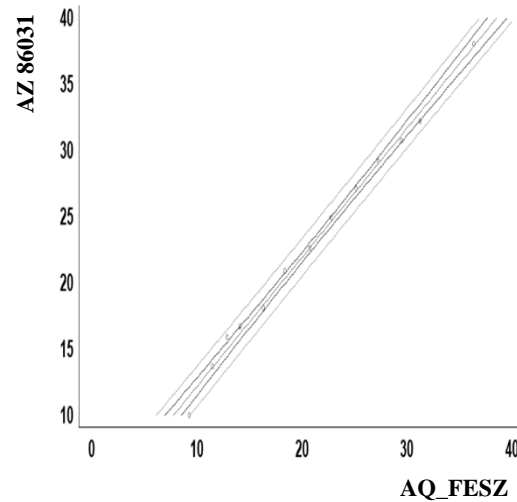


Figura 59. Modelo ajustado de dispersión. El modelo ajustado resultante de la relación entre las lecturas de Temperatura tomadas por el electrodo de AZ 86031 y AQ_FESZ, siguen tendencia lineal con baja variabilidad de los datos, ya que no se observan lecturas fuera de los límites de variabilidad.

La tabla de estadísticos de la regresión entre el sensor AZ 86031 y AQ_FESZ (Tabla 39) muestra que la pendiente es 0.975157 con un nivel de probabilidad $p \approx 0.0000 < \alpha = 0.0500$, lo cual significa que la tendencia es estadísticamente lineal. Además, en la prueba de ANOVA, al ser $\alpha = 0.0500 > P_F \approx 0.0000$, existe relación estadísticamente significativa entre ambos electrodos. El modelo lineal explica el 99.41% de los datos ($R^2_a = 99.4158\%$).

Tabla 39. Parámetros estadísticos entre la Temperatura de AZ 86031 y AQ_FESZ. El análisis exploratorio de los datos derivados de la lectura del electrodo AZ 86031 y AQ_FESZ arrojó que el modelo lineal es el que mejor describe el fenómeno con una Pendiente= 0.9751 y Ordenada al origen= 2.4253.

<u>Regresión</u>				
	Estimado	EEst	t	p
Pendiente	0.9751	0.0215	45.1995	0.0000
Ordenada	2.4253	0.4886	4.9633	0.0004
R²	99.4645%			
R²_a	99.4158%			

<u>ANOVA</u>					
	SCuad	gl	Prom. Cuad	F	p
Modelo	797.5890	1	797.5890	2042.9900	0.0000
Residual	4.2944	11	0.3904		
Total (Corr.)	801.883	12			

El análisis de residuales contra predichos (Figura 60), indica la existencia de diversos patrones en grupos de datos diferentes al lineal pero mayormente distribuidos a lo largo de la línea central. Sin embargo, la variación de residuales no rebasa el rango de ± 2.00 , es decir, no se trata de casos extraordinarios. Se observa en la Figura 19 un patrón de distribución aleatorio de los valores residuales.

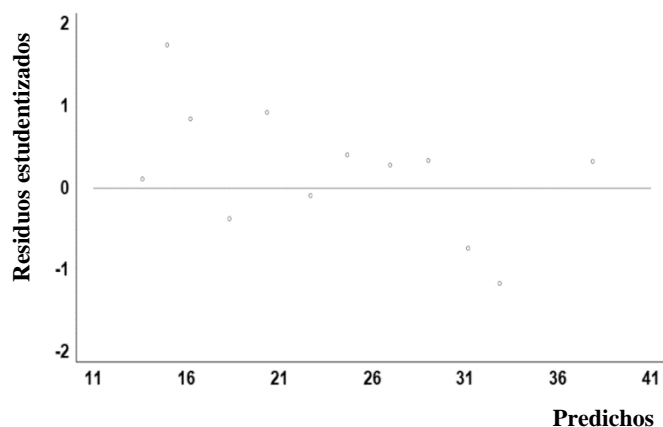


Figura 60. Análisis de los residuales de observados contra predichos. Los residuos estudentizados se observan agrupan en múltiples nubes de datos, lo que significa que existe variabilidad, pero no es estadísticamente significativa.

La gráfica de observados contra predichos (Figura 61) muestra una tendencia lineal, con un patrón de distribución similar al de los residuos. La tabla de estadísticos de regresión entre observados y esperados tiene una pendiente= 1.0000 y la ordenada al origen= $1.27e^{-9}$.

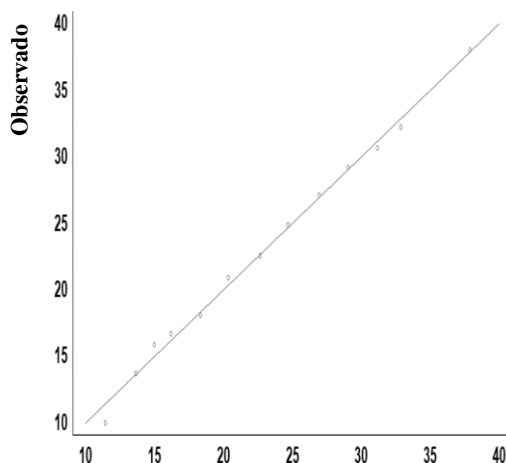


Figura 61. Similitud de datos predichos por el modelo ajustado y los obtenidos experimentalmente. Los datos obtenidos como predichos surgieron de la ecuación de la línea recta ($y= a+bx$). Se puede observar que existe similitud y relación entre los datos observados y predichos ya que siguen una tendencia lineal con poca variabilidad del modelo ajustado. Lo cual refuerza lo observado de la gráfica anterior.

La tabla de análisis de regresión entre observados y predichos (Tabla 40) muestra una pendiente = 1.0000 y una ordenada al origen= $1.27e^{-9}$. La prueba de ANOVA expresa, que al ser $\alpha = 0.05 > P_F \approx 0.0000$, existe relación estadísticamente significativa entre observados y

predichos. además de que el modelo explica el 99.41% de los datos del fenómeno ($R^2_a = 99.4158\%$). La prueba de t-Student confirma, que al ser $t_{calculada} < t_{tablas}$ ($0.0003 < 1.761$) existe relación lineal entre observados y predichos.

Tabla 40. Parámetros estadísticos entre Observados y Predichos para Salinidad. Los estadísticos muestran una pendiente perfecta y una ordenada al origen= $1.27e^{-9}$. Al tener t_{tablas} un valor mayor a la $t_{calculada}$ se confirma que no existe variación significativamente estadística entre los datos calculados y los observados en el experimento.

<u>Regresión</u>				
	Estimado	EEst	t	p
Pendiente	1.0000	0.0221	45.1995	0.0000
Ordenada	$1.27e^{-9}$	0.5391	$2.35 e^{-9}$	1.0000
R²	99.4645%			
R²_a	99.4158%			
t-Student	0.0000 < 1.761			

<u>ANOVA</u>					
	SCuad	gl	Prom. Cuad	F	p
Modelo	797.5890	1	797.5890	2042.9900	0.0000
Residual	4.2944	11	0.3904		
Total (Corr.)	801.8830	12			

Análisis de resultados (Temperatura)

Se puede asumir con un 95% de confianza, que la respuesta individual de los electrodos AZ 86031 y AQ_FESZ corresponden a la diseñada por cada fabricante, ya que con base en las pruebas estadísticas anteriores, el modelo que mejor describe a los fenómenos es el lineal, existiendo relación estadísticamente significativa (ANOVA: $P_F < p\text{-value}$; t-Student: $t_{calculada} < t_{tablas}$); por lo que la comparación entre los dos electrodos estuvo bien fundamentada al hacerse asumiendo relaciones lineales entre ambos. La comprobación estadística entre ambos electrodos (AZ 86031 y AQ_FESZ), al mostrar una tendencia lineal con alta correlación entre electrodos (t-Student: $t_{calculada} < t_{tablas}$; ANOVA: $P_F < p\text{-value}$) sin

existir residuales extraordinarios, indica que la respuesta obtenida por nuestro desarrollo no es estadísticamente diferente a la obtenida por el instrumento de referencia (Termómetro de mercurio). Es importante recalcar que AQ_FESZ en cuanto a valores de temperatura (°C) mediante el modelo lineal de respuesta, puede explicar el 99.60% de lecturas de la solución de referencia ($R^2_a= 99.5905\%$), mientras que AZ 86031 el 99.32% ($R^2_a= 99.321$). Debido a que AQ_FESZ presenta mayor linealidad que AZ 86031.

Conclusiones (Temperatura)

Para Temperatura, ambos dispositivos (AZ 86031 y AQ_FESZ) presentaron una respuesta lineal respecto a la temperatura del termómetro de mercurio. No hay diferencia significativa entre las lecturas de Temperatura generadas por AQ_FESZ respecto a el dispositivo de referencia AZ 86031. Sin embargo, AQ_FESZ mostro mayor capacidad de descripción de las lecturas, por lo que se sugiere utilizar un termómetro expofeso (18B20) a los incluidos en los electrodos para obtener lecturas similares a la realidad. Los dos multiparámetros tienen una salida con tendencia lineal similar.

El sensor 18B20 explica mayor porcentaje de los datos de la temperatura, a diferencia del de pH en el electrodo AZ 86031. Ya que el sensor externo (18B20) tuvo mejor desempeño que el sensor interno del electrodo (pH de AZ 86031), se confirma que el uso de termómetros expofeso es más eficiente que los incluidos en los electrodos de los multiparámetros.

Oxígeno disuelto (DO)

Los resultados de la comparación entre lecturas de Oxígeno disuelto (DO) para los electrodos AQ_FESZ y AZ 86031 se encuentran en la Tabla 41 y su respectivo gráfico de ajuste según el modelo de regresión en la Figura 62.

Tabla 41. Respuesta de ambos electrodos a un cambio de temperatura como medida de referencia.
Lecturas de los electrodos AZ 86031 y QA_FESZ sometidos a prueba de funcionalidad con respecto a soluciones Buffer como unidades de referencia al DO.

Oxígeno Disuelto (mg/L)		
Temperatura °C	AZ 86031	AQ_FESZ
14.2	7.8	9.15
15.9	7.8	9
16.4	7.8	8.71
17.2	7.7	8.53
18.3	7.7	8.22
19.7	7.7	8.07
20.4	7.7	7.88
21.6	7.7	7.76
22.1	7.7	7.69
23.3	7.6	7.35
24.6	7.4	7.27
25.6	7.3	7.19
26.6	7.2	7.17
27.7	7.2	7.22
28.8	7.1	7.09
30.6	6.9	7.17
31.1	6.8	7.04
32.6	6.4	6.82
33.1	6.4	6.8
34.4	6.2	6.66
35.1	6	6.41
36.4	5.7	6.08
37.1	5.8	5.82

Relación entre electrodos (AZ 86031 y AQ_FESZ)

En la Figura 62, se muestran las lecturas obtenidas entre los 14 °C y 37 °C por parte de ambos electrodos. No se observa una tendencia lineal ni similar entre ambos electrodos. Pero en el rango de 21 °C y 35 °C las tendencias se asemejan.

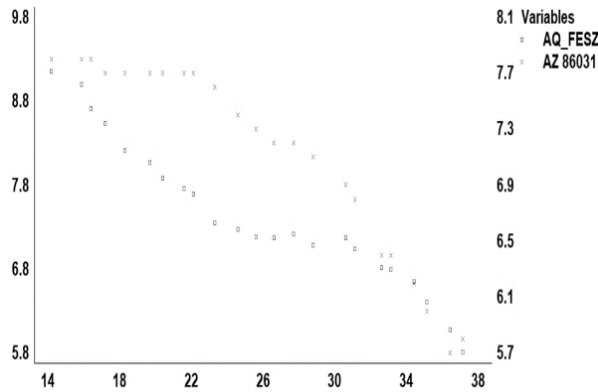
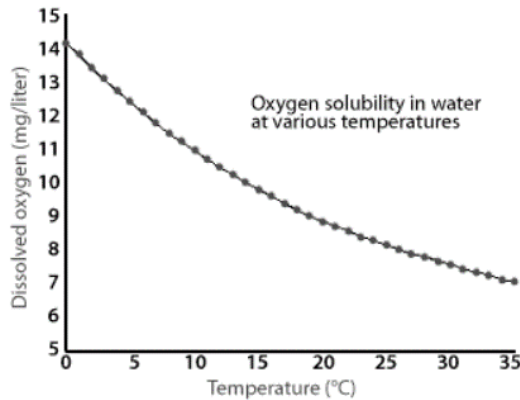


Figura 62. Tendencias entre lecturas de los electrodos de DO en referencia a un buffer. Las tendencias no son lineales en todos los casos. En el rango de 21 °C y 35 °C las tendencias se asemejan.

La tendencia esperada se muestra en la Figura 63 en la cual, según la revisión bibliográfica existe una relación inversa entre la temperatura y la disolución del oxígeno.



Data courtesy of Dr. Ben Stout.

Figura 63. La disolución del oxígeno. Es inversamente proporcional a la temperatura, en referencia con las lecturas obtenidas, se observa que en el rango de 21 °C y 35 °C las tendencias se asemejan a las tendencias reportadas en la literatura (EEGCC, 2004)

Las lecturas del electrodo AZ 86031 muestran que, a temperaturas menores a 21 °C, la respuesta del electrodo se aparta de la tendencia esperada, permaneciendo las lecturas constantes a pesar del cambio en temperatura, mientras que el AQ_FESZ muestra la tendencia esperada desde un inicio. Por lo que se consideró que la comparación individual de cada electrodo respecto a la temperatura no era tan relevante, como la comparación entre ambos electrodos en el intervalo de temperaturas donde se observa la tendencia esperada (Figura 64).

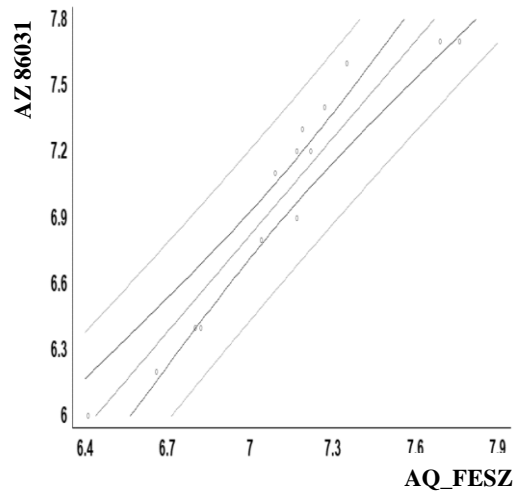


Figura 64. Modelo ajustado de dispersión. Ese utilizó el rango de 21 a 35 para realizar el modelo ajustado, resultante de la relación entre las lecturas de DO tomadas por el electrodo de AZ 86031 y AQ_FESZ en función de la Temperatura, siguen tendencia lineal con alta.

La tabla de estadísticos de la regresión entre el sensor AZ 86031 y AQ_FESZ (Tabla 42) muestra que la pendiente es 1.4633 con un nivel de probabilidad $p \approx 0.0000 < \alpha = 0.05$, lo cual quiere decir que la tendencia puede considerarse como lineal. Además, en la prueba de ANOVA, al ser $\alpha = 0.05 > P_F \approx 0.0000$, existe relación estadísticamente significativa entre ambos electrodos. El modelo lineal explica el 91.38% de los datos ($R^2_a = 91.3862\%$).

Tabla 42. Parámetros estadísticos entre DO de AZ 86031 y AQ_FESZ. El análisis exploratorio de los datos derivados de la lectura del electrodo comercial (AZ 86031) y AQ_FESZ arrojó que el modelo lineal es el que mejor describe el fenómeno con una Pendiente= 1.4633 y Ordenada al origen= -3.4221.

Regresión

	Estimado	EEst	t	p
Pendiente	1.4633	0.1296	11.2832	0.0000
Ordenada	-3.4221	0.9241	-3.7028	0.0030
R²	99.3862%			
R²_a	99.6683%			

ANOVA

	SCuad	gl	Prom. Cuad	F	p
Modelo	3.7370	1	3.7370	127.3100	0.0000
Residual	0.3522	12	0.0293		
Total (Corr.)	4.0892	13			

El análisis de residuales contra predichos (Figura 65) indica la existencia de diversos patrones en grupos de datos diferentes al lineal pero mayormente distribuidos a lo largo de la línea central. Sin embargo, la variación de residuales no rebasa el rango de ± 2.00 , es decir, no se trata de casos.

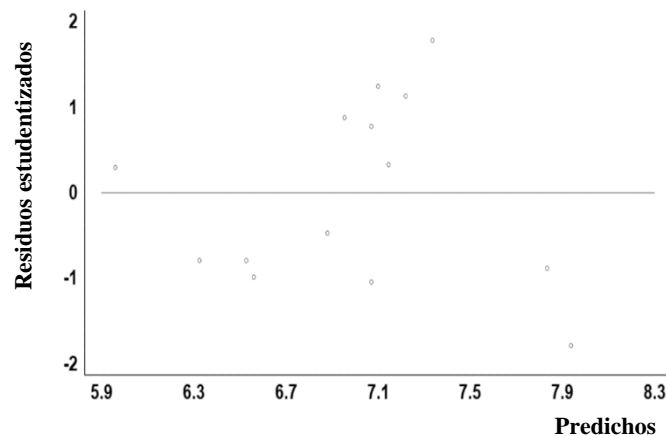


Figura 65. Análisis de los residuales de observados contra predichos. Los residuos estudentizados se observan agrupan en múltiples nubes de datos, lo que significa que existe variabilidad, pero no es estadísticamente significativa.

La gráfica de observados y predichos (Figura 66) para el electrodo AQ_FESZ muestra una tendencia lineal. La tabla de estadísticos de regresión entre observados y esperados presenta una pendiente= 1.0000 y una ordenada al origen= $3.53e^{-9}$

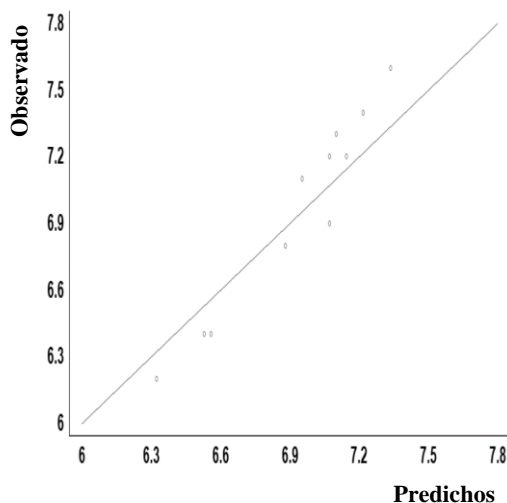


Figura 66. Similitud de datos predichos por el modelo ajustado y los obtenidos experimentalmente. Los datos obtenidos como predichos surgieron de la ecuación de la línea recta ($y= a+bx$). Se puede observar que existe similitud y relación entre los datos observados y predichos ya que siguen una tendencia lineal con poca variabilidad del modelo ajustado. Lo cual refuerza lo observado de la gráfica anterior.

En la tabla de análisis de regresión entre observados y predichos (Tabla 43) la pendiente es 1.0000 ($p\text{-value}= 0.000 < \alpha =0.05$) y la ordenada al origen muy cercana a 0.0000 (Ordenada= $1.6785e^{-6}$; $p\text{-value}= 1.000 > \alpha =0.05$). La prueba de ANOVA expresa, que al ser $\alpha = 0.05 > P_F \approx 0.0000$, existe relación estadísticamente significativa entre observados y predichos. Además, el modelo explica el 99.5427% de los datos. La prueba de t-Student confirma, que al ser $t_{calculada} < t_{tablas}$ ($0.0000 < 1.761$) existe relación lineal entre observados y predichos.

Tabla 43. Parámetros estadísticos entre Observados y Predichos para DO. Los estadísticos muestran una pendiente perfecta y una ordenada al origen= $1.52e^{-9}$. Al tener t_{tablas} un valor mayor a la $t_{calculada}$ se confirma que no existe variación significativamente estadística entre los datos calculados y los observados en el experimento.

<u>Regresión</u>				
	Estimado	EEst	t	p
Pendiente	1.0000	0.0886	11.2832	0.0000
Ordenada	$-1.52e^{-9}$	0.6214	$-2.44 e^{-9}$	1.0000
R²	99.3862%			
R²_a	99.6683%			
t-Student	0.0000<1.761			

<u>ANOVA</u>					
	SCuad	gl	Prom. Cuad	F	p
Modelo	3.7370	1	3.7370	127.3100	0.0000
Residual	0.3522	12	0.0293		
Total (Corr.)	4.0892	13			

Análisis de resultados (O₂ dis)

El electrodo AZ 86031 a temperaturas inferiores a 21 °C no tiene una respuesta confiable ya que sus valores permanecieron constantes. Mientras que, el electrodo AQ_FESZ mostró la tendencia esperada; la caída en valores de oxígeno en la parte final del experimento es igual en ambos electrodos, lo que indica que la existencia de un factor común causante de la disminución anómala del oxígeno disuelto. En el rango de temperatura de 21-35 °C estadísticamente se asemejan las lecturas de ambos electrodos.

La comprobación estadística entre ambos electrodos (AZ 86031 y AQ_FESZ), al mostrar una tendencia lineal con alta correlación entre electrodos (t -Student: $t_{calculada} < t_{tablas}$; ANOVA: $P_F < p$ -value), indica que la respuesta obtenida por nuestro desarrollo no es estadísticamente diferente a la obtenida por el instrumento de referencia (AZ 86031). Es importante resaltar que el Oxígeno disuelto, es un parámetro que puede ser influenciado por

numerosas variables en casos reales, microorganismos, homogeneidad de la temperatura del agua, distancia en la disposición de los electrodos, por mencionar algunos, lo que explica las diferencias entre electrodos, sin embargo, ello no se refleja en una diferencia estadística de las magnitudes medidas.

Conforme a revisión bibliográfica, la curva de tendencia de la disolución del oxígeno con respecto a la temperatura se asemeja a la curva de las lecturas del electrodo AQ_FESZ, por lo cual, se considera más confiable que el AZ 86031.

Conclusiones (O₂ dis)

Ya que ambos dispositivos (AZ 86031 y AQ_FESZ) presentaron una respuesta similar respecto a la temperatura del agua, los dos tienen la misma sensibilidad en el rango de 21°C a 35 °C.

El hecho de que antes de los 21 °C el electrodo AZ 86031 se apartara de la tendencia esperada conforme a la literatura, implica que el AQ_FESZ es más confiable.

Dado que en los sistemas arrecifales naturales, las temperaturas oscilan entre 20 °C y 30 °C, intervalo en el que AQ_FESZ tuvo un desempeño esperable, significa que el AQ_FESZ sea más adecuado para su aplicación en dichos ambientes.

Debido a que, en el rango de 21°C a 35 °C, el electrodo AQ_FESZ no demostró diferencia significativa a AZ 86031, se concluye que nuestro desarrollo se desempeña conforme a los estándares comerciales.

Sensor de luz visible

Los resultados de la respuesta de sensores de luz WT_81DLM y AQ_FESZ respecto al número de filtros de papel celofán cyan de referencia se encuentran en la Tabla 44 y su respectivo grafico en la Figura 67.

Tabla 44. Respuesta de ambos sensores de luz integrada sometidos a prueba de funcionalidad con respecto a número de filtros de papel celofán color cyan.

Luz integrada (Lux)		
# Filtro	WT_81DLM	AQ_FESZ
0	175.3	130
1	140.9	110.83
2	127.1	88.5
3	112.3	76.67
4	98.1	68.33
5	84.7	58.33
6	74.3	49.59
7	64.9	45.83
8	57.5	39.17
9	50.3	33.69
10	44.3	29.17
11	39	25.83
12	35.1	23.57
13	31.4	20.86
14	27.8	18.63
15	24.3	15.83

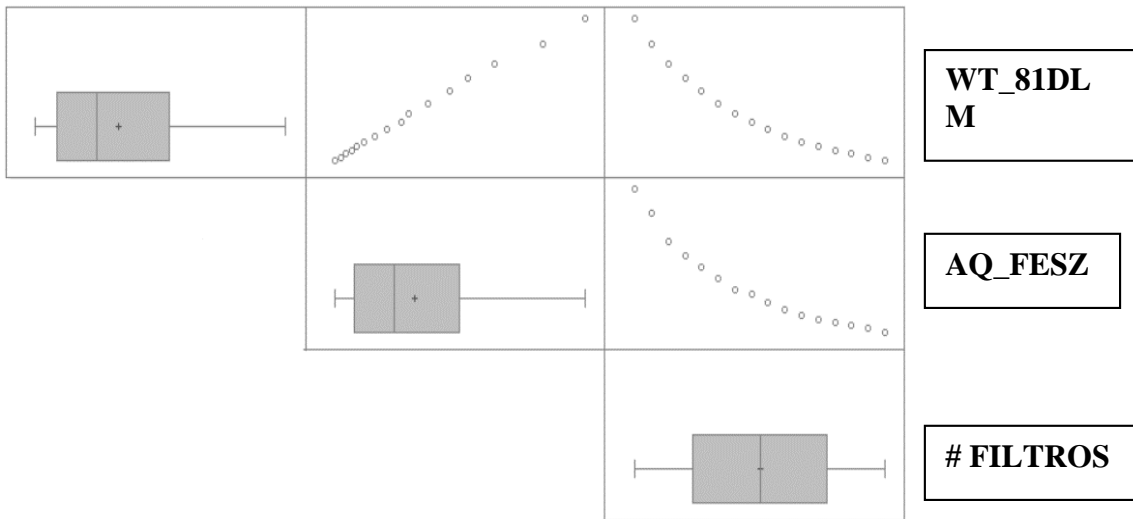


Figura 67. Tendencias entre las lecturas de los sensores de luz integrada en referencia del número de filtros. Las pruebas individuales muestran una tendencia similar, además de tener una tendencia lineal entre ambos.

Las lecturas individuales de cada electrodo respecto al número de filtro muestran una tendencia similar, línea cóncava. Así mismo, se observa una tendencia lineal entre ambos electrodos. Lo cual significa que existe relación entre ambos.

Según la literatura, la cantidad de luz es afectada por el gradiente de profundidad (Figura 68), a esto se le llama coeficiente de atenuación de la luz, además, los colores cálidos son los que primero se pierden y los colores fríos son los que se llegan a conservar. El coeficiente de atenuación es específico de cada rango de onda.

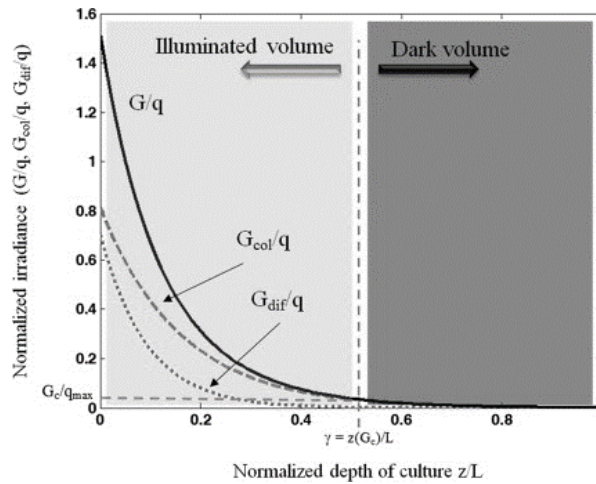


Figura 68. Tendencia en la literatura. La tendencia es una curva exponencial negativa, esto quiere decir que a mayor profundidad menor intensidad lumínica (Pruvost, 2019). Lo cual, es similar a la tendencia que te observo en el experimento de extinción de luz con el número de filtro.

El análisis se enfocó en conocer si los valores entre ambos electrodos resultan estadísticamente similares, independientemente de la relación estadística entre lecturas individuales de los sensores y número de filtros.

Relación entre sensores (WT_81DLM y AQ_FESZ)

Los resultados de la comprobación estadística de la relación entre las lecturas del sensor AQ_FESZ y WT_81DLM se encuentran en la Tabla 45, y el gráfico de ajuste según el modelo de regresión en la Figura 69. En la Tabla 45 los niveles de probabilidad tanto para la pendiente y la ordenada al origen son menores a 0.05.

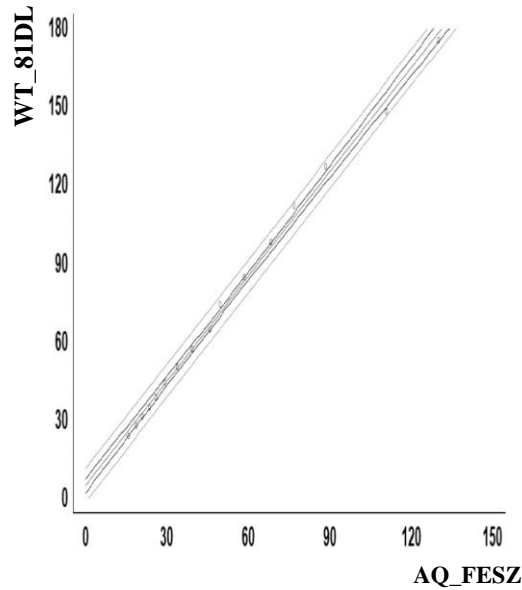


Figura 69. Modelo ajustado de dispersión. El modelo ajustado resultante de la relación entre las lecturas tomadas por el electrodo de AZ 86031 y la temperatura, siguen tendencia lineal con baja variabilidad de los datos, ya que para cada “x” corresponde una “y”.

La tabla de estadísticos de la regresión lineal (Tabla 45) entre los sensores de luz muestra que la pendiente es 1.3334 con un nivel de probabilidad cercano a 0.0000 ($p\text{-value} \approx 0.0000 < \alpha = 0.05$), expresando que la tendencia puede ser considerada como lineal. La ordenada al origen es igual a 5.0665 ($p\text{-value} = 0.0100 < \alpha = 0.05$), que indica que con el 95% de confianza la ordenada al origen es diferente de 0.0000. Además, al ser $\alpha = 0.05 > p_F \approx 0.0000$ en la prueba de ANOVA, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables. El modelo explica arriba del 99.64% de los datos ($R^2_a = 99.6398\%$).

Tabla 45. Parámetros estadísticos entre AQ_FESZ y WT_81DLM. El análisis exploratorio de los datos derivados de la lectura de un sensor comercial a las lecturas del sensor de AQ_FESZ arrojó que el modelo lineal es el que mejor describe el fenómeno con una Pendiente= 1.3334 y Ordenada al origen 5.0665.

<u>Regresión</u>				
	Estimado	EEst	t	p
Pendiente	1.3334	0.0206	64.4212	0.0000
Ordenada	5.0665	1.2812	3.9543	0.0014
R²	99.6638%			
R²_a	99.6398%			

<u>ANOVA</u>					
	SCuad	gl	Prom. Cuad	F	p
Modelo	31548.1000	1	31548.1000	4150.0900	0.0000
Residual	106.4250	14	7.6017		
Total (Corr.)	31654.5000	15			

El análisis de residuales (Figura 70) indica la existencia de patrones en grupos de datos diferentes al lineal. Sin embargo, la variación de residuales no rebasa el rango de ± 2.5 , es decir que, no existen casos extraordinarios influénciales.

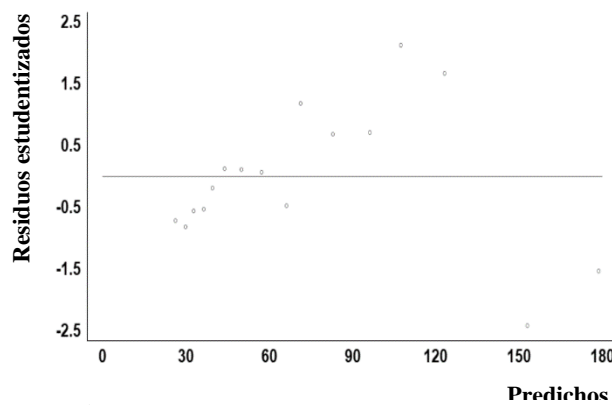


Figura 70. Análisis de los residuales de observados contra predichos. Los residuos estudentizados se observan agrupan en múltiples nubes de datos, lo que significa que existe variabilidad, pero no es estadísticamente significativa.

La gráfica de observados contra predichos (Figura 71) nuevamente muestra una tendencia lineal entre sensores. La tabla de estadísticos de regresión (Tabla 46) entre observados y esperados muestra que la pendiente (Pendiente= 1.0000) es muy cercana a 1.0000 con valor $p_{pendiente} \approx 0.000 < \alpha = 0.05$).

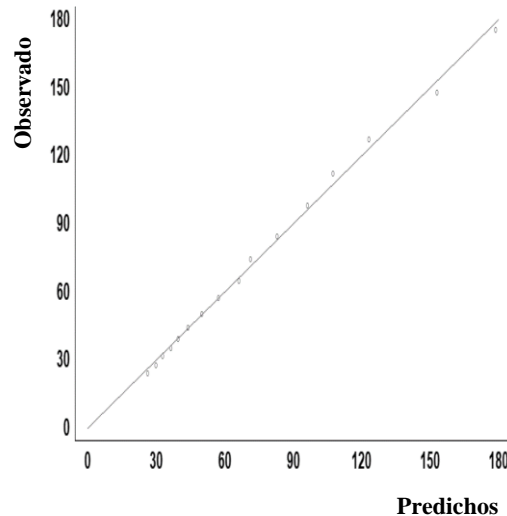


Figura 71. Similitud de datos predichos por el modelo ajustado y los obtenidos experimentalmente. Los datos obtenidos como predichos surgieron de la ecuación de la línea recta ($y= a+bx$). Se puede observar que existe similitud y relación entre los datos observados y predichos ya que siguen una tendencia lineal con poca variabilidad del modelo ajustado. Lo cual refuerza lo observado de la gráfica anterior.

En la tabla de análisis de regresión entre observados y predichos (Tabla 46) encontramos una pendiente de 1.0000 y una ordenada al origen de $1.29e^{-8}$, la cual podría considerarse que parte del origen (0.00). La prueba de ANOVA expresa, que al ser $\alpha = 0.05 > p_F \approx 0.0000$ existe relación estadísticamente significativa entre observados y predichos. El modelo explica el 99.64% de los datos. La prueba de t-Student confirma, que al ser $t_{calculada} < t_{tablas}$ ($0.000 < 1.746$) existe relación lineal entre observados y predichos.

Tabla 46. Parámetros estadísticos entre Observados y Predichos para Salinidad. Los estadísticos muestran una pendiente perfecta y una ordenada al origen= $1.29e-8$. Al tener t_{tablas} un valor mayor a la $t_{calculada}$ se confirma que no existe variación significativamente estadística entre los datos calculados y los observados en el experimento.

<u>Regresión</u>					
	Estimado	EEst	t	p	
Pendiente	1.0000	0.0155	64.4212	0.0000	
Ordenada	$1.29e-8$	1.3482	$9.54e-9$	1.0000	
R²	99.6638%				
R²_a	99.6398%				
t-Student	0.0000<1.746				

<u>ANOVA</u>					
	SCuad	gl	Prom. Cuad	F	p
Modelo	31548.1000	1	31548.1000	4150.0900	0.0000
Residual	106.4250	14	7.60178		
Total (Corr.)	31654.5000	15			

Análisis de resultados (Luz integrada)

La comprobación estadística entre ambos sensores (WT_81DLM y AQ_FESZ), al mostrar una tendencia lineal con alta correlación (t -Student: $t_{calculada} < t_{tablas}$; ANOVA: $P_F < p$ -value) sin existir residuales extraordinarios, indica que la respuesta obtenida por nuestro desarrollo no es estadísticamente diferente a la obtenida por el instrumento de referencia (WT_81DLM). Ya que el modelo ajustado, describió el 99.64% de los datos ($R^2_a = 99.6398\%$).

Conforme a la bibliografía (Gloria, 2018; Sanabria, 2017), la extinción de la luz por la profundidad, la curva es similar a la que se obtuvo por el aumento del número de filtros de papel celofán.

Conclusiones (Luz integrada)

Para Luz visible, ambos dispositivos (WT_81DLM y AQ_FESZ) presentan una respuesta similar, sin diferencia significativa entre las lecturas de Luz generadas por el sensor de AQ_FESZ respecto al dispositivo de referencia, WT_81DLM.

Debido al diseño del experimento, no fue posible recrear un fenómeno que generara respuestas lineales, ya que el control de la cantidad de luz se hizo de manera indirecta sobre una longitud de onda específica (color cyan).

Aunque no se pudo corroborar la existencia de una respuesta lineal de los sensores, la semejanza estadística en las lecturas del sensor de referencia considerando nuestro desarrollo, implica que las lecturas son confiables en base a los estándares comerciales.

Calibración

Es importante mencionar que, los multiparámetros tienen que ser calibrados de preferencia antes de realizar mediciones. Ya que esto asegura un funcionamiento verídico.

Los electrodos de ambos multiparámetros fueron calibrados uno por uno con los respectivos reactivos (Atlas Scientific) y siguiendo instrucciones de calibración por cada fabricante (ver apartado Calibración).

En el caso del multiparámetro desarrollado (AQ_FESZ), este al tener un microcontrolador (Arduino) se conectó vía USB a una computadora. Desde el programa de Arduino se cargó el software necesario para realizar la calibración de cada uno de los electrodos (pH, EC/TDS/Salinidad, DO). Una vez que se importó el software, se realiza la calibración con las soluciones de cada electrodo siguiendo las instrucciones de Atlas Scientific. Ya finalizado el proceso de calibración de los electrodos, se importó el software programado para el funcionamiento. Al terminar de cargar el programa, se retiró el cable USB del microcontrolador.

DISCUSIÓN

A excepción del electrodo de Oxígeno disuelto DO y el de luz integrada (LI), todos los sensores mostraron una respuesta lineal en las lecturas, lo que es congruente con los parámetros de diseño de los fabricantes, e implica que se trata de sensores de calidad electrónica. Así mismo, esto también significa que la implementación de sensores, software y otros dispositivos electrónicos en el AQ_FESZ fue adecuada ya que no se afecta el desempeño original de los componentes.

El hecho de que para los sensores de DO y LI no se haya obtenido respuesta lineal, se debe al diseño del experimento, ya que las variables independientes DO y LI se fijaron de manera indirecta mediante la solubilidad del Oxígeno dependiente de la temperatura y mediante cantidad de luz que lograba atravesar diferentes grosores de un mismo filtro. Por lo anterior, la carencia de respuesta lineal no se debió a los sensores y no implica que los sensores o el desarrollo sean defectuosos.

En todos los casos, las respuestas entre el AQ_FESZ y los sensores de referencia fueron estadísticamente similares, sin embargo, en algunos parámetros el AQ_FESZ resultó superior en grado de ajuste, como en el caso del pH, EC, DO y Temperatura, donde el grado de ajuste fue superior al del sensor AZ 86031. Así mismo, conforme al patrón de respuesta, el AQ_FESZ respondió mejor en intervalos donde el AZ 86031 llegó incluso a mantenerse estático, como en el caso del DO.

La diferencia en lecturas de los sensores de Salinidad, TDS y EC, radica en que el electrodo implementado en el AQ_FESZ está diseñado para salinidades marinas, mientras que el del AZ 86031 lo está para aguas dulces y salobres. Ya que las salinidades consideradas en nuestro experimento fueron mayores que las salobres, debe esperarse que las lecturas del AQ_FESZ sean más cercanas a los valores reales. De hecho, al estar diseñados para diferentes concentraciones de salinidad, los algoritmos de cada sensor son diferentes, por lo cual, valores fuera del rango de diseño pueden ser extrapolados de manera inexacta, lo que explica las diferencias de las lecturas entre dispositivos a valores de salinidad cercanos a los del ambiente marino.

CONCLUSIONES

Gracias a la infraestructura que actualmente existe en el mercado se logró desarrollar un instrumento de medición para parámetros hidrobiológicos. Al desarrollarse en código de “software” libre tiene la capacidad de incrementarse o adaptarse a las necesidades de los desarrollos. Además, el desarrollo no sobrepasó los \$10,000 (pesos mexicanos), ya que en el mercado existe la disponibilidad y bajo costo de materiales e insumos electrónicos. El acoplamiento del circuito electrónico no requirió tecnología compleja más allá de la impresión de placas y el soldado de componentes.

Como se observó, el desarrollo fue capaz de operar dentro de los rangos de las variables indicadoras de cambio climático pH, EC/TDS/Salinidad, OD, Luz visible, Temperatura. Aunque se cuenta con los sensores de luz ultravioleta, no se realizó su evaluación debido a que no se contó con una fuente certificada modulable de luz UV.

De manera general todos los sensores implementados en el AQ_FESZ respondieron conforme a las especificaciones del fabricante por lo que la implementación de los sensores en este dispositivo es adecuada. No existió diferencia estadísticamente significativa entre las lecturas del AQ_FESZ y las esperadas mediante dispositivos comerciales, por lo que, el desempeño del AQ_FESZ se encuentra dentro de los estándares esperados. Así mismo el desempeño del AQ_FESZ, es óptimo para los sistemas arrecifales. Con base en la información del fabricante, el dispositivo tiene un protocolo de calibración (Calibración; pag.28) en tierra para pH, EC, TDS, Salinidad, DO; auxiliándose de sustancias de calibración.

Como valor agregado sobre dispositivos comerciales, el diseño del AQ_FESZ permite tomar datos *in situ* ya que soporta presiones de al menos 5 ATM de presión, equivalentes a 40 m de profundidad según pruebas realizadas en campo; al contar con un módulo de baterías y almacenamiento, el aparato puede instalarse temporalmente en sitios de monitoreo. Además, el dispositivo cuenta con puertos libres para poder reconfigurarse a futuro con nuevos dispositivos y sensores, dependiendo de las necesidades de los estudios y trabajos requeridos.

Por la situación de pandemia a nivel mundial, la implementación de AQ_FESZ en un sistema arrecifal verdadero no fue posible, pero ya que las pruebas de desempeño se realizaron dentro de los rangos encontrados en dichos sistemas naturales y por tiempos de duración de las baterías, es de esperarse que su desempeño sea óptimo.

PERSPECTIVAS Y SUGERENCIAS

En un futuro se pretende realizar pruebas de funcionamiento para más sensores, como es el caso de los sensores de Luz UV los cuales necesitan de una fuente lumínica modular y certificada, para poner a prueba la exactitud y sensibilidad de los sensores.

En la parte de calibración, se sigue que a futuro se realice un experimento en el cual se pueda controlar y modular los niveles de oxígeno, ya que este elemento al ser sensible a las variaciones, se necesita de un ambiente controlado y libre de organismos que puedan afectar las lecturas reales.

En modificaciones a futuro, se planea implementar el proceso de calibración y control de los sensores mediante señales Bluetooth y WiFi. Tales implementaciones permitirían importar valores de calibración y exportar los datos recolectados sin necesidad de extraer del medio el multiparámetro.

Colocar una batería con mayor durabilidad, la cual permita trabajar por mayor tiempo al aparato.

Se pretende implementar el aparato en un arrecife coralino real. En el cual se confirme el funcionamiento correcto de los sensores en situaciones reales y extremas.

Proponer un programa de monitoreo local en los sistemas arrecifales mexicanos, lo cual ayudaría a la toma de decisiones en situaciones de restauración arrecifal y propuestas de zonas de conservación.

ANEXO

+/- .02 25°C / 77°F

°C	°F	pH	°C	°F	pH
5	41	4.00	30	86	4.01
10	50	4.00	35	95	4.02
15	59	4.00	40	104	4.03
20	68	4.00	45	113	4.04
25	77	4.00	50	122	4.05

Figura 72. **Tabla de corrección.** Corrección del valor del Buffer pH 4 según la temperatura en la que se encuentra la sustancia de calibración de Atlas Scientific

2.182
2.953 — X Unstabilized
3.601
3.998
3.998 — ✓ Stabilized
3.998
cal,low,4 ←
*OK
4.000
4.000

Una vez que las lecturas se estabilizan, para el punto bajo se escribe el comando: "cal,low,4"

Figura 73. **Calibración en el punto bajo.** Esperar de 1-2 minutos para que se establezca las lecturas, una vez estabilizada proceder a introducir el comando

+/- .02 25°C / 77°F

°C	°F	pH	°C	°F	pH
5	41	7.09	30	86	6.99
10	50	7.06	35	95	6.98
15	59	7.04	40	104	6.97
20	68	7.02	45	113	6.97
25	77	7.00	50	122	6.96

Figura 75. Tabla de corrección. Corrección del valor del Buffer pH 7 según la temperatura en la que se encuentra la sustancia de calibración de Atlas Scientific

6.917
7.126
7.223
7.225
7.225
7.225
cal,mid,7
*OK
7.000
7.000

X Unstabilized

✓ Stabilized

Una vez que las lecturas se estabilizan, para el punto medio se escribe el comando: "cal,mid,7"

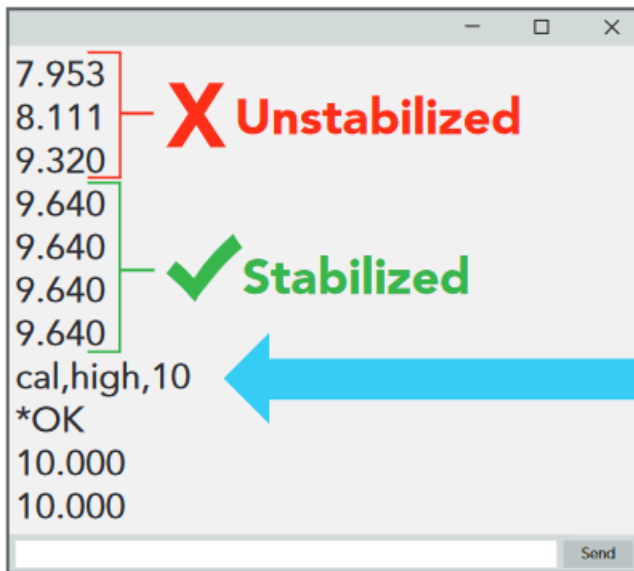
Send

Figura 74. Calibración en el punto medio. Esperar de 1-2 minutos para que se estabilice las lecturas, una vez estabilizada proceder a introducir el comando

+/- .02 25°C / 77°F

°C	°F	pH	°C	°F	pH
5	41	10.25	30	86	9.96
10	50	10.18	35	95	9.92
15	59	10.12	40	104	9.88
20	68	10.06	45	113	9.85
25	77	10.00	50	122	9.82

Figura 77. Tabla de corrección. Corrección del valor del Buffer pH 10 según la temperatura en la que se encuentra la sustancia de calibración de Atlas Scientific



Una vez que las lecturas se estabilizan, para el punto alto se escribe el comando: "cal,high,10"

Figura 76. Calibración en el punto alto. Esperar de 1-2 minutos para que se estabilice las lecturas, una vez estabilizada proceder a introducir el comando

+/- 5 25°C / 77°F

°C	°F	μS/cm	°C	°F	μS/cm
5	41	8,220	30	86	14,120
10	50	9,330	35	95	15,550
15	59	10,480	40	104	16,880
20	68	11,670	45	113	18,210
25	77	12,880	50	122	19,550

Figura 78. Tabla de corrección. Corrección del valor de la solución de calibración para Conductividad según la temperatura en la que se encuentra la sustancia de calibración de Atlas Scientific

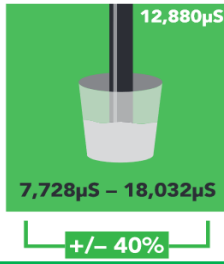
```

16,247
15,491
14,053
13,756
13,756
13,756
13,756
cal,low,12880
*OK
13,756
13,756

```

X Unstabilized

✓ Stabilized



Una vez que las lecturas se estabilizan, para el punto bajo se escribe el comando: "cal,low,12880"

Para el punto alto se escribe el comando: "cal,high,150000"

Figura 79. Calibración. Esperar de 1-2 minutos para que se estabilice las lecturas, una vez estabilizada proceder a introducir el comando

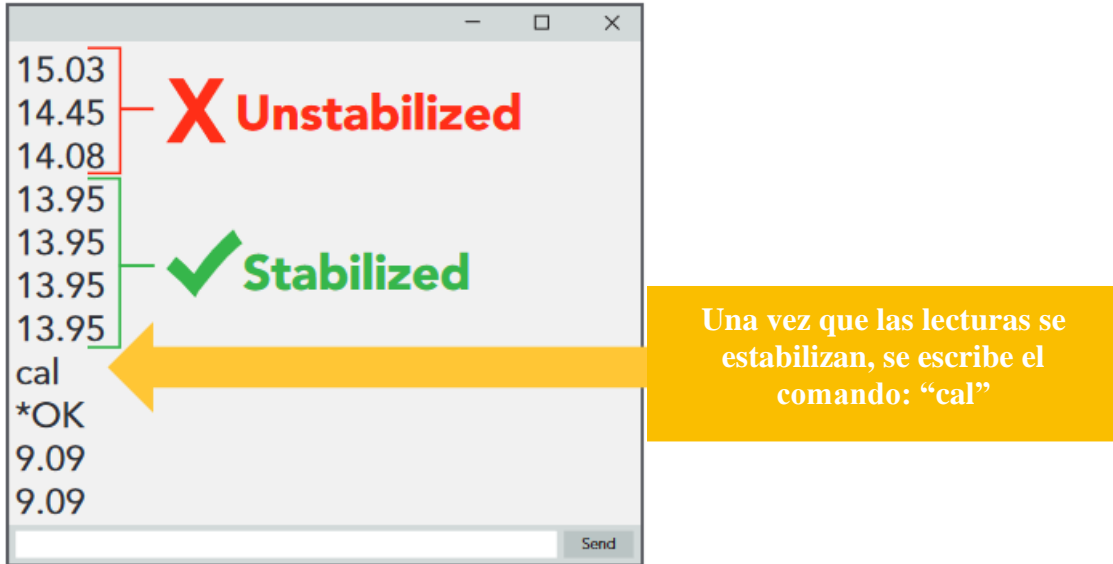


Figura 80. Calibración. Esperar de 1-2 minutos para que se estabilice las lecturas, una vez estabilizada proceder a introducir el comando

REFERENCIAS

- Albright, R., Caldeira, L., Hosfelt, J., Kwiatkowski, L., Maclaren, J. K., Mason, B. M., . . . Ricke, K. L. J. N. (2016). Reversal of ocean acidification enhances net coral reef calcification. *531(7594)*, 362-365.
- Anthony, K. R., Kline, D. I., Diaz-Pulido, G., Dove, S., & Hoegh-Guldberg, O. J. P. o. t. N. A. o. S. (2008). Ocean acidification causes bleaching and productivity loss in coral reef builders. *105(45)*, 17442-17446.
- Arduino. (2020). Language: #include. Retrieved from <https://www.arduino.cc/reference/tr/language/structure/further-syntax/include/>
- Ateweberhan, M., Feary, D. A., Keshavmurthy, S., Chen, A., Schleyer, M. H., & Sheppard, C. R. J. M. p. b. (2013). Climate change impacts on coral reefs: synergies with local effects, possibilities for acclimation, and management implications. *74(2)*, 526-539.
- Athie, G., Salas-Monreal, D., Valle-Levinson, A. J. E., Coastal, & Science, S. (2022). Subinertial flow patterns in a tropical coral reef system of the southwestern gulf of Mexico. *275*, 107991.
- Authority, G. B. R. M. P. (2019). *Great Barrier Reef Outlook Report 2019*: Great Barrier Reef Marine Park Authority.
- AZINSTRUMENT, C. (2019). AZ 86031 Medidor pH / COND. / SALT / DO. Retrieved from <https://www.az-instrument.com.tw/es/product-620072/Medidor-de-pH-COND-SAL-OD-86031-AZ-EB.html>
- Baethgen, W. E. J. C. R. (1997). Vulnerability of the agricultural sector of Latin America to climate change. *9(1-2)*, 1-7.
- Bellantuono, A. J., Hoegh-Guldberg, O., & Rodriguez-Lanetty, M. J. P. o. t. R. S. B. B. S. (2012). Resistance to thermal stress in corals without changes in symbiont composition. *279(1731)*, 1100-1107.
- Benavides, H., & León, G. (2007). Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático.
- Berkelmans, R. (2002). Time-integrated thermal bleaching thresholds of reefs and their variation on the Great Barrier Reef. *229*, 73-82.
- Berkelmans, R., De'ath, G., Kininmonth, S., & Skirving, W. J. J. C. r. (2004). A comparison of the 1998 and 2002 coral bleaching events on the Great Barrier Reef: spatial correlation, patterns, and predictions. *23(1)*, 74-83.
- Berkelmans, R., & Willis, B. J. C. R. (1999). Seasonal and local spatial patterns in the upper thermal limits of corals on the inshore Central Great Barrier Reef. *18(3)*, 219-228.
- Blanchon, P., Iglesias-Prieto, R., Jordán Dahlgren, E., & Richards, S. (2010). Arrecifes de coral y cambio climático: vulnerabilidad de la zona costera del estado de Quintana Roo. *229*.
- Böhnke-Henrichs, A., Baulcomb, C., Koss, R., Hussain, S. S., & de Groot, R. S. J. J. o. e. m. (2013). Typology and indicators of ecosystem services for marine spatial planning and management. *130*, 135-145.

- Bozec, Y.-M., Hock, K., Mason, R. A., Baird, M. E., Castro-Sanguino, C., Condie, S. A., . . . Mumby, P. J. J. B. (2020). Cumulative impacts across Australia's Great Barrier Reef: A mechanistic evaluation.
- Brakel, W. H. J. B. o. M. S. (1979). Small-scale spatial variation in light available to coral reef benthos: quantum irradiance measurements from a Jamaican reef. *29*(3), 406-413.
- Brewer, P. G. J. G. R. L. (1997). Ocean chemistry of the fossil fuel CO₂ signal: The haline signal of "business as usual". *24*(11), 1367-1369.
- Brown, B. J. C. r. (1997). Coral bleaching: causes and consequences. *16*(1), S129-S138.
- Bruno, J. F., Selig, E. R., Casey, K. S., Page, C. A., Willis, B. L., Harvell, C. D., . . . Melendy, A. M. J. P. b. (2007). Thermal stress and coral cover as drivers of coral disease outbreaks. *5*(6), e124.
- Buth, J. M. J. J. o. C. E. (2016). Ocean acidification: Investigation and presentation of the effects of elevated carbon dioxide levels on seawater chemistry and calcareous organisms. *93*(4), 718-721.
- Caballero-Aragón, H., Perera-Valderrama, S., Cerdeira-Estrada, S., Martell-Dubois, R., Rosique-de la Cruz, L., Álvarez-Filip, L., . . . Ressler, R. J. D. i. B. (2022). Dataset of coral reefs monitoring, Puerto Morelos, Mexico, 2019. 108253.
- Caldeira, K., & Wickett, M. E. J. N. (2003). Anthropogenic carbon and ocean pH. *425*(6956), 365-365.
- Calderón, A., Reyes, H., & Carriquiry, H. (2007). *El papel de los arrecifes coralinos en el flujo de carbono en el océano: estudios en el Pacífico mexicano*: INE-SEMARNAT-CICESE.
- Chabanet, P., Bigot, L., Naim, O., Garnier, R., Tessier, E., & Moyne-Picard, M. (2002). *Coral reef monitoring at Reunion island(Western Indian Ocean) using the GCRMN method*. Paper presented at the Proceedings of the Ninth International Coral Reef Symposium, Bali, 23-27 October 2000.
- de Suarez, J. M., Cicin-Sain, B., Wowk, K., Payet, R., Hoegh-Guldberg, O. J. O., & management, c. (2014). Ensuring survival: Oceans, climate and security. *90*, 27-37.
- Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., & Kleypas, J. A. J. A. r. o. m. s. (2009). Ocean acidification: the other CO₂ problem. *1*, 169-192.
- Eakin, C. M., Morgan, J. A., Heron, S. F., Smith, T. B., Liu, G., Alvarez-Filip, L., . . . Bouchon, C. J. P. o. (2010). Caribbean corals in crisis: record thermal stress, bleaching, and mortality in 2005. *5*(11), e13969.
- EEGCC. (2004). Water Quality Assessment: Chemical: Dissolved Oxygen and Biochemical Oxygen Demand. Recuperado from <http://www.cotf.edu/ete/modules/waterq3/WQassess3f.html>
- Feely, R. A., Sabine, C. L., Lee, K., Berelson, W., Kleypas, J., Fabry, V. J., & Millero, F. J. J. S. (2004). Impact of anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ system in the oceans. *305*(5682), 362-366.
- Freedman, D. A. (2009). *Statistical models: theory and practice*: cambridge university press.
- Freund, R. J., Wilson, W. J., & Sa, P. (2006). *Regression analysis*: Elsevier.

- Friedlingstein, P., Cox, P., Betts, R., Bopp, L., von Bloh, W., Brovkin, V., . . . Fung, I. J. J. o. c. (2006). Climate-carbon cycle feedback analysis: results from the C4MIP model intercomparison. *19*(14), 3337-3353.
- Gattuso, J.-P., Magnan, A., Billé, R., Cheung, W. W., Howes, E. L., Joos, F., . . . Eakin, C. M. J. S. (2015). Contrasting futures for ocean and society from different anthropogenic CO₂ emissions scenarios. *349*(6243), aac4722.
- Gloria, R. V. (2018). La luz en los océanos. Recuperado from <https://slideplayer.es/slide/13019975/>
- Glynn, P. (1993). Coral reef bleaching: ecological perspectives. *12*(1), 1-17.
- Glynn, P., & D'croz, L. J. C. r. (1990). Experimental evidence for high temperature stress as the cause of El Niño-coincident coral mortality. *8*(4), 181-191.
- Gotelli, N. J., & Ellison, A. M. (2004). *A primer of ecological statistics* (Vol. 1): Sinauer Associates Sunderland.
- Goulden, C. H. (1953). *Methods of statistical analysis* (Vol. 75): LWW.
- Hernández, L., Reyes-Bonilla, H., & Balart, E. F. J. R. m. d. b. (2010). Efecto del blanqueamiento del coral por baja temperatura en los crustáceos decápodos asociados a arrecifes del suroeste del golfo de California. *81*, 113-119.
- Hoegh-Guldberg, O., & Salvat, B. J. M. e. p. s. (1995). Periodic mass-bleaching and elevated sea temperatures: bleaching of outer reef slope communities in Moorea, French Polynesia. *121*, 181-190.
- Hoegh, G. O. (1999). Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *50*(8), 839-866.
- Hoey, A. S., Howells, E., Johansen, J. L., Hobbs, J.-P. A., Messmer, V., McCowan, D. M., . . . Pratchett, M. S. J. D. (2016). Recent advances in understanding the effects of climate change on coral reefs. *8*(2), 12.
- Hughes, Kerry, J. T., Baird, A. H., Connolly, S. R., Dietzel, A., Eakin, C. M., . . . Liu, G. J. N. (2018). Global warming transforms coral reef assemblages. *556*(7702), 492-496.
- Hughes, T. (1994). Catastrophes, phase shifts, and large-scale degradation of a Caribbean coral reef. *265*(5178), 1547-1551.
- Hughes, T. P., Kerry, J. T., Álvarez-Noriega, M., Álvarez-Romero, J. G., Anderson, K. D., Baird, A. H., . . . Berkelmans, R. J. N. (2017). Global warming and recurrent mass bleaching of corals. *543*(7645), 373-377.
- IPCC. (2019). *Calentamiento global de 1,5 °C: Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza*. Retrieved from
- Jiang, L., Sun, Y.-F., Zhang, Y.-Y., Tian, Y., Lei, X.-M., Zhou, G.-W., . . . Huang, H. J. C. R. (2021). Ocean acidification alters the thermal performance curves of brooded larvae from the reef coral *Pocillopora damicornis*. *40*(5), 1437-1449.
- Jokiel, P. L., & Coles, S. L. (1974). Effects of heated effluent on hermatypic corals at Kahe Point, Oahu.

- Kleypas, J. A., Buddemeier, R. W., Archer, D., Gattuso, J.-P., Langdon, C., & Opdyke, B. N. J. s. (1999). Geochemical consequences of increased atmospheric carbon dioxide on coral reefs. *284*(5411), 118-120.
- Krueger, T., Horwitz, N., Bodin, J., Giovani, M.-E., Escrig, S., Meibom, A., & Fine, M. J. R. S. o. s. (2017). Common reef-building coral in the Northern Red Sea resistant to elevated temperature and acidification. *4*(5), 170038.
- Marshall, P., & Baird, A. J. C. r. (2000). Bleaching of corals on the Great Barrier Reef: differential susceptibilities among taxa. *19*(2), 155-163.
- Martínez-Castillo, V., Rodríguez-Troncoso, A. P., Mayfield, A. B., Rodríguez-Zaragoza, F. A., & Cupul-Magaña, A. L. (2022). *Coral Recovery in the Central Mexican Pacific 20 Years after the 1997–1998 El Niño Event*. Paper presented at the Oceans.
- Martínez, V., Rodríguez, A. P., Bautista, E., & Cupul, A. L. (2022). Symbiont-coral relationship in the main reef building scleractinians of the Central Mexican Pacific. *86*(3), 315-323.
- McWhorter, J. K., Halloran, P. R., Roff, G., Skirving, W. J., Perry, C. T., & Mumby, P. J. J. G. C. B. (2022). The importance of 1.5° C warming for the Great Barrier Reef. *28*(4), 1332-1341.
- Mies, M., Francini-Filho, R. B., Zilberberg, C., Garrido, A. G., Longo, G. O., Laurentino, E., . . . Banha, T. N. J. F. i. M. S. (2020). South Atlantic coral reefs are major global warming refugia and less susceptible to bleaching. *7*, 514.
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2021). *Introduction to linear regression analysis*: John Wiley & Sons.
- Mumby, P. J., & Steneck, R. S. J. (2008). Coral reef management and conservation in light of rapidly evolving ecological paradigms. *23*(10), 555-563.
- Nakicenovic, N., & Swart, R. (2000). Emissions scenarios-special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Olivo, M. d. L., & Soto-Olivo, A. J. U., *Ciencia y tecnología*. (2010). Comportamiento de los gases de efecto invernadero y las temperaturas atmosféricas con sus escenarios de incremento potencial. *14*(57), 221-230.
- Pandolfi, J. M., Connolly, S. R., Marshall, D. J., & Cohen, A. L. J. s. (2011). Projecting coral reef futures under global warming and ocean acidification. *333*(6041), 418-422.
- Pörtner, H.-O. (2008). Ecosystem effects of ocean acidification in times of ocean warming: a physiologist's view. *373*, 203-217.
- Pruvost, J. (2019). Cultivation of algae in photobioreactors for biodiesel production. In *Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels* (pp. 629-659): Elsevier.
- Reaser, J. K., Pomerance, R., & Thomas, P. O. J. C. b. (2000). Coral bleaching and global climate change: scientific findings and policy recommendations. *14*(5), 1500-1511.
- Roff, G., Mumby, P. J. J. T. i. e., & evolution. (2012). Global disparity in the resilience of coral reefs. *27*(7), 404-413.
- Sabine, C. L., Feely, R. A., Gruber, N., Key, R. M., Lee, K., Bullister, J. L., . . . Tilbrook, B. J. s. (2004). The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *305*(5682), 367-371.

- Salas-Monreal, D., Monreal-Jimenez, R., Contreras-Tereza, V. K., Monreal-Gomez, M. A., Salas-de-Leon, D. A., & Riveron-Enzastiga, M. L. J. O. (2022). Hydrographic variation in a tropical coral reef system: The Veracruz Reef System, Gulf of Mexico.
- Sanabria, A. d. E. d. L. d. (2017). Transmisión y absorción de la radiación solar en el agua. Recuperado from <https://aulaestudiolagosanabria.info/absorcion-de-la-luz/>
- Schutte, V. G., Selig, E. R., & Bruno, J. F. J. M. E. P. S. (2010). Regional spatio-temporal trends in Caribbean coral reef benthic communities. *402*, 115-122.
- Scientific, A. (2019). EZO: Embedded Systems Retrieved from <https://atlas-scientific.com/embedded-solutions/ezo-conductivity-circuit/>
- Shaver, E. C., McLeod, E., Hein, M. Y., Palumbi, S. R., Quigley, K., Vardi, T., . . . Muller, E. M. J. G. C. B. (2022). A roadmap to integrating resilience into the practice of coral reef restoration.
- Skirving, W., Marsh, B., De La Cour, J., Liu, G., Harris, A., Maturi, E., . . . Eakin, C. M. J. R. S. (2020). Coraltemp and the coral reef watch coral bleaching heat stress product suite version 3.1. *12*(23), 3856.
- Solomon, S., Manning, M., Marquis, M., & Qin, D. (2007). *Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC* (Vol. 4): Cambridge university press.
- Tierney, J. E., Abram, N. J., Anchukaitis, K. J., Evans, M. N., Giry, C., Kilbourne, K. H., . . . Zinke, J. J. p. (2015). Tropical sea surface temperatures for the past four centuries reconstructed from coral archives. *30*(3), 226-252.
- Watt-Pringle, R., Smith, D. J., Ambo-Rappe, R., Lamont, T. A., & Jompa, J. J. C. R. (2022). Suppressed recovery of functionally important branching *Acropora* drives coral community composition changes following mass bleaching in Indonesia. 1-14.
- Webster, P. J., Holland, G. J., Curry, J. A., & Chang, H.-R. J. S. (2005). Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. *309*(5742), 1844-1846.
- Wintact. (2019). Digital Lux Meter WT8. Retrieved from <http://www.wintact.net/en/products/wt81.html>